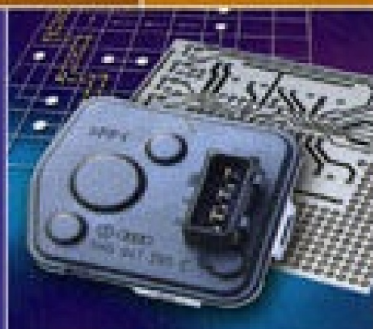


Высшее профессиональное образование

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебное пособие



Радиоэлектроника

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области
радиотехники, электроники, биомедицинской техники
и автоматизации в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальности «Проектирование и технология
радиоэлектронных средств» направления «Проектирование
и технология электронных средств»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2010

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32я73

И741

Рецензенты:

доцент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», *Г.Ф. Баканов*;

заведующий кафедрой информатики Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ), д.т.н., профессор *Ю.И. Кудинов*;
старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Тамбовского высшего военного авиационного инженерного училища радиоэлектроники (военного института), д.т.н., профессор *В.И. Павлов*

Информационные технологии проектирования радио-
И741 **электронных средств** учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, И.В. Тюрин и др. — М. Издательский центр «Академия», 2010. — 384 с.

ISBN 978-5-7695-6256-3

Приведены основные положения, классификация и характеристики информационных технологий (ИТ) и систем; с позиций системного подхода рассматриваются архитектура, принципы и тенденции развития ИТ; изложена методология автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств (РЭС); рассмотрены виды обеспечения систем автоматизированного проектирования (САПР) РЭС, математические модели объектов проектирования, задачи анализа и синтеза РЭС, методы решения задач проектирования изделий и технологических процессов, методы принятия проектных и управленческих решений; приведены примеры электронных САПР и информационных систем, используемых на всех этапах жизненного цикла РЭС, дается методика оценки эффективности разрабатываемых и внедряемых ИТ.

Главы сопровождаются примерами решения задач автоматизированного проектирования электронных средств и конкретных ИТ.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

10'00 ZALI

ISBN 978-5-7695-6256-3

© Коллектив авторов, 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

10

Реализация процессов проектирования и производства современных электронных средств невозможна без использования информационных технологий (ИТ), а сами процессы не могут рассматриваться в отрыве друг от друга и других этапов жизненного цикла (ЖЦ) продукции. Острая конкурентная борьба за рынки сбыта между научно-производственными объединениями электронного профиля приводит к быстрому развитию ИТ различного назначения. В настоящее время информационные системы применяются в маркетинге, планировании, проектировании, производстве, а также при реализации, эксплуатации, в том числе и утилизации, электронных средств. Только широкое использование ИТ и реализующих их информационных систем (ИС) позволяет предприятиям, выпускающим конкурентоспособные радиоэлектронные средства (РЭС), выйти на качественно новый уровень управления и производства.

В последнее десятилетие произошло становление новой науки — науки об информационных технологиях — ИТ-науки, или итологии. Предмет итологии — процессы, связанные с созданием и применением информационных технологий. Уровень развития наукоемких технологий, в частности информационных технологий, нанотехнологий, наряду с достаточностью энергетических ресурсов становится одним из основных факторов, определяющих опережающее развитие страны. В определенном смысле это же относится и к отдельным предприятиям, для обеспечения конкурентоспособности они должны обладать достаточными интеллектуальными, производственными и другими ресурсами, а также постоянно совершенствовать используемые ИТ и ИС.

Ежегодно появляется много новых программных продуктов и новых версий уже существующих. Информационные технологии настолько быстро развиваются, что специалисту в области ИТ трудно отслеживать весь спектр методов, программных и технических средств ИС, которые применяются на различных этапах жизненного цикла электронной продукции. К сожалению, на отечественных предприятиях электронного профиля пока известно мало примеров функционирования корпоративных информа-

ционных систем, удовлетворяющих критериям CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support — непрерывный сбор данных и поддержка изделий в течение жизненного цикла). Применение CALS-технологий, иногда называемых системами компьютерного сопровождения и поддержки изделий (КСПИ) или системами информационной поддержки изделий (ИПИ), позволяет предприятиям минимизировать затраты на всех этапах ЖЦ изделий, повышать их качество, а следовательно, и конкурентоспособность, быть активными участниками рынка радиоэлектронных средств.

Цель настоящего учебного пособия — рассмотреть основные положения по использованию информационных технологий на этапе автоматизированного проектирования и технологии производства РЭС, а также на других этапах жизненного цикла продукции предприятий электронного профиля. Учитывая современное состояние электронной промышленности и непрерывное развитие информационных технологий, методологические аспекты ИТ рассматриваются с позиции CALS-технологий и реинжиниринга бизнес-процессов.

На современном предприятии электронного профиля сфера применения ИТ исключительно широка и не ограничивается решением только задач, связанных с радиоэлектроникой (схемотехнических, конструкторских, технологии изготовления микросхем и печатных плат и т.д.), приходится рассматривать вопросы планирования, логистики, испытаний, управления запасами, рисками и др. Для комплексного решения всех задач необходимо создание интегрированной информационной среды, обеспечивающей оперативный (в реальном времени) обмен электронными данными между заказчиком, производителями и потребителями наукоемкой продукции. Анализ существующих тенденций развития предприятий показывает, что успеха в основном достигают те, которые переходят от «бережливого» производства к «активному», последнее характеризуется способностью успешно функционировать в плохо предсказуемых, быстро изменяющихся условиях.

Учебное пособие состоит из шести глав, относящихся к различным разделам программы новой дисциплины «Информационные технологии проектирования РЭС», предусмотренной стандартом специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Пособие может быть использовано также для обучения студентов по направлению 210200 «Проектирование и технология электронных средств».

В первой главе кратко излагаются общие положения об информационных технологиях, приводятся основные определения, опи-

сания структуры информационных систем, их классификация и свойства.

Основную часть пособия занимают главы, связанные с информационными технологиями для автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства РЭС (главы 2—5). Это вызвано тем, что задачи проектирования РЭС являются более сложными по сравнению с задачами, решаемыми на других этапах жизненного цикла изделий. Кроме того, от эффективности принимаемых проектных решений в основном зависят качество и конкурентоспособность выпускаемой продукции. Поэтому системам автоматизированного проектирования (САПР) в учебном пособии уделяется особое внимание. Характеристика РЭС как объектов автоматизированного проектирования, этапы, процессы и принципы их проектирования рассматриваются во второй главе. Третья глава посвящена краткому описанию элементов САПР. В четвертой главе приводятся математические модели, используемые при проектировании РЭС. Методы и алгоритмы решения задач проектирования рассматриваются в пятой главе. Вопросы, связанные с применением экспертных систем, систем поддержки принятия решения, CALS-технологий, созданием корпоративных информационных систем, рассматриваются в шестой главе.

В конце пособия приводится список часто употребляемых аббревиатур.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: доценту Г. Ф. Баканову, профессору В. И. Павлову, профессору Ю. И. Кудинову и редактору — профессору Ю. Н. Чернышову за полезные советы, замечания и предложения, а также М. К. Веляевой за помощь в подготовке рукописи. Мы будем благодарны всем, кто пришлет замечания и пожелания по содержанию и изложению материала в настоящем учебном пособии.

ГЛАВА 1

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Информация в обществе приобретает все большее значение, она стоит в одном ряду с такими фундаментальными понятиями, как вещество и энергия. Активно используемая обществом информация рассматривается как важный ресурс наряду с интеллектуальными, энергетическими и материальными ресурсами. Применение информационных технологий открывает новые возможности повышения эффективности производственных процессов. Информационные технологии обеспечивают групповое ведение проектных работ, например, по созданию новых радиоэлектронных средств (РЭС), выводят на новый уровень автоматизацию технологических процессов и управленческий труд.

1.1. Роль информационных технологий в современном обществе

Наступившая эра информатизации наглядно проявляется в том, что информация и информационные ресурсы на мировом рынке становятся важнейшим продуктом. Фирмы и страны, разрабатывающие информационные технологии, занимают ведущие позиции в мировой экономике, определяют дальнейшие направления развития конкурентоспособной продукции. Информатизация общества ведет к интернационализации производства.

Страны, создающие у себя и передающие для производства другим странам наукоемкие изделия, которые основаны на новых технологиях и современных профессиональных знаниях, имеют неоспоримые преимущества на мировом рынке. Идет торговля виртуальным продуктом — знаниями, происходит «навязывание» высокоразвитыми странами культуры и стереотипа поведения. Информация, знания, технологии в информационном обществе становятся стратегическими ресурсами.

Для развития и процветания талантливых инженеров и ученых необходимо создавать соответствующие условия и среду. Компьютерные технологии здесь оказывают огромное влияние посред-

ством дистанционного доступа к хранилищам данных, средств мультимедиа и других информационных возможностей.

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, в США около 80 % нововведений передается дочерним предприятиям в других странах. Пока последние осваивают предложенные технологии, американские фирмы разрабатывают новые, т. е. реализуется опережающий технологический цикл. Лидерство в разработке, производстве и использовании информационных технологий относится к числу важнейших компонентов информационной мощи США.

Информационные технологии играют важную стратегическую роль в развитии каждой страны. Эта роль постоянно возрастает 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 (компьютеризированных) форм искусства, популяризации шедевров мировой культуры, 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;
- позволяют реализовать методы информационного моделирования глобальных процессов, что обеспечивает возможность прогнозирования многих критических ситуаций в регионах с повышенной социальной и политической напряженностью, экологических или техногенных катастроф.

Информационные технологии играют ключевую роль в процессах получения, накопления, распространения новых знаний по трем направлениям. Первое — это информационное моделирова-

ние, ценность которого заключается в возможности проведения «вычислительных экспериментов» для таких условий, которые затруднительны или невозможно создать в реальном эксперименте из-за опасности, сложности или 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.

Исключительно важную роль ИТ оказывают на развитие радиоэлектронных средств, которые лежат в основе всех видов связи, продукции военно-промышленных комплексов, транспорта, обеспечивают поиск новых источников энергии и т. п. Необходимость внедрения ИТ для развития РЭС объясняется требованиями к сокращению сроков проектирования и подготовки производства для выпуска новых и модернизируемых изделий, уменьшению затрат на проектирование и производство, снижению стоимости длительного послепродажного обслуживания. Кроме того, ИТ нужны для реинжиниринга (обновления) предприятий в соответствии с современными требованиями повышения качества и конкурентоспособности изделий, восстановления старых рынков сбыта и выхода на новые рынки.

На различных этапах жизненного цикла РЭС широко применяются следующие ИТ [2, 20, 21, 24].

Во-первых, «электронные» системы автоматизированного проектирования (САПР), обеспечивающие моделирование аналоговых и цифровых устройств, разработку программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), автотрассировку печатных плат, комплексное описание компонентов проектируемых устройств, моделирование электромагнитных трехмерных структур и т. д.

Во-вторых, специализированные ИТ типа SCADA (Supervisor Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных), системы проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), систем моделирования и анализа электронных схем и т. д.

В-третьих, технологии класса MRPII (Manufacturing Resource Planning) и ERP (Enterprise Resource Planning), обеспечивающие

решение широкого спектра задач планирования ресурсов предприятий. В последние годы, характеризующиеся ожесточением конкуренции, интенсивно развиваются системы CRM (Customer Relationship Management) как набор специальных приложений или в виде надстройки над ERP. В CRM-системах акцент делается на взаимоотношении компания — клиент, и в частности на удержание старых клиентов за счет учета их индивидуальных потребностей и особенностей. Расширяется применение языка XML (eXtensible Markup Language) и соответствующей технологии электронного документооборота, в том числе обмена данными между системами разных производителей и документами между предприятиями, сбора отчетности государственными организациями, поставки данных интернет-клиентами и др.

Наряду с очевидными благами неквалифицированный подход к использованию ИТ таит определенные опасности: меньше времени уделяется изучению непосредственно применяемых математических методов, физическому смыслу моделируемых явлений и другим теоретическим аспектам; облегчаются реклама некачественной продукции, проведение «черных» пиаровских акций и т. п.; повышается опасность разглашения конфиденциальной информации, появляются новые виды преступлений; возможны значительные материальные издержки при неудачном ИТ-проекте, так, риски при внедрении крупных программных систем в настоящее время достигают 70 %.

Зарождению ИТ предшествовали такие «информационные» революции в области передачи, обработки и хранения информации при развитии человеческого общества, как появление письменности, книгопечатания, радио, телевидения и ЭВМ. Большое влияние на становление ИТ оказало совершенствование вычислительных методов математики, систем связи, кибернетики и информатики. В современном виде ИТ начали создаваться одновременно с широким использованием ЭВМ. Этому способствовали следующие обстоятельства: бурный рост производства и относительное удешевление персональных компьютеров, конкурентная борьба фирм за выживание и получение прибыли, необходимость рассмотрения сложных многоальтернативных задач принятия решений, в том числе в условиях неопределенности.

Развитие ИТ можно рассматривать с позиции совершенствования технических средств и создания прикладных программных продуктов, ориентируемых на решение определенных классов задач. Перечислим важнейшие этапы развития современных ИТ, обусловленные совершенствованием технических средств.

Период с конца 1950-х до начала 1960-х годов характеризуется появлением и применением для решения отдельных расчетных задач (главным образом инженерных) ЭВМ первого и второго поколений.

С 1960-х до начала 1970-х годов значительно расширяются возможности ЭВМ, создаются ИТ в виде вычислительных систем сбора и обработки данных.

В начале 1970-х годов на базе ЭВМ третьего поколения появились автоматизированные системы управления (АСУ) деятельностью предприятия, т. е. ИТ стали выполнять функции централизованной автоматизированной обработки информации в условиях вычислительных центров коллективного пользования.

В конце 1970-х годов стали распространяться персональные компьютеры (ПК), открывшие широкий доступ для автоматизации многих процессов человеческой деятельности, к созданию ИТ с диалоговым режимом работы.

Начиная с 1980-х годов развивается тенденция децентрализованной обработки данных, решения задач в многопользовательском режиме, получило широкое развитие АСУТП, САПР, отраслевых и общегосударственных АСУ. Появились ИТ, использующие удаленный доступ к массивам данных с одновременной универсализацией способов обработки информации на базе мощных супер-ЭВМ, ИТ стали применяться для испытания сложных объектов, в экономике и других областях.

Появление сетевого оборудования, включая стремительное развитие Интернета, привело к значительному расширению круга решаемых задач, в том числе к комплексному решению экономических задач, созданию широкого спектра приложений и сетевых информационных структур, развитию интерактивного взаимодействия пользователя при эксплуатации вычислительной техники и реализации интеллектуального человеко-машинного интерфейса, созданию систем поддержки принятия решений и информационно-справочных систем. Стало быстро развиваться направление сетевых ИТ, в том числе электронная почта, Web-технологии и др.

Дальнейшее совершенствование компьютерной техники привело к появлению новых направлений: беспроводных технологий (Bluetooth, Wi-Fi, WiMax), встроенных телекоммуникационных систем (Embedded-System, Mini-Web-Server), GRID-технологии (информационные базы данных глобальных ресурсов), интеллектуальных информационных систем и др.

Этапы развития ИТ как прикладных программных продуктов соответствовали возрастающим возможностям вычислитель-

ной техники и росту массовости их применения. На первом этапе в большинстве случаев программы разрабатывались отдельно для каждой задачи. Затем начали создавать библиотеки подпрограмм для каждого класса ЭВМ. Эти подпрограммы в основном решали наиболее часто встречающиеся математические задачи, например поиск решения систем уравнений, определение экстремума, обработка экспериментальных данных и т. д.

Второй этап характеризовался созданием сложных программных продуктов — различных автоматизированных систем управления (АСУ) предприятиями (АСУП), технологическими процессами (АСУТП), автоматизированных систем научных исследований (АСНИ), САПР и т. п. Эти программные средства разрабатывались в основном для конкретных предприятий, были малоуниверсальными и устаревали при смене поколения ЭВМ.

С появлением персональных компьютеров на третьем этапе началось интенсивное создание пакетов прикладных программ (ППП) как общего пользования, так и специализированных. Именно в это время стали широко использоваться системы CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing / Computer Aided Engineering — автоматизированные системы проектирования, технологической подготовки и управления производственными процессами), отвечающие международным стандартам. Особенностью третьего этапа было то, что специализированное программное обеспечение разрабатывалось для отдельных процессов жизненного цикла продукта, в частности для его проектирования, технологии производства и т. п.

На четвертом этапе стали создаваться программные комплексы, охватывающие весь жизненный цикл продукта от планирования до утилизации. Это системы типа MRPII, ERP, CRM и др. Дальнейшее развитие прикладных программных средств идет в направлении их использования в сетевых технологиях, совместного применения программ, созданных на различных языках высокого уровня, обеспечения требуемого уровня защиты информации.

В последние годы создание новых версий ППП, например MatLAB, MatCAD, Maple, идет такими высокими темпами, что к моменту опубликования соответствующей справочной информации уже появляются сведения о новых программных продуктах.

Программное обеспечение современных ИТ обычно создается как система-конструктор (или трансформер). Такие системы обеспечивают возможность решения специфических для пользователя задач, учитывать их узкоспециализированность и уникальность. Они дают возможность непрерывного внесения изменений в систе-

му (доработка, настройка на специфические и уникальные задачи управления и т. п.) собственными силами потребителей для адаптации системы к специфическим и уникальным задачам управления. Все это позволяет увеличить жизненный цикл программного продукта до десятков лет. Примерами таких систем являются Oracle Applications, SAP R/3 и др.

В настоящее время развитие ИТ отражает эволюционные изменения в производственных отношениях, которые характеризуются следующими проявлениями. Во-первых, наблюдается тенденция стирания границ между организациями, регионами и даже между странами. Во-вторых, происходит гуманизация производства*, переход от авторитарного стиля руководства к командной работе, стремлению к лидерству, вовлечению всех сотрудников в решение задач организации. В-третьих, структуры организаций становятся более гибкими, возрастает роль горизонтальных связей, широко используются управление проектами, создание виртуальных предприятий**, стратегическое партнерство.

В этих условиях новое поколение ИТ должно обеспечивать высокую конкурентоспособность, быструю адаптацию предприятий к постоянным переменам, «симбиоз» реинжиниринга и гуманизации бизнеса, соответствие уровню организации и ее традициям, сбалансированность системы технико-экономических показателей, решение задач управления знаниями, изменениями и др. Развитие ИТ привело к появлению таких новых видов деятельности, как консалтинг, аутсорсинг, системная интеграция и ситуационное управление, дистрибуция, электронный бизнес, защита информации, дистанционное обучение и т. д.

1.2. Основные определения

Ежегодно терминология в области ИТ пополняется новыми понятиями, аббревиатурами и специальными терминами, поэтому в настоящем разделе приводятся определения общего характера. Термин «технология» произошел от греческих слов *techē* + *logos*,

Гуманизация производства — создание условий на производстве, максимально учитывающих биосоциальную сущность человека, способствующих его всестороннему развитию и вызывающих удовлетворенность трудом. — *Прим. ред.*

Виртуальное предприятие — предприятие, состоящее из географически разделенных работников, которые взаимодействуют, используя электронные средства коммуникаций при минимальном или полностью отсутствующем личном, непосредственном контакте. — *Прим. ред.*

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 ситуаций. Если реализация технологии направлена на выработку управляющих воздействий, то это технология управления. В узком смысле технология управления — это набор способов, средств выбора и осуществления управляющего процесса из множества возможных реализаций этого процесса.

В современную терминологию прочно вошли термины «бумажная технология», «интерактивная технология», «технология программирования», «технология проектирования баз данных», «CASE-технология», «CALS-технология», «сетевая технология», «интернет-технология», «технология анализа и реинжиниринга бизнес-процессов», «технология быстрого проектирования» и др. Все они предполагают использование информации, т. е. любого вида сведений о предметах, фактах, понятиях предметной области.

Современная технология должна отвечать ряду требований, основными из них являются расчлененность 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, следовательно, их стандартизацию и унификацию и др.

Под *процессом* (от лат. *processus* — продвижение) в итологии понимается функционально законченная, планируемая последовательность типовых операций над 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 к информации с целью ее преобразования.

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

При рассмотрении ИС необходимо учитывать природу и содержание используемой информации. Согласно теории сигналов (К. Шеннон) понятие информации не затрагивает ее содержания, а рассматривается только сигнальное представление информации в

процессе передачи. Информация, представленная сигналами, неотделима от акта передачи, т. е. она связана с некоторым процессом. Кибернетический подход (Н. Винер) предполагает познавательный характер информации и ориентирован на смысл передаваемого информационного сообщения.

В соответствии с существующими определениями *информаций* называются сведения, сообщения или данные независимо от способа их поиска, хранения, обработки, предоставления или распространения. Основная роль в этом определении принадлежит форме представления информации, так как содержание сведений — вещь субъективная, зависящая от способа интерпретации данных.

В свете современных представлений информация рассматривается как новое или измененное знание, в частности, у пользователя ИС. Информация воспринимается человеком для решения стоящих перед ним задач на основе интерпретации или обобщения наборов данных (в виде таблиц, графиков, схем и т. д.). Всегда существует риск, что получаемая информация в виде измененного персонального знания не является верной. Последствия негативных событий вследствие принимаемых решений на основе ошибочной информации могут приносить значительный ущерб. Таким образом, информация в отличие от данных зависит не от носителя, а от способа обработки. Информация всегда хранится в закодированном виде, а закодированные данные получают смысловую нагрузку только в моменты их интерпретаций.

Информатизация может рассматриваться 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. С точки зрения государства основная цель информатизации — обеспечение решения актуальных внутренних проблем страны, и прежде всего удовлетворение спроса на информационные продукты и услуги.

Термин «информационные технологии» получил широкое распространение в последние годы и в настоящее время носит чрезвычайно емкий смысл, часто как синоним ему используются термины «компьютерные технологии», «автоматизированные информационные технологии» и др. Единого установившегося определения термина «информационная технология» нет, наиболее часто используют следующие.

Информационная технология, или технология обработки информации, есть совокупность методов, производственных процес-

сов и программно-технических средств, объединенных в технологическую цепочку, обеспечивающую сбор, хранение, обработку, вывод и распространение информации для снижения трудоемкости процессов использования информационного ресурса, повышения их надежности и оперативности. Информационные технологии позволяют применять информацию во всех аспектах нашей жизни, включая промышленность, науку, офисы, быт и т.д. Информационная технология объединяет систему научных и инженерных знаний, методы и средства, которые используются для создания, сбора, передачи, хранения и обработки информации в соответствующей предметной области.

Кратко можно сказать, что информационные технологии — это результат сочетания компьютерной техники, методов и средств для целевого приема, преобразования, передачи и воспроизведения информации. Информационная технология предполагает умение грамотно работать с информацией и вычислительной техникой. Например, CASE-технология — это технология машинного (автоматизированного) проектирования сложных программных средств с заданными качеством и надежностью.

Под автоматизированной информационной технологией понимается ИТ, в которой для передачи, сбора, хранения и обработки данных используются методы и средства вычислительной техники и систем связи. Например, автоматизированная информационная технология управления представляет собой систему сбора, накопления, хранения, поиска, обработки и защиты управленческой информации на основе применения развитого программного обеспечения, средств вычислительной техники и связи, а также способов, с помощью которых эта информация представляется пользователю, чаще всего лицу, принимающему решения, для управления бизнес-процессами.

К основным свойствам ИТ относятся следующие: предметом процесса обработки являются данные; цель процесса — получение информации; средствами осуществления процесса являются аппаратные, программные и программно-аппаратные комплексы; процессы обработки данных разделяются на операции в соответствии с конкретной предметной областью; выбор управляющих воздействий на процесс осуществляется лицами, принимающими решения (ЛПР); критерий оптимизации процесса включает своевременность доставки информации (пользователю), ее надежность, достоверность, доступность и полноту.

Новые информационные технологии обычно рассматриваются как технологии на основе искусственного интеллекта, определяю-

щие характер человеческой деятельности в новом информационном обществе, которое приходит на смену индустриальному обществу [26]. Новые ИТ базируются на применении компьютеров, активном участии пользователей (непрофессионалов в области программирования и аппаратных средств) в информационном процессе, высоком уровне дружественного пользовательского интерфейса, широком применении пакетов прикладных программ общего и проблемного направления, использовании режима реального времени и доступа пользователя к удаленным базам данных и программам благодаря сетевым технологиям.

Часто термин «новые ИТ» предполагает использование распределенных баз данных, экспертных систем, телекоммуникационных сетей, беспроводной связи, высокопроизводительных ЭВМ, средств поддержки принятий решений и моделирования.

В последние годы иногда используется термин «новейшие информационные технологии», под которыми обычно понимаются продукты интеграции различных информационных технологий, в результате обеспечиваются различные информационные и вычислительные потребности пользователя, поддерживается единый способ взаимодействия пользователя с компьютерами и единый способ представления данных. Свойства интегрированной ИТ в значительной степени зависят от свойств образующих ее частных технологий, но не определяются ими полностью. Примером интегрированной ИТ, обеспечивающей тесную согласованную работу на основе информационного взаимодействия всех организаций, которые участвуют в разработке, производстве, реализации, эксплуатации и утилизации, т. е. на всех этапах ЖЦ сложных наукоемких изделий, является CALS-технология. Эту технологию следует рассматривать как технологию комплексной компьютеризации сфер промышленного производства за счет унификации и стандартизации промышленной продукции на всех этапах ее ЖЦ [20].

Значительная часть ИТ реализуется в виде информационных систем, предназначенных для хранения, поиска и выдачи информации по запросам пользователей. Информационная система представляет собой взаимосвязанную совокупность средств, методов и персонала, используемых при вводе, хранении, обработке и выдаче информации для принятия управленческих, проектных и других решений в интересах достижения поставленной цели.

Последовательность или совокупность действий, связанных с вводом, обработкой, хранением и выводом информации в виде данных, сведений, фактов, гипотез, идей, называют *информационным процессом*.

Автоматизированной информационной системой (АИС) называется организационно-техническая система, использующая автоматизированные информационные технологии в целях информационно-аналитического обеспечения научно-инженерных работ и производственных процессов, в общем случае это комплекс программно-аппаратных средств и информационных массивов, предназначенных для сбора, хранения, поиска, переработки и выдачи информации потребителям по их запросам.

В настоящее время широкое распространение получают корпоративные информационные системы, которые обеспечивают автоматизацию бизнес-процессов предприятий, в том числе виртуальных, и объединяют все организации, участвующие в создании, производстве и сбыте продукции. Говоря о корпоративной системе, надо отметить целевое программно-аппаратное обеспечение (управление, проектирование, принятие решений, информационно-поисковые системы и пр.), главные особенности которого — распределенность, сетевая платформа и обеспечение защиты информации.

В результате развития ИС в направлении автоматизации процессов подготовки информации для формирования множества альтернативных вариантов решения, анализа этих вариантов и выработки наиболее целесообразного решения широкое распространение получают *интеллектуальные информационные системы* (ИИС). Это особые ИС, которые используют наукоемкие технологии с высоким уровнем автоматизации не только процессов подготовки информации для принятия решений, но и процессов выработки вариантов решений, опирающихся на полученные системой данные [7, 27, 28].

Интеллектуальные информационные системы при наличии мотивации на основе сведений и знаний во взаимосвязи с персоналом или автономно могут синтезировать цель, вырабатывать решение о действии и находить рациональные способы достижения цели. Такие системы широко используются для решения следующих задач: диагностика состояния предприятия; оказание помощи в антикризисном управлении; выбор оптимальных решений по стратегии развития предприятия и его инвестиционной деятельности; поддержка процессов анализа, оценки и принятия решений; оценка и управление рисками; оказание помощи при решении задач планирования и др.

Для ситуационного анализа и подготовки принятия управленческих решений в крупных организациях создаются комплексы информационно-аналитических средств подготовки и принятия управленческих решений (КИАСПУР). Методологическую основу

КИАСПУР составляют системный анализ и научно обоснованные процедуры подготовки и принятия единоличных, групповых, коллективных и кооперативных решений. Использование интегрированных интеллектуальных ИТ типа КИАСПУР обеспечивает:

- сокращение времени сбора и обработки информации аналитиками, экспертами и ЛПР;
- достижение большей достоверности информации, многомерности и смысловой глубины первичной проработки альтернативных вариантов развития предприятия;
- высвобождение времени, затрачиваемого на подготовку априорных экспертных оценок по многочисленным классам источников;
- возможность взаимодействия коллектива специалистов в моно- и сетевом режимах;
- достижение высокой степени обоснованности оценок и рейтингов альтернативных вариантов решения;
- сведение к минимуму грубых ошибок и возможности принятия неперспективных вариантов действия.

В условиях глобализации, когда стирается грань между внутренним и внешним рынками, большое значение приобретают информационные системы интегрированной логистической поддержки. *Логистика* представляет собой самостоятельную область экономической науки, рассматривающую проблемы рациональности и точности расчета перемещения материальных и информационных потоков во времени и в пространстве.

В состав современных радиоэлектронных комплексов в качестве важных элементов входят информационно-измерительные системы (ИИС) и информационно-управляющие системы (ИУС), обеспечивающие решение задач обнаружения целей, их сопровождения, наведения на цель и др.

Предметная область информационных технологий состоит из множества информационных моделей, включающих концептуальные, логические, математические, информационные, алгоритмические модели, и программ для ЭВМ. *Концептуальная модель* дает интегрированное представление о предметной области, она имеет слабоформализованный вербальный характер обычно в виде словесного описания о рассматриваемых проблемах и задачах. С точки зрения процессов накопления, хранения и вывода данных концептуальную модель, описывающую предметную область без ориентации на используемые компоненты ИТ и ИС, иногда называют *инфологической*. *Логическая модель* описывает структуру, функциональные связи и другие конкретные сведения, она являет-

ся промежуточной между концептуальной и математической моделями. *Математическая модель* представляет собой формализованное описание исследуемой части предметной области на языке математики. Для решения конкретных задач с применением математических моделей на основе математических методов строится *алгоритмическая модель*, которая задает строгую последовательность действий. Реальные объекты в ИТ и ИС представляются информационными моделями в виде совокупности данных и отношений между ними, описывающей различные свойства объекта, которые интересуют разработчиков и пользователей. Непосредственно численные расчеты выполняют с помощью программ для ЭВМ, которые разрабатываются в соответствии с алгоритмической моделью.

Рассматривая ИТ и ИС с позиции системного подхода, можно выделить как ряд общих моментов, так и существенные различия между ними. К общим моментам следует отнести следующее: на входах и выходах этих систем находится информация (данные); операторы, устанавливающие связь между входами и выходами, представляют собой соотношения, описывающие процессы переработки информации; в соответствующей предметной области ИТ и ИС близки по целевому назначению и имеют ряд общих подсистем, в частности математическое и информационное обеспечение; ИТ и ИС являются развивающимися системами.

К различиям ИТ и ИС можно отнести следующее: ИТ носят более общий характер, одна ИТ может быть представлена разными ИС; основными информационными моделями ИТ являются концептуальная, логическая и математическая, основу ИС составляют алгебраические, информационные модели и программы для ЭВМ; сначала разрабатываются ИТ, затем на их основе создаются ИС; эффективность ИТ определяется ее функциональными возможностями, а эффективность ИС — абсолютными и относительными показателями производительности и стоимости программных и аппаратных средств.

Важными особенностями развития ИТ и ИС являются быстрое обновление (каждые 1,5 — 2 года) технических и программных средств; постоянное расширение номенклатуры подсистем; увеличение числа выполняемых функций (решаемых задач); интеллектуализация; повышенные требования к уровню подготовленности пользователей, умению быстро осваивать новые методы и средства.

К главным задачам развития ИТ можно отнести следующие: поиск технологий, которые из цепочки «задача — решение», «тех-

нический замысел — продукт» исключили бы людей, специально занятых преобразованием задач (данных и т. п.) в форму, понятную для ЭВМ, т. е. развитие человеко-машинного интерфейса; обеспечение инфраструктуры для хранения и передачи информации, в том числе речи, изображений, текста; развитие системотехники и программотехники (совершенствование программирования для систем, основанных на использовании знаний). В электронной промышленности важнейшими задачами являются автоматизация проектирования и изготовления сверхбольших интегральных схем (СВИС), программируемых логических ИС (ПЛИС), микроэлектромеханических систем (MEMS); использование достижений нанoeлектроники и других инноваций с целью обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции.

Внедрение и развитие информационных технологий рассматривается как реализация ИТ-проектов. Эту задачу обычно выполняют консалтинговые компании и системные интеграторы. Под *консалтингом* понимается деятельность специалистов, занимающихся стратегическим планированием проекта, анализом и формализацией требований к информационной системе, созданием системного проекта, а в ряде случаев и проектированием приложений. *Системными интеграторами* обычно называют компании (организации), к которым производители обращаются за помощью в проектировании, установке, подключении и вводе в эксплуатацию различных компонентов новых и модернизируемых информационных систем.

С помощью ИТ специалисты могут выполнять совместные действия так же быстро, как выполняет один человек свою часть работы, например, при проектировании новой продукции, при этом добавляется эффект объединенного интеллекта членов группы. Синергизм от внедрения ИТ-проектов проявляется, кроме того, за счет взаимодействия информационных процессов, людей, занятых в них, технологий управления, законов, управляющих отношениями между людьми, фирмами, рынком и государством.

1.3. Состав информационных технологий и систем

Современные информационные технологии обычно реализуются в рамках сложных эргатических систем. В широком смысле в них можно выделить следующие основные элементы [2, 21]:

- человеческий (социальный) компонент, т. е. разработчики, пользователи, обслуживающий персонал; в последние годы

численность сотрудников, разрабатывающих, внедряющих и использующих ИТ, непрерывно растет;

- математическое и алгоритмическое обеспечения, в основном это математические модели, методы и алгоритмы;
- лингвистическое обеспечение, т. е. совокупность используемых языков программирования;
- программное обеспечение, состоящее из системного (общего) и прикладного;
- технические (аппаратные) средства, включающие средства вычислительной, коммуникационной и организационной техники;
- информационное обеспечение, включающее файлы с данными об объектах, базы данных и т. п.;
- организационное, правовое и методическое обеспечения, т. е. инструктивные и нормативно-методические материалы по организации работы управленческого и технического персонала в рамках конкретной информационной технологии.

С позиции системного подхода каждая из перечисленных частей ИС и ИТ, в свою очередь, может рассматриваться как система и состоять из множества элементов (свойство целостности и членности). Так, в группе разработчиков выделяют консультантов, системных аналитиков, программистов, группу лиц, принимающих решения, и т. д.

Часто в качестве компонентов ИС рассматриваются платформа, интерфейс, база данных, база знаний, модели предметной области и др. Платформа определяется аппаратными средствами и операционной системой, на которых можно установить конкретную ИС.

Важную роль в использовании ИТ и ИС играет интерфейс. В общем случае под *интерфейсом* понимается совокупность средств (программных, технических, лингвистических) и правил для обеспечения взаимодействия между различными программными системами, между техническими устройствами или между пользователем и системой, в частности обращения персонала к базам данных и знаний.

База данных (БД) — это организованная в соответствии с определенными правилами совокупность данных, отражающая состояние предметной области и используемая для удовлетворения информационных потребностей пользователей. Распределенная БД размещается в различных узлах компьютерной сети.

База знаний (БЗ) определяется как формализованная система сведений о некоторой предметной области, содержащая данные

о свойствах объектов, закономерностях процессов и явлений и правила использования в задаваемых ситуациях этих данных для принятия новых решений. В БЗ выделяют интенциональную (знания о чем-то «вообще») и экстенциональную (знания о чем-то «конкретно») части. С помощью моделей предметной области в виде совокупности описаний определенной области деятельности обеспечивается взаимопонимание между пользователями, т. е. специалистами предприятия, разработчиками и другим персоналом ИС.

В узком смысле в информационных системах выделяют две основные части: технические и программные средства. *Технические средства* (hardware) обеспечивают прием и передачу трех основных видов информации (речь, текст, графика) в статике и динамике с использованием чувств восприятия человека (слух, зрение). *Программные средства* (software) обеспечивают обработку данных и, как уже отмечалось, состоят из общего и прикладного программного обеспечения (ПО), а также документов, необходимых для эксплуатации этих программ. Общее программное обеспечение включает операционные системы (ОС), системы программирования и средства технического обеспечения, которые предоставляют сервис для эксплуатации компьютера, выявления ошибок при сбоях, восстановления испорченных программ и данных.

Примерами прикладного ПО являются САПровские программы (CAD/CAM/CAE), ПО для управления производственными (технологическими) процессами, бухгалтерские и складские программы, офисные приложения, графические системы, системы управления проектами, ПО для архивирования, системы управления базами данных (СУБД), средства разработки ПО, программы электронной почты, браузеры Интернета и др. Прикладное ПО состоит из отдельных прикладных программ или пакетов, называемых приложениями.

Сетевые ИС и ИТ в качестве компонентов могут использовать сети различных уровней, а также аппаратные средства (сетевые адаптеры, маршрутизаторы, средства телекоммуникаций и т. д.); системное программное обеспечение (ОС, СУБД и т. п.); инструментальное программное обеспечение (алгоритмические языки, системы программирования, языки спецификаций, технология программирования); комплектующие узлов хранения и переработки информации.

В корпоративных информационных системах выделяют две относительно независимые части: компьютерную инфраструктуру организации (корпоративную сеть) и комплекс взаимосвязанных функциональных подсистем, обеспечивающих решение задач ор-

ганизации и достижение ее целей. В свою очередь, корпоративная сеть в качестве составляющих включает следующие инфраструктуры: сетевую, телекоммуникационную, программную, информационную и организационную.

Под архитектурой ИС понимают ее описание на некотором общем уровне, включающее принцип действия, диапазон возможностей, конфигурацию и взаимное соединение основных узлов, пользовательские возможности программирования, средства пользовательского интерфейса, организацию памяти, операции ввода-вывода и управления, подробную структурную (или принципиальную) схему. Например, при описании архитектуры программного продукта класса конструктор (трансформер) указываются ядро, в котором определена принципиальная модель предметной области; базовый набор абстрактных классов и основных методов работы с ними; конфигурация, которая представляет собой реализацию информационной системы, построенной из классов и методов ядра; инструментарий, позволяющий пользователю строить свой собственный вариант конфигурации.

В качестве архитектуры вычислительной сети рассматривается общее описание сети, определяющее основные ее элементы, характер и топологию их взаимодействия на основе совокупности принципов логической, функциональной и физической организации аппаратных и программных средств.

Достаточно детальное представление архитектуры ИС может быть дано при описании процессов (действий) с использованием функциональных и информационных моделей.

Структура ИС есть совокупность входящих в нее объектов и устойчивых связей между ними, которые обеспечивают сохранение основных свойств системы при различных внешних и внутренних изменениях. Структура ИС предполагает наличие трех основных частей: 1) комплекс технических средств (вычислительная техника, средства коммуникации и оргтехника); 2) системы программных средств (системные и прикладные программы); 3) системы организационно-методического обеспечения (нормативные материалы, инструкции и т. п.).

Структура сетевой технологии содержит описание ее топологии, т. е. общей схемы сети, отображающей физическое расположение узлов и соединений между ними с учетом территориальных, административных и организационных факторов, в том числе длины линий связи, мощности узлов и т. п.

Обычно для разработки архитектуры ИС привлекаются консалтинговые фирмы или системные интеграторы. Проектирова-

ние архитектуры включает выбор аппаратных средств, сетевой инфраструктуры, программного обеспечения, необходимого для поддержки усовершенствованных процессов и нового стиля работы. При этом важно учитывать коллективное использование данных, т.е. создание корпоративных хранилищ данных с однократным вводом и многократным их использованием, эффективное управление информационными процессами, стандартизацию форматов данных и способов доступа к ним.

Разрабатываемая архитектура ИС должна учитывать быстрое развитие ИТ, технологий коммуникаций и аппаратных средств, так как примерно за 4—5 лет как минимум трижды меняются аппаратные средства персональных компьютеров и соответствующее программное обеспечение. Поэтому следует обеспечить максимальную гибкость архитектуры, в частности за счет применения концепции открытых систем и стандартных промышленных решений и отказа от излишней индивидуализации. Разработанная архитектура в последующем регулярно анализируется и при необходимости пересматривается, чтобы учесть новые разработки с максимальной эффективностью.

Внедрение ИС, как правило, сопровождается изменением организационной структуры предприятия. Традиционные многоуровневые иерархические структуры заменяются более «плоскими», децентрализованными, имеющими меньше уровней управления. Предприятия с новой структурой быстрее реагируют на изменения, более открыты для нововведений, работа подразделений таких предприятий лучше скоординирована и интегрирована.

1.4. Классификация информационных технологий и систем

Число информационных технологий и систем, разрабатываемых сотнями фирм, в настоящее время исчисляется тысячами. Стоимость ИТ, реализованных в виде программных продуктов, от тысячи до сотен тысяч долларов США. В современной терминологии одни и те же программные средства могут называться и технологиями, и системами. Например, CRM-технология и CRM-система часто используются как синонимы.

Знание классификации ИТ и ИС необходимо для выбора наиболее подходящих средств при решении задач проектирования, производства и эксплуатации продукции. В настоящее время широко используются различные классификационные признаки для ИТ и ИС. Во многих случаях на классификацию накладывается от-

печаток область применения ИС — промышленность, экономика, образование и т.д. Важными классификационными признаками являются масштаб системы, полнота (комплексность, интегрированность), назначение (сфера применения, специализация), способ организации, а также тип информации, пользовательский интерфейс, операционная система и т.д.

По масштабу ИС подразделяются на три группы:

- одиночные, которые обычно реализуются на отдельных компьютерах без использования сети, например локальные СУБД;
- групповые для коллективного использования информации членами одной рабочей группы, например локальные сети;
- корпоративные, ориентированные на крупные компании и реализуемые в виде сложных сетей, обычно с иерархической структурой.

По способу организации в информационных процессах выделяют технологии и системы:

- автоматизирующие, которые сокращают работу человека в процессах передачи, приема и обработки информации;
- объединяющие, которые позволяют исключать посредников, участвующих для связи отдельных частей процесса;
- отслеживающие, обеспечивающие сопровождение выполняемых задач, анализ входных воздействий, выпуск продукции и т.д.;
- деловые, преобразующие неструктурные процессы в обычные действия;
- управления знаниями, предусматривающие сбор и распространение знаний, а также экспертизу для улучшения процесса;
- аналитические, использующие комплексы аналитических методов для обработки информации;
- информационные, обеспечивающие передачу информации на большие расстояния, и др.

По назначению (сфере применения) выделяют следующие группы ИТ и ИС:

- системы принятия решений (экспертные системы, системы оперативной аналитической обработки информации и др.);
- информационно-справочные системы (системы электронной документации, географические ИС, гипертекстовые системы);
- офисные ИС для автоматизации делопроизводства, управления документооборотом и т.п.;
- системы обработки транзакций;
- информационно-измерительные системы;

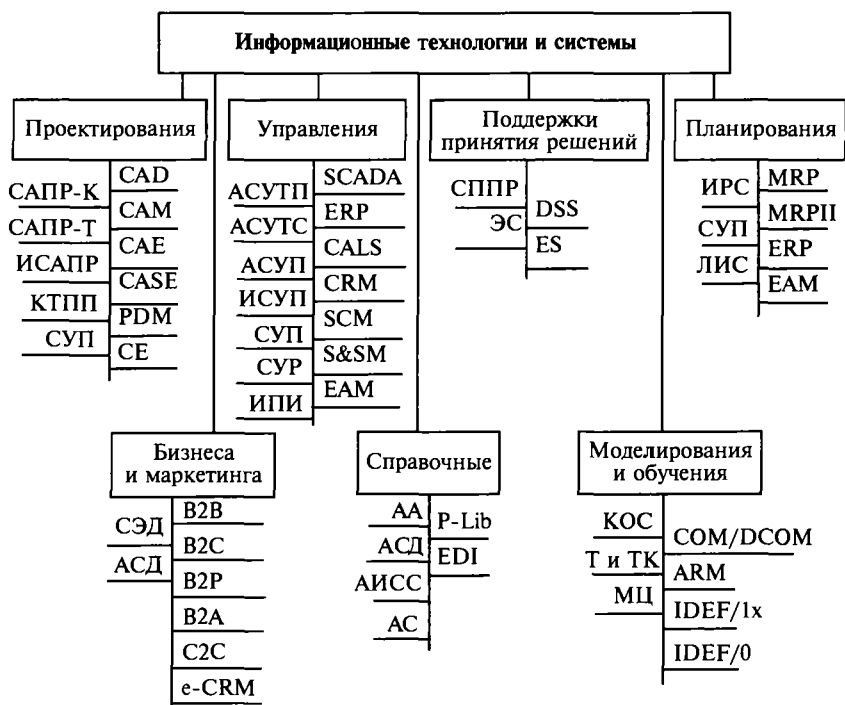


Рис. 1.1. Классификация информационных технологий и систем по видам решаемых задач на предприятиях, выпускающих наукоемкую продукцию

- информационно-управляющие системы и др.

Классификация ИТ, отражающая отношение к основным задачам, которые имеют место при разработке и производстве наукоемкой продукции, представлена на рис. 1.1 [36]. Здесь использованы отечественные (слева) и зарубежные (справа) аббревиатуры автоматизированных систем. Расшифровка аббревиатур приведена в конце книги. Многие ИС охватывают бизнес-процессы нескольких стадий ЖЦ продукции, кроме того, некоторые ИС входят компонентами в сложные интегрированные информационные комплексы. Распределение ИС применительно к стадиям ЖЦ выпускаемой продукции подробно рассмотрено в шестой главе.

В общем случае информационные системы управления обеспечивают автоматизацию всех или большинства задач на предприятиях. Системы поддержки принятия решений (СППР) служат для автоматизации деятельности конкретных должностных лиц при выполнении ими своих обязанностей в процессе управления.

С использованием автоматизированных информационно-вычислительных систем (АИВС) решаются сложные в математическом отношении задачи, требующие переработки больших объемов разнообразной информации. Сбор, хранение, поиск и выдача информации пользователям в требуемом виде выполняются с помощью автоматизированных информационно-справочных систем (АИСС). Автоматизацию подготовки специалистов, разработку учебных курсов, управление процессом обучения и оценку его результатов обеспечивают автоматизированные системы обучения (АСО или АОС).

По полноте охвата решаемых задач выделяют обычные (локальные, частные) ИТ, которые относятся к какому-либо одному этапу жизненного цикла продукта, и интегрированные информационные технологии (системы) [36].

1.5. Свойства автоматизированных информационных технологий и систем

Информационные технологии различных классов обладают разными свойствами, которые вытекают из требований к этим технологиям. Необходимо заметить, что в публикациях рекламного характера сведения о возможностях информационных систем носят субъективный характер и в ряде случаев преувеличены.

При рассмотрении ИТ и ИС с позиций системного подхода в них наглядно проявляются следующие свойства:

- структурность, т. е. между компонентами ИС существуют устойчивые связи, превосходящие по силе связи этих элементов с элементами, не входящими в данную ИС, т. е. внешней средой; для многих ИС сила связи оценивается пропускной способностью информационных каналов, при этом могут учитываться ценность, полезность, достоверность и другие качественные характеристики передаваемой информации;
- коммуникативность и иерархичность, данные свойства характеризуют целостность и делимость (членимость) ИС, целостность интегрированной ИС обеспечивается связями между ее частными технологиями и функционированием подсистемы управления интегрированной ИС, а частные технологии сами могут рассматриваться как целостные объекты;
- эмерджентность (интегративность), т. е. у каждой ИС имеются качества (свойства), присущие технологии в целом, но не свойственные ее компонентам по отдельности — аппаратным средствам, ПО, вместе с тем качественные характеристики кон-

кретной ИС зависят от характеристик ее элементов, между которыми, как правило, существенно нелинейные связи; таким образом, свойство эмерджентности проявляется в том, что ИС способна решать задачи, не свойственные ни одному из ее компонентов.

Каждой ИС свойственна определенная внутренняя организация, это свойство проявляется в том, что энтропия всей ИС как системы меньше суммы энтропий компонентов, из которых можно создать ИС. Современным ИС присущи свойства целесообразности, взаимодействия с внешней средой, развития во времени, наличие компонентов и структуры.

Целесообразность — это главная цель реализации информационной системы, она состоит, например, в повышении эффективности производства на базе использования современных ЭВМ, распределенных баз данных, различных информационных вычислительных сетей путем обеспечения циркуляции и переработки информации. Целью ИТ является создание из информационного ресурса качественного информационного продукта, удовлетворяющего требованиям пользователя, а следовательно, обеспечения конкурентоспособности и устойчивости развития предприятия.

Взаимодействие с внешней средой заключается в том, что современные ИС существуют не изолированно, а имеются информационные связи с внешней средой и другими ИС. Наиболее тесными являются связи ИС с объектами управления, предприятиями-партнерами и системами, а также наукой, промышленностью, программными и техническими средствами автоматизации.

Развитие во времени предполагает обеспечение динамичности развития информационной технологии и ИС, их модификацию, изменение структуры, включение новых компонентов и т. д. Компоненты и структура отражают конкретное содержание процессов циркуляции и переработки информации.

С использованием ИТ система управления предприятиями или корпорациями становится похожей на автоматизированную систему управления техническим объектом, например технологической установкой или транспортным средством.

Применительно к проектированию радиоэлектронных средств использование ИТ обеспечивает следующие возможности пользователям [2].

1. Комплексность решения общей задачи проектирования на всех ее этапах от технического замысла до создания интерактивных электронных технических руководств на готовую продукцию. Это обеспечивает установление тесной связи между частными за-

дачами, возможность интенсивного обмена информацией и взаимодействия как отдельных процедур, так и этапов проектирования. Например, задачи компоновки, размещения и трассировки решаются в тесной взаимосвязи. Это же относится к этапам системотехнического и схмотехнического проектирования.

2. Интерактивный режим проектирования, при котором реализуется непрерывный процесс диалога «человек–машина». Это позволяет в полной мере использовать творческие возможности проектировщика, быстродействие и память компьютерной техники.

3. Широкое использование возможностей имитационного моделирования работы РЭС в различных состояниях функционирования и под действием разного рода возмущений. Это позволяет оперативно оценить качество работы по всем частным показателям, определяющим эффективность РЭС, оптимизировать режимы работы, рассмотреть несколько вариантов проекта и выбрать наилучший.

4. Усложнение программного и информационного обеспечения при проектировании РЭС как в комбинированном (объемном), так и в идеологическом смысле. В последнем случае имеется в виду развитие языков общения пользователя с ЭВМ, банков данных, программ информационного обмена между частями системы, программ проектирования, коррекции работы компьютера, обучения, систематизации и обобщения опыта, усовершенствования стратегий принятия проектных решений.

5. Усложнение технических средств САПР и расширение их функциональных возможностей за счет применения компьютеров высокой производительности, многомашинных комплексов, разветвленной системы периферийных устройств, в том числе для отображения информации, диалога и изготовления документации.

6. Замкнутость процесса проектирования, т. е. автоматизированное с использованием диалогового режима выполнение всех операций от этапа инициации проекта до технического решения и документации для изготовления РЭС и управления технологическими процессами.

7. Принятие обоснованных решений на каждом этапе проектирования для выбора наилучшего варианта из множества альтернативных.

Важное значение имеют также устранение промежутков и прерываний в процессе проектирования РЭС, совершенствование методов анализа информации и процедур принятия решений, координирование процессов, осуществляемых на больших расстояниях.

Процесс внедрения ИТ и ИС характеризуется некоторыми измеримыми параметрами, которые следует учитывать при решении задач проектирования и эксплуатации систем. К таким параметрам относятся капитальные затраты на средства вычислительной и организационной техники, ресурсы на освоение и эксплуатацию системы, сроки проектирования, эксплуатационные расходы, стоимость организации и эксплуатации БД или файлов данных, время доступа к данным, время решения функциональных задач пользователей, экономический эффект от внедрения и др.

Обычно выделяют три группы параметров: исходные (сложность решаемых задач, характеристики аппаратных средств, стоимость ресурсов и т. д.), промежуточные (альтернативные варианты при проектировании, сроки выполнения этапов и т. п.) и результативные (экономический эффект от внедрения, эксплуатационные расходы, срок и стоимость проектирования и т. д.).

Кроме того, при разработке ИС различают нерегулируемые и регулируемые (управляемые) параметры. К нерегулируемым параметрам относят объем входных и выходных данных, сложность алгоритма и объем вычислений, периодичность и регламентность решения задач, степень использования результатов одной задачи в других задачах, параметры используемых технических средств и общесистемного программного обеспечения и т. д. К регулируемым параметрам ИТ можно отнести характеристики разрабатываемых технических средств и программного обеспечения, состав информационного обеспечения, уровень контроля и защиты данных, варианты размещения технических средств, последовательность операций технологического процесса.

При разработке и сравнении альтернативных вариантов программных продуктов ИС используются количественные показатели или критерии. С помощью этих показателей можно сопоставлять достоинства и недостатки различных вариантов, оценивать эффективность их использования и т. д. Обычно при оценке эффективности капитальных вложений E ИС учитываются все составляющие суммарных затрат Z_c , например

$$E = f(Z_p, Z_э, Z_т, E_k).$$

где Z_p — разовые затраты на разработку, отладку, внедрение технологии, приобретение дополнительного оборудования, обучение персонала и т. п.; $Z_э$ — эксплуатационные затраты, связанные с работой по выбранной технологии; $Z_т$ — затраты, связанные с модификацией и адаптацией технологии обработки данных; E_k — коэффициент эффективности.

Важным показателем качества информационных технологий является функциональная полнота F , определяемая как отношение части автоматизированно обрабатываемой информации Q_a ко всей обрабатываемой информации Q_y , необходимой для управления функционированием соответствующим объектом (или процессом):

$$F = Q_a / Q_y.$$

Большую роль играют показатели надежности ИС. Различают частные и комплексные показатели надежности. Частные показатели количественно характеризуют надежность свойства информационного, программного и аппаратного обеспечения. В качестве комплексного показателя может использоваться коэффициент готовности K_r , определяемый по формуле

$$K_r = \frac{T}{T + T_v},$$

где T — среднее время между отказами; T_v — среднее время восстановления.

Использование ИТ при обновлении (реинжиниринге) бизнес-процессов на предприятиях дает возможность полнее реализовать вклад таких составляющих, как:

- автоматизация, т.е. исключение из процесса человеческого труда;
- информатизация за счет сбора и переработки информации о бизнес-процессе для лучшего его понимания;
- очередность этапов процессов и обеспечение их параллельной реализации;
- контроль и диагностика, т.е. постоянное отслеживание состояния объектов и процессов;
- интеграция и координирование выполнения различных заданий и процессов;
- интеллектуализация за счет сбора и распределения интеллектуальных активов.

Кроме того, немаловажное значение имеют гуманитарно-организационные аспекты, в частности повышение культуры всего коллектива, ориентация его на участие в бизнес-процессах, переменах, акцент на внимание к клиентам; повышение квалификации персонала, расширение возможностей карьерного роста, постоянное управление коллективом, решение всех задач как оптимизационных. С использованием ИТ предприятия и корпорации приобретают свойства хорошо управляемых объектов при любых изменениях внешней среды.

1.6. Принципы и методология развития ИТ

Основные принципы ИТ и ИС, используемых в проектировании и производстве РЭС, унаследованы от первых САПР, они носят общесистемный характер и заключаются в следующем.

Принцип включения состоит в том, что требования к создаваемой и развиваемой ИТ определяются со стороны более сложной системы, т. е. интегрированной ИТ.

Принцип системного единства, или интеграции, предусматривает обеспечение целостности интегрированной ИТ за счет связей между ее подсистемами и подсистемой управления.

Принцип информационного единства определяет информационную согласованность отдельных ИТ, т. е. должны использоваться единые термины, символы, обозначения, проблемно-ориентированные языки программирования и способы представления информации, соответствующие нормативным документам. Должно быть предусмотрено размещение в банках данных файлов, которые используются многократно. Полученные массивы при решении одной задачи без перекомпоновок и переработок должны использоваться как исходная информация для других задач. В соответствии с данным принципом создается единое информационное пространство. Для этого решаются следующие задачи: классификация всех типов информации — конструкторско-технологической, производственной и т. д.; выбор стандартов для представления в электронном виде каждого типа информации; выбор, апробация и внедрение набора программно-технических решений; разработка и внедрение корпоративных стандартов; при необходимости создание на основе Интернета защищенной корпоративной сети.

Принцип комплексности требует связности автоматизированного выполнения работ для отдельных частей и всего объекта в целом на всех этапах жизненного цикла.

Принцип совместимости заключается в том, что языки, коды, информационные и технические характеристики структурных связей между компонентами ИТ должны быть согласованы так, чтобы обеспечивалось совместное функционирование всех подсистем и сохранялась открытая структура интегрированной ИТ в целом. Введение новых технических или программных средств не должно приводить к каким-либо изменениям существующих. Данный принцип означает возможность взаимодействия ИТ с другими программными продуктами и системами, в том числе встраивания в ИТ уже существующих приложений или интегрирование ИТ с другой технологией, имеющей открытый интерфейс. Открытость

ИТ предполагает возможность ее дальнейшего расширения, а также расширение и модификацию ее компонентов.

Принцип инвариантности состоит в том, что компоненты ИТ в большинстве своем должны быть по возможности универсальными и типовыми, т. е. инвариантными к разрабатываемым объектам и отраслевой специфике.

Принцип развития требует, чтобы в ИТ предусматривалось наращивание и совершенствование программных модулей и аппаратных компонентов, а также связей между ними. При модернизации ИТ допускается частичная замена отдельных компонентов.

Принцип анализа и синтеза объектов на множестве состояний функционирования означает необходимость учета возможных ситуаций, которые могут иметь место при производстве, поставках и эксплуатации продукции.

Принцип безопасности прежде всего предполагает обеспечение контроля доступа и надежной работы. Пользователям определяются различные права доступа к разным объектам ИС в соответствии с их функциональными обязанностями. Информация о правах доступа, работе с объектами дублируется в памяти ЭВМ, все действия пользователей протоколируются в специальном журнале. Это обеспечивает надежность хранения информации, защиту от сбоев, возможность определения сотрудника службы управления ИС, виновного в нарушении нормального функционирования.

Для успешного внедрения ИТ немаловажное значение имеют *принцип модульности* и требование стандартизации. В соответствии с принципом модульности внедрение ИТ осуществляется постепенно, т. е. программные модули разрабатываются или модернизируются и подключаются к интегрированной ИТ один за другим. При этом все модули и потоки информации описываются одними и теми же терминами в рамках единой модели. Под стандартизацией обычно понимается создание четко описанных интерфейсов, позволяющих совместно работать с различными модулями, в том числе выполненными на разных платформах. Разработка модулей ИТ должна выполняться с учетом существующих стандартов ISO (International Standard Organization), требований CALS и др. [20]. Это позволит легко адаптировать любую информацию для достижения поставленных целей.

При разработке ИТ и ИС различных классов на передний план по важности могут выходить разные принципы. Например, при построении ИС масштаба предприятия основное внимание уделяют таким принципам, как интеграция, модульность, открытость, стандартизация и безопасность. Принцип интеграции обеспечивает сов-

местимость объединяемых частных технологий в единую систему с современным пользовательским интерфейсом.

Заложенные при проектировании информационных технологий принципы определяют их особенности. Например, для ИТ, построенной на принципах ERP, такой особенностью является направленность на планирование ресурсов производства. Для CRM-систем (управление взаимоотношениями с заказчиками) важным принципом является использование клиентоориентированного подхода, который заключается в умении сформулировать правильное коммерческое предложение, предложить его нужному клиенту, использовать соответствующий канал доставки, доставить продукт в нужный момент.

Знание основных принципов создания ИТ нужно для оценки соответствия технологий современному уровню при выполнении ИТ-проектов. Не последнюю роль в этом играет то, насколько разрабатываемые ИТ учитывают национальные особенности российских предприятий, в том числе уровень подготовленности сотрудников, менталитет руководителей и т. д.

Методология создания и развития ИТ определяет круг используемых методов и методик выполнения необходимых действий, а также инструментальных средств поддержки. Важными компонентами методологии с позиции CALS-систем являются технологии анализа и реинжиниринга бизнес-процессов. Они представляют собой инструменты для решения задач реформирования и усовершенствования бизнес-процессов на основе методов системного анализа, создания новых и интеграции существующих информационных технологий для всех этапов ЖЦ продукта.

Сущность анализа процессов заключается в изучении их характеристик и элементов. Анализу прежде всего подлежат число и характер взаимосвязей между элементами процессов, затраты (материальные, временные, информационные) и их распределение внутри бизнес-процессов, потенциал используемых ресурсов (персонала, оборудования, инфраструктуры), фактическая загрузка используемых ресурсов. В соответствии с данной методологией работы по совершенствованию процессов и созданию ИТ выполняются в следующей последовательности [39].

1. Определение потребностей бизнеса и идентификация объема исследований. На данном этапе исследуются задачи, стоящие перед предприятием, рассматриваются целесообразность оптимизации внутренних процессов, вопросы создания виртуального предприятия. Предприятие изучается с позиции системного анализа, при этом ставится глобальная цель, которая определяется назна-

чением (миссией) предприятия. Например, для промышленного предприятия — это производство продукции определенной номенклатуры, для вуза — выпуск специалистов установленного профиля. Деятельность предприятия отображается движением материальных и информационных потоков.

2. Построение моделей деятельности предприятия. Для моделирования бизнес-процессов обычно строится функциональная модель «как есть» (as-is), которая характеризует положение дел на момент обследования.

3. Анализ действующих процессов, в том числе выявление «узких мест», формирование множества вариантов (предположений) по улучшению бизнес-процессов. Для этого определяются и оцениваются значения показателей, которые характеризуют эффективность работ, выполняемых предприятием, в том числе себестоимость продукции, выполнение договорных обязательств и др.

4. Построение альтернативных функциональных моделей «как должно быть» (to-be) и выбор из них наиболее целесообразной модели, которая отражает перспективные предложения консультантов, системных аналитиков, руководства и сотрудников предприятия по совершенствованию его деятельности.

5. Определение состава необходимых реформ и принятие соответствующих решений. Наиболее часто реформирование предполагает оптимизацию бизнес-процессов и автоматизацию трудоемких операций. Для этого выполняется структуризация предприятия, т. е. локализация его границ и выделение частей, например, по штатному расписанию. В системном анализе выделяют два основных аспекта сложности системы: структурную и динамическую. Структурная сложность предполагает многообразие компонентов, их вертикальную и горизонтальную связанность, взаимодействие между различными компонентами системы. Динамическая сложность характеризует траекторию изменяющейся системы или развивающегося процесса.

6. Планирование проведения реформ, для промышленных предприятий особое внимание уделяется сокращению времени от момента поступления заказа на продукт до момента его изготовления (lead time) и повышению качества продукта [9].

7. Реализация намеченных планов, в том числе своевременное внедрение и документирование проводимых работ.

На начальных этапах обычно применяется метод нисходящего проектирования, использующий иерархический подход к построению функциональной структуры ИТ. Метод заключается в следующем. На первом (верхнем) уровне иерархии формулируется

глобальная цель, которая должна быть достигнута в результате внедрения ИТ. На втором уровне определяются задачи и функции, обеспечивающие выполнение главной цели. На третьем уровне определяются функции, обеспечивающие выполнение задач второго уровня, и т. д.

В настоящее время широко используются частные методологии, относящиеся к созданию отдельных компонентов ИТ, и прежде всего программных средств. Для разработки и развития программных систем широко используются методологии OSA, RAD, OMT, SA/SD, JSD, DATARUN и др. Каждая из этих методологий имеет свою специфику. Например, методология OSA (Object-Oriented System Analysis) обеспечивает объектно-ориентированный анализ программных систем, но не содержит возможностей для поддержки этапа разработки, методология RAD ориентирована на быструю разработку приложений.

Широкое применение находит концепция модульного программирования, в соответствии с которой вся программа разбивается на группы модулей, каждый модуль характеризуется своей структурой, четкими функциями и интерфейсом связи с внешней средой. Модульное программирование базируется на следующих предположениях:

- модули должны иметь небольшой объем (до 200 строк исходного текста) и определять доступные модулю данные и операции их обработки;
- каждый модуль включает спецификацию, определяющую правила его использования, и тело — методы его реализации;
- рекомендуется использовать межмодульные связи древовидного типа, предпочтительна организация, при которой модуль на j -м уровне дерева получает информацию от модуля $(j - 1)$ -го уровня и передает информацию модулю $(j - 1)$ -го уровня;
- организация модулей должна обеспечивать независимость их разработки, программирования и отладки, это позволяет проектировать и разрабатывать модули разными проектировщиками и программистами.

Различные методологии сопоставляются по их аналитическим возможностям относительно объектов, связей, агрегации действий и т. д. Итология рассматривает различные аспекты методологии развития информационных технологий, при этом широкое применение находят следующие методы [23].

В основе *метода архитектурной спецификации* лежит создание основ научного знания в виде методологического ядра (ме-

тазнаний), представляющего собой целостную систему эталонных моделей важнейших разделов ИТ, осуществляющего структуризацию научного знания в целом.

Метод функциональной спецификации заключается в представлении ИТ в виде спецификаций поведения ИТ-систем, которое может наблюдаться на интерфейсах (границах) этих систем.

Стандартизация спецификаций ИТ и управления их жизненным циклом, осуществляемая специализированными международными организациями. Данный процесс обеспечивает накопление базовых сертифицированных научных знаний, служит основой создания открытых технологий.

Аттестация — проверка соответствия ИТ-систем ИТ-спецификациям, на основе которых эти системы были разработаны.

Профилирование — разработка функциональных профилей ИТ, которая заключается в построении спецификаций комплексных технологий посредством комбинирования базовых и производных от них (представленных в стандартизованном виде) спецификаций с соответствующей параметрической настройкой.

Таксономия — классификация профилей ИТ, обеспечивающая уникальность идентификации в пространстве ИТ, а также отражение взаимосвязей ИТ между собой.

Кроме того, итологией рассматриваются разнообразные методы формализации и алгоритмизации знаний, методы конструирования прикладных информационных технологий (парадигмы, языки программирования, базовые открытые технологии и т. п.).

Внедрение ИТ обычно связано с реформированием предприятий, которое должно носить комплексный характер и затрагивать все основные структуры и методы руководства, корпоративное управление, технологическую и социальную структуру, внешние связи. Реструктуризация предприятия включает совершенствование структуры и функций управления, преодоление отставания в технико-технологических аспектах деятельности, совершенствование финансово-экономической политики с целью повышения эффективности производства, конкурентоспособности продукции и услуг, роста производительности труда, снижения издержек производства, улучшения финансово-экономических результатов деятельности.

Один из основных моментов внедрения ИТ — обеспечение соответствия документов на основе ПО нормативным требованиям бухгалтерских служб, налоговых и других государственных органов. Программное обеспечение должно иметь соответствующие лицензии.

Внедрение ИТ на отечественных предприятиях нередко встречает значительные трудности. В первую очередь к ним относятся психологические факторы и необходимость выполнения большого объема работ по документированию, регламентированию и т. п.; высокая цена программных продуктов, консалтинговых услуг, затрат на реинжиниринг; менталитет персонала, недостаточные знания, опыт и культура в сфере ИТ, необходимость адаптации западных программных продуктов к имеющимся возможностям и существующему законодательству, а также учет актуальности многих других задач предприятия, в том числе соблюдение требований информационной безопасности.

В определенной степени внедрению ИТ мешают экономические трудности и бессистемность автоматизации. Применение ИТ позволяет получить прибыль, если процесс автоматизации доведен до конца. В противном случае складывается мнение, что ИТ приносят только затраты. Иногда причиной того, что результаты внедрения ИТ не оправдывают ожидания, является отсутствие формализованного представления процессов действующего производства, что, в свою очередь, вызывается отсутствием общей методологической основы для единого описания процессов функционирования. К другим факторам относятся следующие:

- у руководства и сотрудников предприятия отсутствует убежденность в необходимости внедрения ИС, недостаточная информированность всего коллектива о проводимых работах по информатизации бизнес-процессов;
- ИТ реализуются лишь в отдельных подразделениях, в команде разработчиков нет представителей всех служб;
- не сформулированы четко цели, преследуемые внедрением ИС, и не конкретизированы показатели, по которым должно оцениваться достижение целей;
- отсутствует оценка рисков, связанных с ошибками и нарушениями сроков внедрения ИС, а также выпуском продуктов, риски должны учитывать возможные потери заказчиков, снижение прибыли вследствие действий конкурентов и т. п.;
- отсутствуют планы действий на случай различных критических ситуаций.

Опыт высокоразвитых стран показывает, что для обеспечения успеха работа по реинжинирингу предприятий, сопровождающаяся внедрением ИТ, должна тщательно готовиться. Предварительно необходимо создать модели бизнес-процессов, затем подготовить персонал, внести изменения в документацию и структуру. Такая последовательность действий соответствует философии развития

бизнеса: «стратегия подчиняет себе процессы, а процессы — структуру». Внедренная ИТ должна обеспечить гибкую стратегию развития предприятия, направленную на достижение перспективных целей и учет постоянно изменяющихся внешних условий.

Контрольные вопросы

1. Что характеризует эру информатизации?
2. В чем заключается стратегическая роль ИТ?
3. Что дает внедрение ИТ для предприятий электронного профиля?
4. Каковы основные этапы развития ИТ?
5. Приведите примеры ИТ применительно к различным этапам жизненного цикла РЭС.
6. Приведите примеры задач, решаемых с использованием ИТ.
7. Чем характерны интегрированные ИТ?
8. Перечислите основные элементы ИТ. Что включает человеческий компонент ИТ? Что понимается под информационным обеспечением?
9. На какие виды подразделяются программные средства?
10. Что входит в состав сетевых ИТ?
11. Что понимается под архитектурой системы?
12. По каким признакам классифицируют ИТ?
13. Приведите примеры классификации ИТ по отдельным признакам.
14. Какие основные системные свойства проявляются в ИТ?
15. Что означает свойство интегративности?
16. Какие возможности предоставляют ИТ при проектировании электронных средств?
17. В чем заключается принцип включения?
18. Что предусматривают принципы системного и информационного единства?
19. Что означает принцип открытости?

Разработка современных РЭС в настоящее время рассматривается как выполнение сложных инновационных проектов. Важными особенностями этих проектов являются высокая степень неопределенности и риска, большие затраты материальных и временных ресурсов, необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов. Основным направлением повышения эффективности разработок является решение задач анализа и синтеза проектируемых РЭС в автоматизированном режиме.

2.1. Задачи проектирования

Проектирование РЭС в большинстве случаев заключается в разработке в течение заданного времени и с минимальными затратами конструкции и технологических процессов производства новых конкурентоспособных электронных средств, которые с требуемой эффективностью выполняют предписанные им функции в допустимых условиях. В процессе проектирования выполняется комплекс исследовательских и расчетно-конструкторских работ, в результате выполнения которых создается документация на разрабатываемое изделие, необходимая для его производства.

По степени новизны создаваемых объектов выделяют следующие задачи проектирования [10].

1. Частичная модернизация существующего объекта (прототипа), обеспечивающая незначительное улучшение функциональных характеристик и показателей качества, например: повышение надежности, точности работы, дальности действия, уменьшение габаритов, энергопотребления и т. д. В зависимости от вида РЭС под незначительным улучшением понимается изменение характеристик от нескольких процентов (например, точности работы) до нескольких десятков процентов.

2. Существенная модернизация прототипа, в результате которой происходит значительное улучшение показателей качества РЭС (от нескольких десятков до сотен процентов, т. е. в несколько

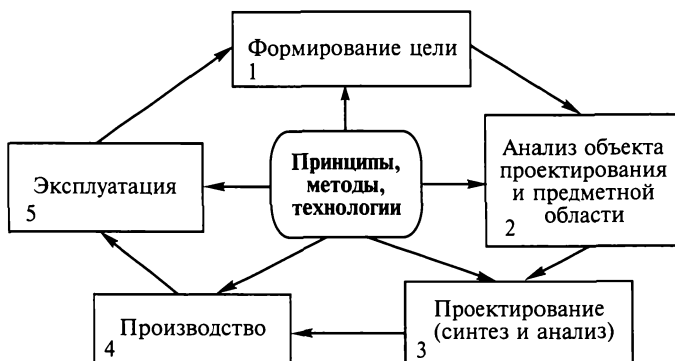


Рис. 2.1. Цикл обновления

раз). Это может достигаться серьезными изменениями конструкции и принципа действия.

3. Создание новых РЭС, использующих новые принципы действия, решающих новые задачи и изготавливаемых по новым технологиям. При сопоставлении с прототипами и аналогами отдельные показатели качества новых РЭС могут увеличиваться на несколько порядков.

Основные пути достижения новизны проектируемых РЭС:

- использование новых физических явлений и принципов действия;
- применение новых материалов, в том числе наноматериалов, более совершенной элементной базы и структуры;
- применение в РЭС современных информационных технологий, методов искусственного интеллекта, средств обеспечения отказоустойчивости и т. п.;
- улучшение производственных процессов на основе прогрессивных и энергосберегающих технологий, автоматизации процессов, внедрения методов контроля качества и др.

В общем случае проектирование следует рассматривать как один из этапов жизненного цикла РЭС. Укрупненно это можно представить в виде замкнутого цикла обновления (рис. 2.1) [22]. Данный цикл содержит пять последовательно повторяющихся этапов:

1) формирование цели; здесь на основе накопленного опыта эксплуатации и проектирования РЭС, требований заказчика, характеристик продукции конкурентов, последних достижений науки и техники формулируются основные цели модернизации или создания новой РЭС;

2) анализ объекта проектирования и предметной области

предусматривает определение (изыскание) общих идей и концепций, которые могут быть использованы для достижения поставленных целей;

3) проектирование, т. е. непосредственное выполнение всех этапов проектных работ (на основе решения задач синтеза и анализа);

4) производство на основе разработанной технологии;

5) эксплуатация в различных условиях, сопровождающаяся сбором сведений о том, насколько достигнуты сформулированные цели, какие имеются пожелания пользователей для дальнейшего совершенствования изделий.

Наиболее часто в качестве основной цели процесса проектирования рассматривается создание малогабаритных, надежных и высокоэффективных РЭС, которые при производстве и эксплуатации требуют минимального расхода энергетических, трудовых и материальных ресурсов. Эта цель достигается решением широкого комплекса задач, наиболее важными из них являются комплексная миниатюризация, энергетическая эффективность и высокая технологичность.

При проектировании обычно выделяют два широких класса задач: задачи синтеза и задачи анализа.

Задачи синтеза заключаются в разработке проектных решений по заданным требованиям, свойствам и ограничениям к функционированию системы (блока, узла), например разработка электрической схемы узла по заданным характеристикам. Различают задачи синтеза структурного и параметрического. При структурном синтезе создается структура схемы, т. е. определяются состав элементов и способы их соединения. В случае параметрического синтеза находятся числовые значения параметров элементов, от которых зависят общие характеристики схемы. Обычно задачи синтеза решаются как оптимизационные.

Задачи анализа связаны с определением свойств проектируемого объекта, например расчетом динамических характеристик (частотных, временных) электрических схем. По результатам анализа оценивается степень соответствия проектных решений задаваемым требованиям. При проектировании РЭС задачи синтеза и анализа взаимосвязаны, каждое синтезируемое проектное решение сопровождается этапом анализа его характеристик.

Проектирование называют автоматизированным, если отдельные преобразования описаний осуществляются при взаимодействии человека и ЭВМ, и автоматическим, если все необходимые преобразования выполняются на ЭВМ без участия человека.

2.2. Особенности РЭС как объектов автоматизированного проектирования

Радиоэлектронное средство, рассматриваемое как объект проектирования, обычно представляет собой сложную техническую открытую систему, в основе функционирования которой лежат процессы передачи, извлечения и обработки информации, связанные с преобразованием и передачей электромагнитной энергии. Современные РЭС включают большое число элементов с различными связями между ними и обладают следующими свойствами, характерными для сложных систем [3]:

- ярко выраженное целевое назначение;
- наличие большого числа разнообразных объектов, взаимодействующих с РЭС;
- значительные масштабы зоны действия и возможность размещения в различных средах (земная и водная поверхность, воздушное пространство, космос);
- сложность процессов обработки информации, поступающей от различных объектов, использование средств автоматизации, вычислительной техники и сетевых структур.

Наряду с этими общими свойствами РЭС обладают рядом особенностей, которые выделяют их в отдельный класс проектируемых объектов. К этим особенностям относятся следующие.

1. Целевое назначение РЭС предполагает обеспечение информационного взаимодействия между пространственно-разнесенными объектами с использованием радиосигналов. Поэтому основными частями большинства РЭС являются подсистемы генерирования и приема электромагнитных колебаний.

2. Информационное взаимодействие между пространственно-разнесенными объектами осуществляется на основе модуляции параметров радиосигнала (амплитуды, частоты, фазы) полезными сообщениями. Следовательно, важную роль в РЭС играют системы модуляции и демодуляции высокочастотных сигналов.

3. Информационный обмен между радиотехническими системами и объектами с использованием электромагнитных колебаний требует больших энергетических затрат на генерацию и излучение радиосигналов, а также обеспечение концентрации излучаемой мощности в направлении на объект (цель) или группу объектов. При распространении электромагнитных волн в среде происходит сильное ослабление передаваемых сигналов. Поэтому в приемном тракте требуется значительное усиление принимаемых сигналов без внесения дополнительных искажений.

4. Во всех РЭС приходится решать проблемы, связанные с воздействием естественных и искусственных помех, которые приводят к искажению, а иногда и полному подавлению полезного сигнала. Для повышения помехозащищенности используются различные методы, реализуемые специальными устройствами, которые значительно усложняют структуру РЭС.

При проектировании РЭС используют функциональное, конструкторское, технологическое и информационное описания.

Функциональное описание характеризует эксплуатационные функции системы, обеспечивающие выполнение целевых заданий. Оно раскрывает принцип действия, свойства, протекающие в РЭС физические и информационные процессы. На основе функционального описания выполняется декомпозиция системы на элементы с различными функциями.

При разукрупнении системы используется иерархический принцип, сначала указываются обобщенные функции, затем в них выделяются обеспечивающие. В результате такой декомпозиции происходит структурирование системы по уровням иерархии в виде совокупности подсистем, которые состоят из устройств, а последние — из функциональных узлов.

Функциональный узел обычно представляет собой функционально законченную сборочную единицу, не имеющую самостоятельного применения (например, дискриминатор, усилитель и т. п.) и в большинстве случаев выполненную на несущей конструкции. В свою очередь, в функциональном узле также можно выделить отдельные компоненты — печатные платы, микросхемы, резисторы и т. д.

Функциональное описание компонента РЭС должно содержать следующие сведения:

- основные эксплуатационные функции, называемые выходными характеристиками;
- зависимости выходных характеристик от влияющих на них параметров системы и воздействий окружающей среды;
- показатели качества работы компонента и их соответствие целям проектирования;
- разного рода ограничения на функционирование компонента.

Математически функциональное описание компонента может быть записано в виде соотношения

$$y(t, s) = f(x, u, v; t, s),$$

где y — выходная характеристика; x — вектор режимных параметров и воздействий других компонентов; u — вектор проектных и

управляющих параметров компонента; v — воздействия окружающей среды; t — время; s — пространственная координата [22].

Конструкторское описание дает представление о материальной реализации РЭС, отображает взаимное расположение частей проектируемого объекта, их формы, используемые материалы и т. п. При конструкторском описании РЭС обычно выделяют следующие уровни: шкафы (стойки), блоки, модули, узлы печатные, микросборки, элементная база [8]. На отдельных уровнях может быть дополнительное разукрупнение. Объекты всех уровней обладают свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости. Выделяемые уровни конструкторского описания имеют свою несущую конструкцию, обеспечивающую устойчивость и надежность при эксплуатации.

Технологическое описание отображает методы и средства изготовления РЭС.

Особую роль при автоматизированном проектировании играет информационное описание, которое содержит все виды информации (документы, сведения, сообщения, сигналы) и отношения между ними. Все описания разделяются на иерархические уровни, которые отличаются степенью детализации отображаемых целей, свойств, функций и структур проектируемых объектов. Наряду с рассмотренными описаниями при проектировании РЭС используется ряд других, в частности [2]:

- первичное (исходное) описание РЭС, которое представляет собой техническое задание на проектирование, т. е. цели и задачи, решаемые системой, тактико-технические требования, условия эксплуатации и т. п.;
- промежуточные описания РЭС и его элементов, основное место в этих описаниях занимают математические и натурные (макеты) модели;
- окончательное описание разработанного объекта в виде полного комплекта технической документации (текстовый материал, схемы, чертежи и т. п.), представляемого на машинных носителях.

В ряде случаев используется термин «морфологическое описание», которое характеризует устройство объекта, его структуру, геометрию и другие сведения и формально записывается кортежем $\langle S, R, C \rangle$, где S , R , C — множества элементов (частей), связей между ними и структур системы, расположенных по ступеням иерархии, соответственно [23].

В общем случае объекты автоматизированного проектирования следует рассматривать в рамках последовательности (потока)

проектов. Последовательность Π_j модернизаций РЭС j -го типа (модель M_j изделия) можно записать в виде

$$\Pi_j = (\text{Пр}M_j(t_0 + \Delta t_0), \text{Пр}M_j(t_1 + \Delta t_1), \dots, \text{Пр}M_j(t_i + \Delta t_i), \dots), \quad t_0 < t_1 < \dots < t_i < \dots$$

где $\text{Пр}M_j$ — проектные работы по модернизации (усовершенствованию) РЭС j -го типа; t_i — момент времени запуска проекта $\text{Пр}M_{ji}$; Δt_i , $i = 0, 1, 2, \dots$, — продолжительность i -го проекта.

Основу базовой модели M_j РЭС j -го типа составляют описания принципа действия (ПД), конструкции (К), тактико-технических характеристик (ТТХ) и информационных возможностей (ИВ), т. е.

$$M_j = (\text{ПД}_j, K_j, \text{ТТХ}_j, \text{ИВ}_j).$$

Описание РЭС как объекта проектирования непосредственно связано с целями и процессами проектирования, оно развивается по мере выполнения этапа процесса проектирования, при этом последовательно обеспечивается соответствие всех целевых установок техническому заданию. Таким образом, имеет место триада в виде единства цели, объекта и процесса проектирования, рассматриваемых в их развитии от возникновения проблемы (инициации) до окончания проектных работ.

2.3. Стадии процесса проектирования

Автоматизация проектных работ существенно повлияла на применяемые методы и средства проектирования. Вместе с тем при автоматизированном проектировании сложных наукоемких объектов, какими являются большинство РЭС, сохраняются многие положения и принципы традиционного проектирования.

При декомпозиции процесса проектирования в зависимости от специфики проектируемого объекта, его сложности в жизненном цикле проекта выделяется ряд самостоятельных *стадий*. Каждая стадия, в свою очередь, делится на ряд *этапов* или *проектных задач*, решение которых обеспечивают важные промежуточные результаты выполняемого проекта. Решение задач выполняется с помощью проектных *процедур*, состоящих из последовательностей проектных *операций*.

В большинстве случаев выделяют следующие стадии жизненного цикла проекта: концепция, техническое задание (ТЗ), техническое предложение, эскизный проект, технический проект, конструкторская (рабочая) документация, опытный образец испытания, коррекция проектных решений и технологическая подготовка

Стадии процесса проектирования

Стадия	Уровень автоматизации	Содержание работ
Концепция	Незначительный	Формирование целей проекта, анализ прототипов, определение возможностей, принципов действия и общей структуры
Техническое задание (ГОСТ Р 15.201-2000)	То же	Конкретизация функциональных характеристик, тактико-технических и технико-экономических показателей, условий эксплуатации, задание на НИР
Техническое предложение (ГОСТ 2.102-68 ЕСКД ГОСТ 2.118-73 ЕСКД)	10-15 %	Проведение НИР, формирование и анализ вариантов для проверки удовлетворения ТЗ на принципиальном уровне
Эскизный проект (ГОСТ 2.119-73)	До 40 %	Разработка электрических схем, изготовление макетов, проведение испытаний макетов отдельных узлов и блоков на соответствие необходимым требованиям
Технический проект (ГОСТ 2.120-73)	60-70 %	Разработка схемной и конструкторской документации, отражающей технические решения на проектируемую систему в целом и ее составные части, в том числе вопросы защиты от внешних воздействий, доступа при ремонте и контроле. Проверка на макетных образцах правильности принятых решений по принципу действия, схемотехнике, конструкции, функциям оператора
Конструкторская (рабочая) документация	80-90 %	Корректировка электрических схем, разработка полного комплекта конструкторско-технологической документации для изготовления опытных (действующих) образцов РЭС
Опытный образец (партия) и проведение испытаний (ГОСТ В 15.210-78, ГОСТ В 15.211, ГОСТ РВ 15.203-2001, ГОСТ Р 15.201-2000)	20-30 %	Изготовление опытного образца, планирование и проведение предварительных испытаний. Обработка результатов испытаний. Выявление конструкторско-технологических ошибок и несоответствий ТЗ. Доработка опытного образца. Проведение приемочных испытаний. Корректировка конструкторских решений
Коррекция проектных решений и технологическая подготовка производства	60-70 %	Разработка полного комплекта рабочей конструкторско-технологической документации. Проектирование технологических маршрутов и оснастки. Оптимизация режимных параметров, разработка программ для обрабатывающих центров и т.п.

производства [8, 22]. Краткое содержание работ на этих стадиях и уровень автоматизации при их выполнении приведены в табл. 2.1.

Наряду с перечисленными стадиями проекта в процессе создания новых РЭС выделяют два вида работ: научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки (НИР и ОКР). НИР непосредственно связаны с выполнением начальных стадий ЖЦ проекта, когда решаются задачи выбора принципа действия, структуры, определения целесообразности внесения изменений в отдельные части системы, применения новых материалов и т. д.

Результаты НИР могут быть как положительными, так и отрицательными. В последнем случае показывается, что на данном уровне развития науки и техники реализация рассматриваемых изменений в прототипе невозможна или преждевременна.

При выполнении НИР закладываются основы рационального конструирования РЭС. Выполнение ОКР базируется на результатах НИР и является инженерным процессом применения научных знаний и данных, полученных на стадии НИР, к техническому решению определенной проблемы. Наряду с технической стороной вопроса при выполнении ОКР большое значение приобретают экономические аспекты, во многих случаях стоимостные показатели играют определяющую роль. Применительно к РЭС ОКР проводятся по двум тесно связанным направлениям: схемотехническому и конструкторско-технологическому. Завершаются ОКР выпуском конструкторской документации, изготовлением опытных образцов изделия и проведением всесторонних испытаний.

ОКР могут выполняться без предварительно проводимых НИР в тех случаях, когда не предполагается использование новых принципов действия и построения РЭС, а проводятся незначительное совершенствование или частичная модернизация имеющегося прототипа объекта проектирования.

2.4. Особенности проектирования конструкций РЭС

Конструкция РЭС, рассматриваемая как структурное образование, составленное из готовых (покупных) и вновь спроектированных частей, во многом определяет качество функционирования и конкурентоспособность разрабатываемой системы. В первую очередь это относится к надежности, технологичности, безопасности, энергетической эффективности.

Конструкции современных РЭС представляют собой сложные системы, т. е. состоят из совокупностей объектов, связей между

ними, и предназначены для реализации задаваемых функций. Любая конструкция обладает системными свойствами: композиции и декомпозиции; интегративности, т. е. образование при композиции новых качеств, не свойственных исходным частям; иерархичности, т. е. деление на структурные уровни (уровни входимости), при этом элемент более низкого уровня входит в спецификацию элемента более высокого уровня.

В процессе конструирования необходимо учитывать большое число факторов, имеющих различную природу. Эти факторы можно объединить в следующие группы требований: общего характера, эксплуатационные, конструкторско-технологические, производственные, а также требования нормативно-технических документов. Кроме того, для разных уровней конструктивных компонентов (микросборок, печатных плат, функциональных модулей и т. д.) имеются свои специфические требования.

Разработка конструкции РЭС, которая гарантированно удовлетворяет всем предъявляемым требованиям, представляет собой сложную инженерную задачу. При этом приходится решать проблемы, связанные с тем, что ряд требований являются противоречивыми, а некоторые требования предусматривают перспективу развития и функциональное наращивание системы в процессе эксплуатации, т. е. нацелены в будущее. В определенной степени противоречия возникают при стремлении повысить надежность за счет структурной избыточности и одновременно уменьшить вес и габаритные размеры или увеличить мощность передающего устройства и улучшить показатели энергетической эффективности. Нацеленность в будущее предполагает необходимость постоянной модернизации РЭС для использования научно-технических достижений, например расширения диапазонов работы, изменения конструкции антенной системы, увеличения каналов связи и др.

Для решения этих проблем при конструировании используются методы оптимизации, принятия проектных решений в условиях неопределенности, робастного проектирования, модульного конструирования, управления проектами и др. [5, 6, 35]. Применение методов автоматизированного проектирования позволяет решать следующие сложные в вычислительном отношении задачи:

- оптимальное геометрическое размещение компонентов нижестоящих уровней в монтажном пространстве вышестоящих (электрорадиоэлементов на печатных платах, печатных плат в функциональных модулях, модулей в блоках и т. д.);

- обеспечение оптимального теплового режима в блоках с применением естественного, искусственного или смешанного охлаждения;
- обеспечение оптимальной помехоустойчивости функциональных узлов при воздействии естественных и искусственных помех и др.

Проектирование конструкции РЭС при наличии жестких ограничений (требований) имеет ряд особенностей. К этим особенностям можно отнести следующие.

1. Многовариантность. Основным методом создания качественной конструкции является формирование множества альтернативных вариантов, их анализ и обоснованный выбор наиболее предпочтительного.

2. Модульность и параллельное конструирование компонентов. Несмотря на то что в законченном виде конструкция представляет собой единую систему, большое число ее элементов в виде блоков, функциональных модулей, печатных плат и других может разрабатываться параллельно, в относительной независимости друг от друга [6].

3. Типовые структуры и преемственность. При формировании альтернативных вариантов конструкции широко используются стандартизация, типизация и унификация электронных модулей и других базовых конструкций. Это обеспечивает конструктивную совместимость, взаимозаменяемость и инвариантность параметров, значительно сокращает сроки проектирования, позволяет использовать информацию о ранее разработанных конструкциях.

4. Показатели конструкции и множество состояний функционирования. В процессе реальной эксплуатации могут изменяться климатические условия, размещение на объекте, а также другие требования к исполнению РЭС. Поэтому при разработке конструкции необходимо предусмотреть, чтобы созданное изделие не только эффективно работало при соблюдении требований к климатическому исполнению, размещению на объекте, содержащихся в техническом задании, но и обладало робастностью в различных состояниях функционирования. Для этого сопоставление альтернативных вариантов конструкции должно выполняться на множестве состояний функционирования. Данное множество наряду с состоянием нормального функционирования, когда выполняются все задаваемые требования к разрабатываемому изделию, содержит состояния, в которых изделие может находиться вследствие явлений природного характера (наводнение, ураган и т. п.), организационных и других мероприятий. Таким образом, при анализе

конструкции следует учитывать значения основных показателей в различных состояниях функционирования.

2.5. Автоматизация технологической подготовки производства РЭС

Технологическая подготовка производства (ТПП) обычно рассматривается как совокупность современных методов организации, управления и решения технологических задач на основе комплексной стандартизации, автоматизации, экономико-математических моделей и средств технологического оснащения. Стандарты Единой системы ТПП устанавливают общие правила организации и управления производством, предусматривают широкое применение прогрессивных технологических процессов (ТП), стандартной технологической оснастки, средств автоматизации производственных процессов и управленческих работ [32].

Основные задачи автоматизации ТПП РЭС: выбор технологий и технических маршрутов для компонентов изделия, разработка принципиальной схемы ТП в виде последовательности этапов укрупненных операций, выбор технологического оборудования, оснастки и инструментов, оптимизация технологических маршрутов и операций, проектирование систем автоматического контроля и управления технологическим процессом, разработка системы менеджмента качества, оценка экономической эффективности ТП.

Большое внимание при решении этих задач уделяется непосредственному назначению РЭС, условиям эксплуатации изделий и вопросам энергосбережения. Для решения задач автоматизации ТПП широко используются методы математического моделирования, оптимизации и планирования эксперимента.

Построение математических моделей предполагает определение целей моделирования, декомпозицию ТП на отдельные операции, построение математических моделей для каждой операции, верификацию полученных моделей и композицию их в обобщенную модель всего технологического процесса. Разработанные модели используются в САПР ТП и SCADA-системах.

В качестве моделей ТП наиболее часто используются описательные (вербальные), аналитические (математические) и графовые (графические).

Описательные модели обычно представляют собой таблицы с информацией о режимах работы, технологических операциях, переходах и т. п. Эти таблицы содержатся в базах данных САПР ТП.

Аналитические модели ТП характеризуют функциональные связи между входными и выходными переменными ТП, отражают физико-химические процессы в технологических установках. Различные виды этих моделей подробно рассматриваются в четвертой главе, они необходимы для решения задач оптимизации режимных параметров ТП, анализа чувствительности выходных показателей ТП в случае различного рода отклонений от требуемого регламента, проектирования АСУТП и др.

Графовые модели в виде неориентированных и ориентированных графов, а также различного рода графических зависимостей между переменными ТП применяются для решения задач надежности, планирования загрузки технологического оборудования, управления запасами и т. п. В последнее время начинают применяться модели в виде когнитивной графики, которые за счет образного представления условий решаемых задач облегчают принятие интеллектуальных решений.

Моделирование ТП во многих случаях тесно связано с моделированием проектируемых и изготавливаемых объектов. Например, при моделировании этапов технологии изготовления СВИС необходимо учитывать характеристики (статические, динамические) и компоненты (активные, паразитные), которые описываются моделями самих СВИС.

Особенностями задач оптимизации применительно к ТПП являются широкое разнообразие постановок задач, сложность их формализации, высокая размерность массивов переменных, участвующих в задаче, и различного рода ограничений, наличие неопределенностей в исходных данных, большое число возможных вариантов построения ТП, отсутствие единого подхода к решению задач.

Если проект связан с незначительной модернизацией РЭС, то большая часть технологических операций считается отработанной, а для отдельных операций требуется уточнение технологических режимов и используемых материалов. В случае серьезной модернизации изделия при формировании вариантов ТП могут использоваться процессы — аналоги с добавлением отдельных операций.

Наиболее распространенные методы решения задач оптимизации, принятия проектных и управленческих решений в различных ситуациях рассматриваются в пятой главе. При использовании этих методов необходимо руководствоваться соответствующими положениями и принципами проектирования ТП. При автоматизации ТПП РЭС наиболее важными принципами являются следующие [15].

Принцип иерархичности (многоуровневости), в соответствии с которым работы по проектированию ТП делятся по уровням таким образом, что решения задач, получаемых на одних уровнях, служат исходными данными для задач следующих уровней.

Принцип неокончателъности (альтернативности) решений на этапах ТПП предполагает, что после выполнения каждого этапа для последующего проектирования остается не один, а несколько альтернативных вариантов проектных решений. Это повышает обоснованность получения наиболее предпочтительной схемы ТП.

Принцип итерационности (обратной связи) заключается в возможности возврата от каждого этапа проектирования к любым предыдущим. Это позволяет использовать новую информацию, полученную в ходе выполнения работ по ТПП и анализа результатов экспериментальной проверки качества технологического процесса.

Планирование эксперимента тесно связано с методом робастного проектирования [35]. Применение этого метода позволяет разработать ТП, при котором характеристики продукции будут в наименьшей степени подвержены разбросу, вызываемому несовершенством технологического оборудования, неопределенностью сырья и влиянием различного рода внешних воздействий.

Решение задач ТПП для производства нового (инновационного) изделия целесообразно выполнять в соответствии с методологией реинжиниринга бизнес-процессов на предприятии [37].

2.6. Принципы автоматизации проектирования

В подразд. 2.2 рассмотрены основные особенности РЭС как объектов проектирования, к ним прежде всего относятся сложность, специфический характер функционирования, обусловленный использованием радиосигналов, широкое применение информационных технологий. Автоматизированное проектирование РЭС базируется на общесистемных принципах, а также положениях, учитывающих отношение РЭС к особому классу разрабатываемых объектов. Общесистемные принципы определяют РЭС как сложные системы, предназначенные для выполнения определенных целей и исследуемые с помощью математических моделей. Эти принципы включают ряд постулатов (принимаемых без доказательства утверждений). К основным общесистемным принципам относятся следующие [10, 18].

Принцип физичности. В соответствии с данным принципом всем РЭС присущи законы радиотехники, электроники и

другие, которые определяют внутренние причинно-следственные связи функционирования компонентов и системы в целом. Наиболее важными являются постулаты целостности, декомпозиции и автономности.

В соответствии с *постулатом целостности* РЭС рассматривается как единое целое, т. е. не как множество подсистем, а как целостный объект, допускающий различные деления на подсистемы. Поэтому РЭС не тождественна никаким ее элементам (подсистемам). Таким образом, ни при композиции (объединении подсистем в систему), ни при декомпозиции (деления системы) не допустимы потери понятий. При этом композиция и декомпозиция должны осуществляться с целью генерирования более качественной (новой) информации, характеризующей систему. Для выявления целостности требуется учет всех взаимосвязей внутри системы и связей системы с внешней средой. Кроме того, выявляются основные системные свойства и факторы, которые могут снижать их уровень.

Применение постулата целостности при проектировании РЭС заключается в раскрытии сведений о системных свойствах для всех этапов ЖЦ и в обобщении их в понятия, которые используются при разработке и исследовании подсистем после декомпозиции. Считается, что декомпозиция выполнена удачно, если системные и подсистемные понятия хорошо согласуются, между ними имеется преемственность. Радиоэлектронные средства, рассматриваемые как системы, обладают особыми системными свойствами, которых нет у подсистем (элементов) при любом способе декомпозиции.

Постулат декомпозиции применяется для снижения уровня сложности исследуемого РЭС при решении задач анализа и синтеза путем расчленения системы на подсистемы. Подсистемы располагаются по уровням иерархии, причем подсистема на данном уровне является системой для элементов нижележащего уровня и рассматривается как элемент для компонента вышележащего уровня. Свойства (характеристики) разрабатываемого РЭС определяются в ходе поэтапной процедуры выработки проектных решений, начиная с системы более высокого уровня и кончая детальными свойствами ее элементов.

Постулат автономности предполагает, что из множества альтернативных вариантов декомпозиции РЭС при анализе системных свойств большинство декомпозиций окажется неудачными и для детальной разработки будет использован один или незначительное число вариантов.

Принцип моделируемости. В соответствии с этим принципом РЭС представимо конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности. Выявление новых свойств и сущностей рассматриваемой системы необязательно должно сопровождаться построением обобщающих моделей, а может ограничиваться наращиванием числа упрощенных моделей, взаимодействие которых обеспечивает отражение сложной системы в целом. Принцип моделируемости включает ряд постулатов: неопределенности, дополнительной, многообразия моделей, действий, согласования уровней и др.

Вольшую роль при проектировании РЭС играет *постулат неопределенности*. Согласно этому постулату существует область неопределенности, в пределах которой свойства системы могут быть описаны только вероятностными характеристиками, например при исследовании аспектов помехоустойчивости радиосистем. Повышение точности определения какого-либо количественно описываемого свойства сложной системы сверх некоторого предела сопровождается понижением возможной точности определения другого свойства. Максимальная точность определения свойств системы зависит от присущей ей области неопределенности, внутри которой повышение точности определения одного свойства влечет за собой снижение точности определения других свойств.

В соответствии с *постулатом дополнительной* РЭС, находясь в различных ситуациях, могут проявлять различные системные свойства, в том числе и альтернативные, т. е. несовместимые ни в одной из ситуаций по отдельности. Поэтому проектирование РЭС должно выполняться с учетом возможных состояний функционирования, которые могут иметь место в процессе реальной эксплуатации.

Постулат многообразия моделей означает, что характеристики проектируемого РЭС определяются с помощью множества моделей, которые в общем случае различаются используемыми математическими зависимостями и физическими закономерностями. Выбор моделей зависит от этапов проектирования и синтеза и особенностей объекта.

Согласно *постулату действий* для изменения поведения РЭС требуется прирост управляющего или возмущающего воздействия, превосходящего некоторый пороговый уровень. Воздействия обычно имеют энергетический, информационный или вещественный характер, они могут накапливаться и затем проявляться скачкообразно. Соответственно пороговые значения для воздействий могут быть функциями количеств энергии определенного

вещества и определенной информации. Реакция системы на внешнее воздействие носит пороговый характер.

В соответствии с *постулатом согласования уровней* требования к РЭС, формируемые на любом уровне, выступают как условия и ограничения выбора частных моделей и предельных возможностей системы на нижележащих уровнях. В случае невозможности выполнения каких-либо требований осуществляется корректировка соответствующих условий.

Согласно *постулату внешнего дополнения* истинность результатов, получаемых на каждом уровне, должна проверяться с использованием исходных данных, моделей и методов вышележащих уровней. Соблюдение данного постулата при разработке РЭС является необходимым условием выполнения проекта, соответствующего сформулированным целям и техническому заданию.

Постулат достаточности реализуется при определении требуемых характеристик в процессе совершенствования РЭС с учетом возрастания затрат на улучшение системы и проверку достаточности принимаемых решений по заданным критериям эффективности. Для этого используются критерии пригодности соответствующих моделей, с помощью которых принимаются конструктивные решения на этапах оценки характеристик системы.

Постулат проверенного методического обеспечения означает, что для анализа и синтеза РЭС необходимо использовать отработанные и экспериментально проверенные модели и методики, обеспечивающие отдельные характеристики системы в заданные сроки и с требуемой точностью.

Принцип целенаправленности. Означает, что всякой системе присуща функциональная тенденция, направленная на достижение некоторого результата, при этом система способна противостоять внешним воздействиям, использовать среду и случайные события.

Принцип целенаправленности включает *постулат выбора*, в соответствии с которым система обладает способностью к выбору поведения. Поэтому однозначно предсказать и экстраполировать ее поведение заранее невозможно ни при каком априорном знании свойств системы состояний внешнего окружения. Согласно этому постулату РЭС функционирует в существенной, но не детерминированной связи с ситуациями внешнего окружения. Поведением РЭС можно целенаправленно управлять, тем более что большинство радиосистем является эргатическими. Для РЭС использование постулата выбора имеет два аспекта. Первый аспект связан со стимулированием или подавлением «свободы» выбора. С од-

ной стороны, в сложных ситуациях возможность выбора должна быть максимальной, что расширяет диапазон деятельности. С другой стороны, в штатных ситуациях управляющие устройства РЭС должны иметь возможность выбора в пределах поставленных задач либо не иметь ее вовсе. Второй аспект касается формального представления задачи выбора и количественных оценок, необходимых для решения задачи.

Современные РЭС имеют возможность выбора и обладают адаптивными свойствами, т. е. реагируют на внешние воздействия в зависимости от внутренних критериев целенаправленности. При этом априорные знания не позволяют заранее однозначно предсказать этот выбор.

Таким образом, постулат выбора позволяет РЭС в соответствии с ее целенаправленностью использовать даже редкие благоприятные события, возникающие в окружающей среде и блокировать неблагоприятные события.

Наряду с рассмотренными основными принципами системного подхода при автоматизированном проектировании РЭС широкое применение находит ряд важных положений, которые также часто называют принципами. Эти положения во многих случаях вытекают из общесистемных принципов и отражают специфику РЭС как объектов проектирования с использованием информационных технологий. Рассмотрим кратко основные положения (принципы) автоматизированного проектирования РЭС.

1. При проектировании следует учитывать все последующие этапы жизненного цикла разрабатываемого РЭС, и прежде всего производство, эксплуатацию и утилизацию. Многие проекты остаются нереализованными вследствие недостаточной технологичности, больших затрат при производстве, сложном обслуживании.

2. Необходимо прогнозировать и учитывать перспективы развития как принципов действия, так и технологии изготовления РЭС. В условиях жесткой конкуренции неучет данного положения приводит к тому, что разработанная радиосистема становится морально устаревшей уже при производстве или на начальном этапе эксплуатации. Принцип развития требует, чтобы в РЭС предусматривалось наращивание и совершенствование аппаратных компонентов программных модулей, а также связей между ними. При модернизации РЭС допускается частичная замена отдельных компонентов.

3. Необходимо всестороннее рассмотрение всех видов взаимодействия проектируемой радиосистемы с внешней средой и други-

ми системами, в том числе связанного с электромагнитными излучениями, обменом информацией и энергией, воздействием на систему окружающей температуры, влажности, радиации и т. д.

4. Требуется учитывать различные виды взаимодействия между частями системы, и прежде всего функциональные, конструктивные, энергетические и информационные взаимодействия. Важную роль играет также рассмотрение взаимодействия между элементной базой и системотехникой, т. е. то, насколько полно используются возможности современной элементной базы в системотехнических решениях для улучшения показателей качества радиосистемы.

5. Важно учитывать возможность изменения исходных данных и постановок задач, решаемых на этапах проектирования, производства и эксплуатации системы. Для этого целесообразно варьировать исходные данные в процессе проектирования для повышения надежности получаемых результатов, а также обеспечить достаточную универсальность спроектированной системы в случае модернизации части блоков или добавления новых для расширения или изменения функциональных возможностей системы. Данное положение тесно связано с аспектами робастного проектирования, при котором используются методы планирования экспериментов для ослабления влияния различных факторов на качество системы при ее производстве и эксплуатации [35].

6. Для повышения качества проектных работ, снижения риска целесообразно сочетать различные методы решения проектных задач — математические, эвристические, экспериментальные, при этом необходимо обеспечить взаимодействие участников проекта разных специальностей — радиотехников, математиков, механиков, технологов, программистов и др.

7. При проектировании радиосистем необходимо сочетать принципы иерархичности, декомпозиции и композиции. Начинается проектирование с рассмотрения радиосистемы как единого целого, анализа ее общих характеристик и выходных показателей. Далее система в соответствии с методом декомпозиции разбивается на небольшое число подсистем, например передающее устройство, приемное устройство и т. д. Выделенные подсистемы исследуются независимо друг от друга. Затем определяются вклады каждой части в результирующие показатели всей системы, для этого подсистемы объединяются в единую систему, т. е. выполняется их композиция. В свою очередь, подсистемы разбиваются на более мелкие части, которые также сначала рассматриваются независимо друг от друга, а потом проводится композиция и т. д.

Такое иерархическое разбиение системы, анализ и синтез на каждом уровне иерархии позволяют эффективно решать задачи автоматизированного проектирования РЭС любой сложности.

По аналогии с иерархичностью, декомпозицией и композицией технических средств эти принципы используются для решения сложных математических задач, связанных с оптимизацией характеристик проектируемой системы при наличии разного рода ограничений.

Сочетание иерархичности, декомпозиции и композиции позволяет успешно решать не только задачи разработки радиосистемы, но и ее задачи производства, а также эксплуатации. Однако при декомпозиции РЭС на части требуется так формулировать исходные данные проектируемых частей (блоков, модулей и т. д.), чтобы они с достаточной полнотой учитывали все виды взаимодействия между частями в процессе выполнения РЭС поставленных перед системой задач. В противном случае оптимально спроектированная по частному критерию подсистема может не обеспечивать оптимальность системы в целом по обобщенному критерию.

8. Необходимо выделять главные показатели качества и конкурентоспособности проектируемого РЭС, которые следует улучшать в первую очередь. Такими показателями могут быть помехоустойчивость, точность, дальность действия и др. Особенно важно выделять главные показатели на разных стадиях проектирования, где большая размерность векторного критерия качества может привести к потере оптимального варианта решения и значительному увеличению сроков выполнения проекта. Выделение главных показателей облегчает вскрытие технических противоречий, затрудняющих улучшение качества системы в целом.

9. Проектирование следует рассматривать как выполнение широкого комплекса работ. Комплексность проектирования предполагает: анализ и всестороннюю оценку исходных предпосылок; исследование взаимодействия частей на различных уровнях иерархии; полный учет всех факторов и ограничений, влияющих на качество функционирования РЭС на всех этапах ЖЦ; использование векторных критериев эффективности.

10. Проектирование РЭС представляет собой итерационный процесс, в соответствии с которым на первых этапах применяются приближенные методы анализа с использованием небольшого числа основных критериев. Затем переходят к более детальному рассмотрению системы с учетом второстепенных факторов. Далее следует возврат к первым этапам для анализа основных характеристик с включением ранее неучтенных факторов и т. д. Такой цик-

лически повторяющийся характер перехода к рассмотрению второстепенных факторов и их уточнению может выполняться несколько раз. Данное обстоятельство связано, во-первых, с недостаточным объемом исходной информации и низкой ее достоверностью, во-вторых, с новизной разработки. Чем больше изменений закладывается в проектируемую систему по сравнению с прототипом, тем больше приходится проводить итераций. Таким образом, итерационный процесс заключается в циклическом переходе от общего (системы в целом) к частному (элементам) и обратно с уточнением и детализацией характеристик на каждом цикле итерации. Итерационный процесс непосредственно связан с принципом комплексности, эта связь обусловлена выполнением комплексных исследований на каждой итерации.

11. При разработке РЭС необходимо предусматривать, чтобы созданная система удовлетворяла свойству открытости, т.е. при длительной эксплуатации имелась возможность ее совершенствования и модернизации. Потребность в данном свойстве обусловлена высокими темпами научно-технического прогресса, когда быстро меняются требования к системе, свойства окружающей среды, модифицируются цели, возникает необходимость объединения систем в комплексы, для этого объекты должны быть совместимыми.

12. Для отдельных ИТ, используемых в РЭС, должны выполняться требования информационного единства, определяющие их информационную согласованность. В соответствии с этими требованиями создается единое информационное пространство в рамках одного радиотехнического комплекса.

Важную роль при формировании технического задания играет принцип включения, который состоит в том, что требования к создаваемой и развиваемой радиосистеме определяются со стороны более сложной системы (комплекса).

Модульный принцип проектирования (принцип модульности) предполагает использование функциональных модулей сравнительно малой сложности и составление из них модулей более высоких уровней конструктивной иерархии РЭС. При этом должно выполняться требование совместимости электронных модулей, т.е. обеспечиваться типизация и унификация межмодульных связей для организации непосредственного информационного и энергетического взаимодействия между модулями [6].

Знание основных принципов разработки РЭС необходимо для оценки их соответствия современному научно-техническому уровню при выполнении проектов. Не последнюю роль в этом играет

фактор клиентоориентированности, т. е. насколько разрабатываемые РЭС учитывают уровень подготовленности персонала.

При разработке радиосистем различных классов на передний план по важности могут выходить разные принципы. Например, для систем радиосвязи основное внимание может уделяться помехозащищенности, а для систем наведения — точности.

Автоматизированное проектирование следует рассматривать как информационный процесс, в ходе которого осуществляется преобразование входной информации о проектируемом объекте (техническое задание), знаний и опыта разработчиков (баз знаний), данных о прототипах (баз данных) в выходную конструкторско-технологическую информацию. При этом следует учитывать меняющееся в последние годы представление об информации, которая рассматривается не как обычные данные, а как средство для решения проектировщиком стоящих перед ним задач.

Процесс проектирования реализуется в интерактивном режиме в виде диалога между человеком с программно-аппаратными средствами САПР в реальном масштабе времени. Этот процесс основан на интеллектуальной деятельности разработчиков, поддерживаемой средствами САПР.

Наряду с перечисленными положениями (принципами) широкое применение при проектировании находят разного рода методы, способы и приемы. К ним можно отнести следующие: параллельное проектирование, т. е. одновременную разработку элементов системы на определенном уровне иерархии, что значительно сокращает сроки выполнения проекта; оптимизацию (методы оптимизации подробно будут рассмотрены в пятой главе); имитационное моделирование (вычислительные эксперименты); методы шаблонов, наследования и т. д. Между особенностями современных РЭС и рассмотренными системными принципами проектирования имеются тесные связи. Например, воздействие на РЭС большого числа случайных факторов отражается принципами открытости и целенаправленности. Сложность РЭС и множество выполняемых функций при наличии общей цели функционирования находят отражение в принципах комплексности, иерархичности, декомпозиции и целенаправленности.

Контрольные вопросы

1. Какие задачи проектирования выделяют в зависимости от степени новизны проектируемых объектов?
2. Из каких этапов состоит цикл обновления изделий?
3. В чем заключаются задачи анализа и синтеза?

4. Какие свойства РЭС выделяют их в отдельный класс проектируемых технических систем?
5. Какие переменные входят в функциональное описание компонента РЭС?
6. Что характеризует морфологическое описание объекта?
7. Какие выделяют основные стадии процесса проектирования РЭС?
8. Каковы особенности проектирования конструкций РЭС?
9. Какие задачи решаются при автоматизации технологической подготовки производства РЭС?
10. В чем заключается принцип моделируемости систем применительно к задачам проектирования РЭС?
11. Что означает принцип целенаправленности?
12. В чем заключаются декомпозиция и композиция системы при ее проектировании?

Разработка современных РЭС с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) обеспечивает гармоничное сочетание инструментов автоматизации проектно-конструкторских работ с интеллектуальным потенциалом и опытом проектировщиков. Система автоматизированного проектирования представляет собой совокупность средств и методов, обеспечивающих выработку проектных решений на основе автоматизации информационных процессов. САПР реализуют информационную технологию в виде определенной последовательности информационно связанных функций, задач или процедур, выполняемых в интерактивном режиме. Обычно САПР внедряется и первое время функционирует на предприятии в виде самостоятельной информационной системы, однако в последующем она, как правило, интегрируется с другими автоматизированными системами: АСУП, АСУТП и др.

Основными частями САПР являются комплекс средств автоматизации, организационно-методические и технические документы. Комплекс средств автоматизации, в свою очередь, включает взаимосогласованные программные, технические и информационные компоненты с необходимой эксплуатационной документацией.

Классификацию САПР осуществляют по ряду признаков: сложности объектов проектирования, уровню автоматизации, уровню комплексности, производительности и числу уровней технического обеспечения (рис. 3.1). Иногда САПР классифицируют по приложениям, целевому назначению, масштабам (комплексности решаемых задач) [21].

По приложениям наиболее представительными и широко используемыми являются следующие группы САПР:

- САПР для радиоэлектроники, в том числе системы ECAD (Electronic CAD) или EDA (Electronic Design Automation);
- САПР для применения в отраслях общего машиностроения, их часто называют машиностроительными САПР или системами MCAD (Mechanical CAD);

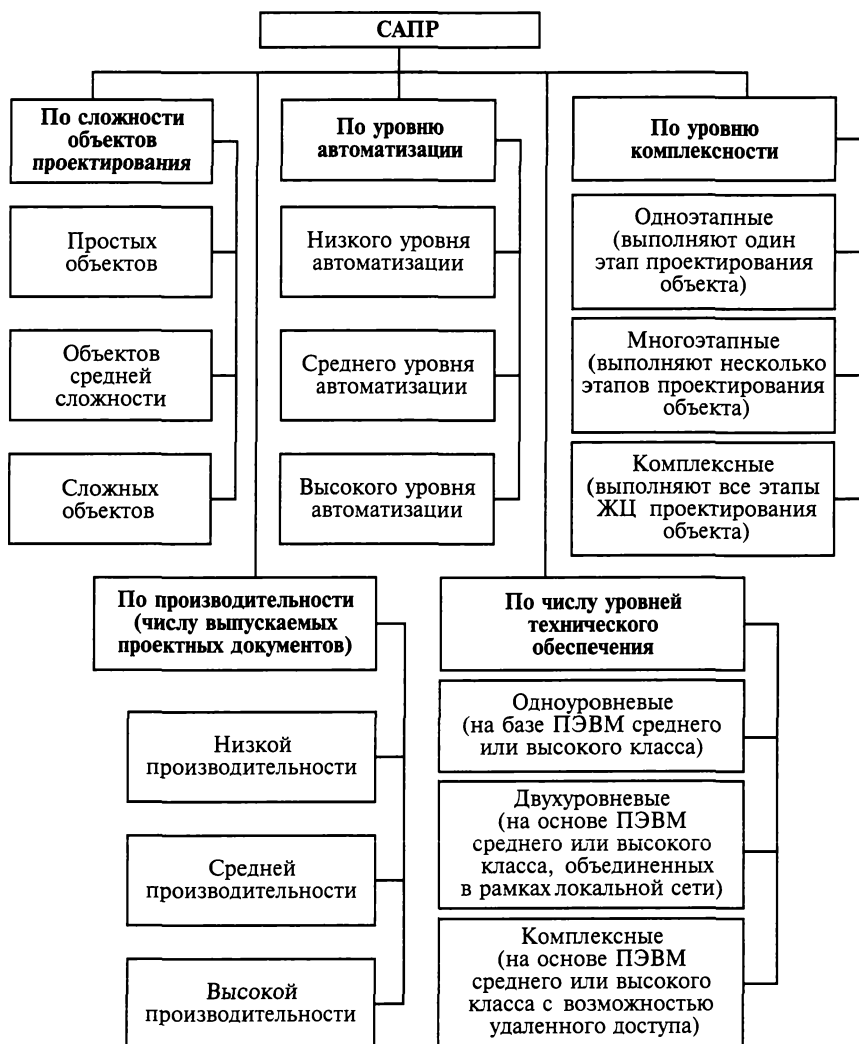


Рис. 3.1. Классификация САПР

- САПР в области энергетики, строительства и др.

Кроме того, известно большое число специализированных САПР, выделяемых в указанных группах (САПР для проектирования изделий микроэлектроники) или представляющих самостоятельную ветвь в классификации (САПР электрических машин, САПР летательных аппаратов и др.).

По целевому назначению различают системы или подсистемы САПР, обеспечивающие разные аспекты и этапы проектирования.

По масштабам выделяют отдельные программно-методические комплексы (ПМК) САПР (комплекс анализа электронных схем, комплекс анализа прочности изделий и т.п.), совокупность ПМК и системы с уникальными архитектурами не только программного (software), но и технического (hardware) обеспечения.

Необходимо заметить, что среди САПР различают «легкие», «средние» и «тяжелые» системы. Первые из них ориентированы преимущественно на двухмерную графику, сравнительно дешевы и менее требовательны в отношении вычислительных ресурсов. «Тяжелые» САПР работают с трехмерной графикой, более универсальны и дороги. «Средние» системы занимают промежуточное положение. Однако с ростом возможностей персональных ЭВМ границы между «легкими» и «средними» САПР постепенно стираются.

Как сложная система САПР представляет собой совокупность взаимосвязанных частей, среди которых можно выделить проектирующие и обслуживающие подсистемы [21].

Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные процедуры, например геометрическое моделирование механических объектов, схемотехнический анализ, трассировку соединений в печатных платах, подготовку конструкторской документации и т.д.

Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют системной средой (или оболочкой) САПР. К ним относят подсистемы управления проектными данными, подсистемы сопровождения программного обеспечения, обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, использованных в САПР.

В САПР реализованы следующие системные принципы [2].

Принцип включения, заключающийся в том, что САПР рассматривается как часть более сложной автоматизированной системы, например CALS, которая определяет требования к функционированию и модернизации САПР.

Принцип системного единства, в соответствии с которым целостность САПР обеспечивается тесными связями между ее подсистемами.

Принцип комплексности, т.е. связность проектирования объектов на всех этапах жизненного цикла проекта.

Принцип информационного единства, означающий информационную согласованность всех подсистем САПР, в том числе использование единой терминологии, условных обозначений и способов представления информации. Это позволяет результаты реше-

ния одних задач в САПР рассматривать как исходные данные для других задач, многократно использовать файлы, содержащиеся в базах данных и т. д.

Принцип совместимости, в соответствии с которым обеспечивается совместимость используемых языковых, программных и технических средств САПР, их совместное функционирование и открытость структуры, т. е. введение в систему новых аппаратных средств и (или) компонентов программного обеспечения не должно приводить к значительным изменениям существующей САПР.

Принцип инвариантности, означающий максимальную универсальность используемых в САПР компонентов, методов и пакетов программ для проектирования объектов определенного класса радиосистем. Примерами таких пакетов являются программы решения задач структурного и параметрического синтеза, расчета надежности и др.

Принцип развития означает, что САПР является развивающейся системой, в которую вводятся новые подсистемы и компоненты, увеличиваются функциональные возможности, расширяется спектр решаемых проектных задач.

В соответствии с ГОСТ 23501.101—87 и РД 50-680—88 выделяют следующие основные виды обеспечения САПР (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Виды обеспечения САПР

Математическое обеспечение (МО) объединяет математические методы, модели и алгоритмы обработки информации, используемые при автоматизированном проектировании. Элементы МО САПР чрезвычайно разнообразны. Это модели проектируемых РЭС, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, поиска экстремума функционала и т. д. Практическое использование МО для решения задач проектирования происходит после его реализации в программном обеспечении.

Программное обеспечение (ПО) представляет собой совокупность программ на носителях информации (CD, оптических или жестких дисках и др.) с программной документацией. Программное обеспечение САПР делится на общесистемное, базовое и прикладное (специальное). Общесистемное ПО предназначено для обеспечения функционирования технических средств, в базовое ПО входят программы, обеспечивающие правильное функционирование прикладных программ САПР, а в прикладном ПО реализуется математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур. Прикладное ПО состоит из пакетов прикладных программ, каждый из которых обслуживает определенный этап процесса проектирования или группу однотипных задач внутри различных этапов.

Лингвистическое обеспечение состоит из языковых средств для формализации естественного языка, построения и сочетания информационных единиц, используемых в САПР при функционировании системы для общения с комплексом средств автоматизации, а также между проектировщиками и ЭВМ.

Информационное обеспечение состоит из совокупности данных, описывающих принятый в системе словарь базовых описаний (классификаторы, типовые модели, форматы документов и др.), и актуализированных данных о состоянии информационной модели объекта проектирования на всех этапах его жизненного цикла. Эти данные могут быть представлены в виде тех или иных документов на различных носителях информации. Основная часть информационного обеспечения САПР — базы данных (БД) и системы управления базами данных (СУБД). В БД содержатся данные, структурированные в соответствии с принятыми в конкретной БД правилами. СУБД представляет собой совокупность программных средств, обеспечивающих функционирование БД. С помощью СУБД производятся запись данных в БД, их выборка по запросам как проектировщиков, так и прикладных программ, обеспечивается защита от потери информации, несанкционированного доступа и т. п.

Техническое (аппаратное) обеспечение включает в себя средства реализации управляющих воздействий, а также средства получения, ввода, подготовки, преобразования, обработки, хранения, регистрации, вывода, отображения, использования и передачи данных с конструкторской и эксплуатационной документацией.

Организационно-методическое обеспечение представлено документами, определяющими организационную структуру объекта и системы автоматизации, необходимых для выполнения конкретных автоматизируемых функций, деятельность в условиях функционирования системы, а также формы представления результатов деятельности. Значительную часть организационно-методического обеспечения САПР составляют документы, характеризующие состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования, т. е. положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений проектной организации и их взаимодействие с комплексом средств автоматизированного проектирования.

Правовое обеспечение состоит из нормативно-правовых материалов, регламентирующих правоотношения при функционировании САПР, и юридического статуса результатов ее функционирования.

Эргономическое обеспечение объединяет взаимосвязанные требования, направленные на согласование психологических, психофизиологических, антропометрических характеристик и возможностей человека с характеристиками САПР и параметрами среды на рабочем месте.

Перечисленные виды обеспечения составляют основу любой САПР. Наиболее важными из них с точки зрения особенностей функционирования САПР РЭС являются математическое, программное, лингвистическое, информационное и техническое обеспечения, рассмотрению которых посвящена данная глава.

3.1. Математическое обеспечение САПР

В математическом обеспечении (МО), включающем модели объектов, методы и алгоритмы решения проектных задач, можно выделить специальную и инвариантную части. Специальная часть содержит математический аппарат, который отражает специфику принципов действия и структур проектируемых объектов, особенности их функционирования, оригинальные методы и алгоритмы решения задач, анализа и синтеза. Инвариантная часть состоит

из методов и алгоритмов, слабо связанных с особенностями математических моделей конкретных объектов, например методов и алгоритмов решения систем уравнений, параметрической оптимизации и др.

Состав и свойства МО оказывают непосредственное, а в большинстве случаев и определяющее влияние на функциональные характеристики САПР, поэтому для правильного выбора или разработки моделей, методов и алгоритмов необходимо учитывать ряд требований, предъявляемых к МО САПР [1, 2, 21]. Основными из них являются требования к универсальности, алгоритмической надежности, точности, быстродействию и используемым вычислительным ресурсам.

Требование к высокой степени универсальности МО предъявляется для того, чтобы обеспечить применение САПР к большинству объектов, проектируемых на предприятии. Например, при схемотехническом проектировании применяют математические модели функционирования транзистора, справедливые для любого режима его работы, а методы получения и анализа моделей применимы к любой аналоговой или цифровой схеме. В процессе проектирования структур вычислительных систем используют модели и алгоритмы, позволяющие исследовать стационарные и нестационарные процессы обработки информации для разнородных входных потоков данных.

Требование к алгоритмической надежности выражается свойством алгоритмов МО давать правильные результаты при различных исходных данных. Проверка выполнения этого требования особенно актуальна для эвристических алгоритмов, достоинством которых является высокое быстродействие. Поэтому, несмотря на то что они не гарантируют получение оптимальных результатов, их широко используют в САПР РЭС, например в подсистемах компоновки, размещения и трассировки печатных плат. Количественной оценкой надежности алгоритмов служит вероятность получения достоверных результатов при выполнении заранее заданных ограничений на их применение.

Проблема надежности алгоритмов тесно связана с проблемой обусловленности математических моделей и задач. Плохая обусловленность приводит к получению существенных искажений результатов при малых погрешностях исходных данных. На каждом этапе вычислений имеются свои промежуточные исходные данные и результаты, в том числе и свои источники погрешностей, а недостаточная обусловленность приводит к росту погрешностей, что в итоге снижает точность конечного результата.

Требование к точности моделей и алгоритмов является важным для всех задач автоматизированного проектирования. Точность оценивается по степени совпадения расчетных и истинных результатов. Во многих случаях, когда погрешности вычислений оказываются выше предельно допустимых значений и решение задачи или вообще невозможно получить, или оно неверно, приходится говорить уже не о точности, а о надежности алгоритма. Точность компонентов МО оценивается с помощью специальных вычислительных экспериментов, основанных на использовании тестовых задач.

Требование к быстродействию обусловлено большими объемами вычислений, характерными для функционирования САПР РЭС. Обычно именно продолжительность вычислительных операций служит главным сдерживающим фактором при повышении сложности проектируемых на ЭВМ объектов и точности моделей для их исследования. Поэтому быстродействие, оцениваемое в виде затрат машинного времени, является важным требованием к МО САПР. Один из способов повышения быстродействия предусматривает применение многопроцессорных суперЭВМ или рабочих станций, построенных на базе многоядерных процессоров и позволяющих проводить параллельные вычисления.

Требование к используемым вычислительным ресурсам определяет второй по значимости после быстродействия показатель экономичности МО, оцениваемый величиной затрат машинной памяти при решении задачи в САПР. Затраты памяти определяются длиной программы и объемом используемых массивов данных. Несмотря на большой объем оперативной памяти в современных ЭВМ, экономичность по затратам памяти остается актуальной. Это связано с тем, что в многозадачном режиме функционирования ЭВМ программа с запросом большого объема памяти получает более низкий приоритет и в результате время ее пребывания в системе увеличивается.

Улучшить экономичность по затратам оперативной памяти можно путем использования внешней памяти. Однако частые обмены данными между высокоскоростной оперативной памятью и внешней с гораздо меньшими скоростями чтения/записи могут привести к недопустимому росту затрат машинного времени. Поэтому при больших объемах программ и массивов обрабатываемой информации целесообразно использовать МО, допускающее построение оверлейных или динамических программных структур и реализующее принципы декомпозиции, т. е. отдельной обработки информации.

Разработка компонентов математического аппарата САПР (в первую очередь математических моделей) должна проводиться с учетом специфики каждого из иерархических уровней проектирования. В соответствии с блочно-иерархическим подходом принято выделять микроуровень, макроуровень, функционально-логический и системный уровни [21].

На микроуровне математические модели представляют в виде дифференциальных уравнений в частных производных вместе с граничными условиями. Такие модели описывают объекты с распределенными параметрами и используются при анализе процессов теплообмена, прочности конструкций или деталей, моделировании электромагнитных полей и т. п. Решение дифференциальных уравнений в частных производных выполняется численными методами, основанными на дискретизации независимых переменных, т. е. представлении их конечным множеством значений в выбранных узловых точках. Эти точки рассматриваются как узлы некоторой сетки, поэтому такие методы называют сеточными. Среди сеточных методов наибольшее распространение получили метод конечных разностей и метод конечных элементов.

Модели макроуровня записывают в виде систем алгебраических и (или) обыкновенных дифференциальных уравнений, они характеризуют процессы в объектах с сосредоточенными параметрами. Для решения многих проектных задач на макроуровне в САПР широко используются алгоритмические модели на основе компонентных (описывающих свойства элементов системы) и топологических (описывающих взаимосвязи в составе моделируемой системы) уравнений [21]. Компонентные и топологические уравнения отражают разные свойства объектов, но могут иметь одинаковый формальный вид. Это позволяет разрабатывать алгоритмы построения и исследования моделей в САПР, инвариантные к различным проектируемым объектам. Единообразие математического аппарата особенно важно при анализе систем, состоящих из физически разнородных подсистем.

Анализ процессов функционирования РЭС проводят во временной и частотной областях. Динамический анализ во временной области позволяет получить картину переходных процессов, оценить динамические свойства линейных и нелинейных систем. Анализ в частотной области применяют, как правило, к объектам с линеаризуемыми моделями при исследовании колебательных процессов, устойчивости и т. п.

Когда число компонентов исследуемой системы больше некоторой величины, сложность макромоделей системы становится

чрезмерной. В этом случае переходят на функционально-логический уровень, на котором исследуют устройства, в качестве элементов которых принимают сложные узлы и блоки, рассматривавшиеся как самостоятельные объекты при моделировании на макроуровне. В случае необходимости модели элементов упрощаются по сравнению с их представлением на макроуровне. Для исследования непрерывных процессов используется аппарат передаточных функций или частотных характеристик, а если объектом исследования является дискретный процесс, — методы математической логики и конечных автоматов [21]. При исследовании объектов большой сложности, например производственного предприятия, радиотехнического комплекса, вычислительных сетей и т. п., моделирование ведется на системном уровне. Здесь широко применяют методы теории массового обслуживания, сетей Петри и др.

Важное место в МО САПР занимает математический аппарат решения задач анализа и синтеза проектируемых объектов. Наиболее сложными и плохо формализуемыми являются задачи структурного синтеза. Во многих случаях для их решения нет полных исходных данных.

Особое место в математическом аппарате САПР отведено обеспечению подсистем машинной графики и геометрического моделирования (МГиГМ), занимающих одно из центральных мест в САПР для областей радиоэлектроники, машиностроения, архитектуры и др. Проектирование изделий в этих областях ведется в интерактивном режиме с использованием геометрических моделей, отображающих форму деталей, состав сборочных единиц и некоторые дополнительные параметры (масса, цвет и т. п.). Поэтому основу математического обеспечения МГиГМ прежде всего составляют модели, методы и алгоритмы для геометрического моделирования и подготовки к визуальному отображению. Различают математическое обеспечение двумерного (2D) и трехмерного (3D) моделирования. Область применения 2D графики — подготовка чертежной документации в машиностроительных САПР, проектирование топологии печатных плат и кристаллов СВИС в САПР электронной промышленности.

Особенности предметной области проектирования РЭС обуславливают специфику применяемых математических моделей, методов и алгоритмов и прикладных пакетов программ САПР. Удачная реализация математического обеспечения в программных продуктах зачастую определяет успех всего процесса проектирования, поэтому в САПР предъявляются высокие требования к программному обеспечению.

3.2. Программное обеспечение САПР

Программное обеспечение (ПО) САПР представляет собой совокупность программ, процедур и правил, написанных с использованием специализированных языковых средств и предназначенных для применения в САПР.

К ПО предъявляются следующие основные требования:

- эффективность по быстродействию и затратам памяти;
- удобство пользовательского интерфейса;
- надежность и достоверность получения результатов;
- открытость относительно внесения изменений в процессе эксплуатации программ;
- программно-аппаратная независимость или кроссплатформенность, т.е. возможность использования программ на ПЭВМ разных типов под управлением различных операционных систем.

В ПО выделяют общесистемную, базовую и прикладную составляющие [2, 21].

Общесистемное ПО включает совокупность программ для управления, контроля и планирования вычислительного процесса, распределения ресурсов, ввода-вывода данных и других операций. Основным компонентом системного ПО САПР является операционная система (ОС).

Операционные системы отличаются друг от друга особенностями реализации внутренних алгоритмов управления основными ресурсами компьютера (технической частью ПЭВМ), областями использования и многими другими свойствами. Все существующие ОС можно условно разделить на локальные и сетевые. Локальная ОС предоставляет пользователю доступ к файлам, устройствам хранения информации и периферийному оборудованию в рамках одного компьютера. Сетевая ОС позволяет обеспечить взаимодействие компьютеров в сети, предоставляя клиентам такие услуги, как регистрация, аутентификация пароля, доступ к периферии (принтер, сканер, плоттер и др.), сетевое администрирование и совместное использование файлов данных. Подавляющее большинство современных ОС являются сетевыми. Среди самых известных ОС необходимо выделить UNIX (UNIpexed Information and Computing System), Linux (Linus Unix), FreeBSD (Free Berkley Software Design), Solaris, Mac OS (Macintosh OS), Novell Netware (Network Ware), IBM LAN Server, Microsoft Windows NT (New Technology), Windows 2000, Windows XP (eXPerience), Windows 2003, Windows Vista.

От применяемых алгоритмов управления локальными ресурсами компьютера во многом зависит эффективность ОС в целом. В зависимости от особенностей управления процессором ОС классифицируют по следующим основным признакам: числу выполняемых задач, числу одновременно работающих пользователей и возможности поддержки нескольких процессоров.

В зависимости от числа выполняемых задач в каждый момент времени ОС разделяют на одно- и многозадачные. Однозадачные ОС в основном выполняют функцию предоставления пользователю виртуальной машины, делая более простым и удобным процесс взаимодействия пользователя с компьютером. Однозадачные ОС включают средства управления периферийными устройствами, средства управления файлами, средства общения с пользователем. Типичными представителями однозадачных ОС являлись MS DOS (MicroSoft Disk Operation System), IBM PC DOS (IBM Personal Computer DOS), CP/M (Control Program/Microcomputer).

Многозадачные ОС, кроме вышеперечисленных функций, управляют разделением совместно используемых ресурсов, таких, как процессор, оперативная память, файлы и внешние устройства. Большинство современных операционных систем являются многозадачными.

По числу одновременно работающих пользователей выделяют одно- и многопользовательские операционные системы. К однопользовательским относят такие ОС, как MS DOS, IBM PC DOS, CP/M, Windows 3.x, ранние версии OS/2 и некоторые другие.

Главным отличием многопользовательских ОС от однопользовательских является наличие средств защиты информации каждого пользователя от несанкционированного доступа других пользователей. Однако не всякая многозадачная система является многопользовательской, и не всякая однопользовательская ОС является однозадачной.

Важным свойством ОС является наличие в ней средств поддержки многопроцессорной обработки данных. Такие средства есть в операционных системах Solaris фирмы Sun, OS/2 фирмы IBM, Windows NT/2000/2003/2008 фирмы Microsoft и NetWare 4.1 фирмы Novell.

Среди многопроцессорных операционных систем различают асимметричные и симметричные. Асимметричная ОС работает только на одном из процессоров системы, распределяя выполнение прикладных программ по остальным процессорам. Симметричная ОС полностью децентрализована и использует весь пул процессоров, разделяя их между системными и прикладными за-

дачами. Существенной особенностью современных операционных систем является возможность распараллеливания вычислений в рамках одной задачи, т. е. разделение процессорного времени не между задачами, а между их отдельными ветвями (нитеями).

Определенное влияние на свойства операционной системы в целом, на возможности ее использования в той или иной области оказывают особенности других подсистем управления локальными ресурсами — памятью, данными, устройствами ввода-вывода.

Существующие ОС бывают коммерческими и свободно распространяемыми (Freeware). К коммерческим относятся все версии Microsoft Windows, Novell Netware, UNIX, Mac OS, а также некоторые версии Linux. К бесплатным ОС в первую очередь следует отнести Linux и все разновидности FreeBSD.

Состав базовой составляющей ПО строго не регламентируется и для разных категорий САПР может существенно различаться. Она включает программные продукты, необходимые для работы с подсистемами САПР, например графические и текстовые редакторы, дополнительные надстройки (в частности, виртуальная машина Java), файловые менеджеры, архиваторы и др. В большинстве случаев пакеты прикладных программ САПР содержат различного рода справочную информацию в виде встроенной контекстной помощи, текстовых и (или) графических документов или презентации.

Иногда возникает необходимость импорта (экспорта) документов, подготовленных в разных САПР, или упаковки/распаковки файловых архивов. Для этих целей на ПЭВМ устанавливается базовый набор дополнительных программных средств. Так, в наиболее общем случае такой базовый набор может включать в себя программу Adobe Acrobat Reader (для просмотра справочной информации), средства пакета Microsoft Office (для просмотра или внесения изменений в документацию), архиватор WinRAR (WinZIP), а также файловый менеджер Total Commander или FAR.

Прикладную составляющую ПО САПР определяют пакеты прикладных программ (ППП), реализующие алгоритмы решения проектных задач [2, 21]. Они разрабатываются на основе единого внутреннего представления информации по модульному принципу и ориентированы на использование пользователем, не владеющим навыками программирования.

В зависимости от состава пакета различают несколько типов ППП. Пакеты программ простой структуры характеризуются наличием только обрабатывающей части, состоящей из набора функциональных модулей, каждый из которых предназначен для вы-

полнения только одной проектной процедуры. Объединение нужных модулей осуществляется средствами операционной системы ПЭВМ.

Пакеты программ сложной структуры появились в результате развития прикладного ПО. В них имеется управляющая часть (монитор) и языковой процессор с проблемно-ориентированным входным языком.

К настоящему времени разработано большое количество ППП для САПР электронных средств. В качестве примеров можно привести P-CAD, OrCAD, Spice, Microwave Office, MicroCAP и другие, ориентированные на автоматизацию проектирования печатных плат, цифровых и аналоговых интегральных схем, операционных усилителей, антенн и устройств СВЧ.

Развитие ПО требует все более значительных затрат высококвалифицированного труда программистов, поэтому стоимость многих промышленных САПР достаточно высока. Внедрение таких САПР связано с определенными рисками экономического характера, поэтому при выборе той или иной САПР важно оценить ее срок окупаемости, затраты на модернизацию или приобретение необходимых средств вычислительной техники, издержки на переобучение персонала. Некоторые фирмы-разработчики ПО предлагают демонстрационные (demo) версии, имеющие ряд ограничений по сравнению с коммерческой. Другие фирмы распространяют так называемые ознакомительные (trial) версии своего продукта с ограниченным сроком функционирования. За это время возможно определить эффективность данного ПО и принять решение о его приобретении.

3.3. Лингвистическое обеспечение САПР

Лингвистическое обеспечение включает в себя совокупность языковых средств, используемых в САПР для обмена информацией между человеком и ЭВМ. Под языковыми средствами понимают любые средства общения, наборы символов для приема, передачи или обмена информацией. В структуре лингвистического обеспечения САПР выделяют три группы языковых средств: программирования, проектирования и управления [2].

Основное назначение языков программирования — разработка и коррекция системного и прикладного программного обеспечения САПР. Базовую часть таких языков образуют наборы символов и правила образования из них конструкций для реализации тех или иных алгоритмов.

Все языки программирования принято разделять на языки высокого и низкого уровней. Согласно ГОСТ 19781—90 языком высокого уровня называется язык программирования, понятия и структура которого удобны для восприятия человеком. Языки низкого уровня близки к машинным языкам. Машинный язык — язык программирования, предназначенный для представления программы в форме, позволяющей выполнять ее непосредственно техническими средствами обработки информации. Низкоуровневые языки программирования применяются для написания программ, учитывающих специфические свойства конкретной аппаратуры и (или) критичных к используемым ресурсам памяти, например для микроконтроллеров. Типичным представителем языков низкого уровня является Ассемблер. В соответствии с ГОСТ 19781—90 Ассемблер — язык программирования, который представляет собой символьную форму машинного языка с рядом возможностей, характерных для языка высокого уровня.

Примерами высокоуровневых языков программирования являются языки Fortran, Basic, C, Pascal, HTML, DHTML, XML, Java, JavaScript, JScript, VBScript, PHP, Lisp, Prolog и др. Их отличают гибкость и наличие развитых средств построения алгоритмических конструкций. Значительная часть из них позволяет использовать объектно-ориентированный подход к проектированию программного обеспечения.

Рассмотрим некоторые из наиболее известных языков.

Язык Fortran — один из первых универсальных языков высокого уровня. Сильной стороной языка является высокая эффективность численных расчетов при относительно простой структуре кода. Благодаря этим свойствам язык получил большое распространение при разработке прикладных программ для решения научных задач. С момента своего появления в стандарт языка несколько раз вносились дополнения и изменения. Последние версии основаны на стандарте Fortran-90, например Microsoft Fortran PowerStation 4.0.

До недавнего времени самыми распространенными для ПЭВМ были различные версии *языка Basic* (GW Basic, Turbo Basic, Quick Basic). Появление визуального стиля программирования привело к появлению среды Microsoft Visual Basic и Visual Basic for Application (VBA). Несомненные достоинства языка: простота разработки и наглядная структура программ, универсальность. Кроме того, VBA является встроенным языком некоторых программных продуктов. Так, все приложения пакета Microsoft Office используют VBA для создания пользователем дополнительных надстроек

(макросов), позволяющих реализовать функции, изначально не предусмотренные программой. Тем не менее ограниченные возможности языка затрудняют его использование для разработки сложных программных продуктов, поэтому в этих случаях программисты прибегают к использованию других языковых средств, например C или Pascal.

В языке C объединяются достоинства возможностей низкоуровневых языков и мощных средств языков программирования высокого уровня (например, объектно-ориентированный подход). Язык C 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 таких операционных систем для ПЭВМ, как UNIX, MS DOS и Windows. Современные версии языка — C++, C# включены в ряд систем разработки программного обеспечения, например Borland C++ Builder или Microsoft Visual Studio.NET.

Язык Pascal — один из наиболее популярных языков программирования для разработки базового и прикладного программного обеспечения САПР. Так, его объектно-ориентированная модификация Object Pascal составляет основу интегрированной среды разработки Delphi [25]. К настоящему времени по мощности и гибкости он сравним с языком C и используется для создания таких сложных программных продуктов, как системы управления базами данных, корпоративные информационные системы, управление проектами и др.

Язык HTML (Hyper Text Markup Language — язык разметки гипертекста) предназначен для написания Web-страниц, на которых в Интернете принято размещать информацию. Его расширениями являются языки DHTML (Dynamic HTML — динамический HTML) и XML (eXtensible Markup Language — расширяемый язык разметки). В состав Web-страницы могут входить текстовая и графическая информация, аудио- и видеoinформация, а также ссылки на другие Web-страницы. Для доступа к Web-страницам используются специальные программы — Web-обозреватели (Web-браузеры), находящиеся на компьютерах пользователей.

Язык Java для программирования сетевых приложений разработан на базе языка C++. Его основными достоинствами являются простота в использовании, аппаратная независимость и интеграция с браузерами, поэтому в настоящее время этот язык широко применяется для создания Web-приложений. Технология программирования на Java основана на создании так называемых *апплетов* (applet — «маленькое приложение»), выполняемых на маши-

нах клиентов и динамически формирующих интерфейс пользователя. Код апплета интерпретируется виртуальной Java-машиной, входящей в состав браузера ПЭВМ. Для включения апплета в Web-страницу применяется специальный тег (tag — метка). На сервере для обработки запросов, передаваемых от клиентских мест, должны выполняться специальные *сервелеты* [40].

Языки JavaScript, JScript или VBScript предназначены для написания сценариев (скриптов), использующихся для динамического управления интерфейсными компонентами Web-документа. Эти языки являются интерпретируемыми, т. е. код скрипта выполняется непосредственно в процессе интерпретации. Интерпретацию и выполнение сценариев осуществляет обозреватель или Web-сервер. Скрипты рассматриваются как расширение языка HTML и могут включаться в тело HTML-документа. Одна часть сценария может исполняться во время загрузки документа, а другая — в ответ на действия пользователя. Использование того или иного языка сценариев определяется типом применяемого обозревателя (Microsoft Internet Explorer, Netscape Navigator и др.).

Для разработки интеллектуальных САПР часто используются специализированные высокоуровневые языки Lisp, Prolog и др.

Язык Lisp применяется для решения интеллектуальных задач, таких как общение на естественном языке, доказательство теорем, принятие решений. Модификация языка — AutoLisp является встроенным языком системы AutoCAD.

Язык Prolog (PROgramming in LOGic — логическое программирование) приобрел большую популярность в Японии и Европе в связи с проектом создания ЭВМ пятого поколения, основная суть которого заключалась в переходе от обработки данных к обработке знаний. Предполагалось, что такие вычислительные системы будут обеспечивать простоту управления за счет возможности общения с пользователями при помощи естественного языка. Эти системы должны были самообучаться, использовать накапливаемые в памяти знания для решения различного рода задач, предоставлять пользователям экспертные консультации. В качестве основной методологии разработки программных средств для проекта ЭВМ пятого поколения было избрано логическое программирование. В 1991 г. предполагалось создать первый прототип компьютеров пятого поколения* Несмотря на то что поставленные цели

* На конференции в Токио в 1992 г. был продемонстрирован образец ЭВМ пятого поколения с машиной логических выводов PIM и базой знаний «Каппа-Р». — Прим. ред.

в полной мере не были достигнуты, проект стимулировал исследования в области искусственного интеллекта, баз знаний и экспертных систем. Для решения задач в этих областях применяют логическое программирование, ярким представителем которого и является Prolog.

Основные области применения языка Prolog:

- реализация экспертных систем и оболочек экспертных систем;
- доказательства теорем;
- создание пакетов символьных вычислений для решения уравнений, дифференцирования и интегрирования;
- перевод с одного естественного языка на другой;
- разработка прототипов прикладных программ;
- управление производственными процессами;
- создание динамических реляционных баз данных;
- создание естественно-языковых интерфейсов для существующих систем.

В 1996 г. при участии группы российских программистов датская компания Prolog Development Center (PDC) выпустила систему Visual Prolog 4.0. В состав среды были включены инструментальные средства генерации кода, конструирующие управляющую логику, интерфейс визуального программирования и многие другие средства для ускорения разработки приложений. Интересно отметить, что PDC реализует два варианта поставки Visual Prolog — коммерческий (commercial edition) и бесплатный (personal edition), последнюю версию которого можно загрузить с официального сайта <http://www.visual-prolog.com/>

Независимо от того какой язык программирования был выбран, от момента написания программы до ее реализации на ЭВМ необходимо выполнить ряд этапов. Обычно при разработке программ используется принцип модульности, т. е. разбиения сложной программы на части, каждая из которых может подготавливаться отдельно. Программа пишется в виде исходного модуля, т. е. текста на определенном языке программирования.

Следующим этапом подготовки программы является обработка исходного модуля макропроцессором. Макропроцессор обрабатывает текст программы, и на его выходе получается промежуточный результат в виде новой редакции исходного текста. В большинстве систем программирования макропроцессор совмещен с транслятором, и пользователю не видны его работа и промежуточный результат. Макропроцессор выполняет обработку текста для подготовки ее к следующему этапу — трансляции.

Трансляция заключается в преобразовании программы, представленной на одном языке программирования, в программу на другом языке программирования, в определенном смысле равносильную первой. Как правило, выходным языком транслятора является машинный язык целевой вычислительной системы, т. е. той системы, где программа будет выполняться. Трансляторы обычно разделяют на ассемблеры и компиляторы — в зависимости от исходного языка программы, которую они обрабатывают. Ассемблеры работают с автокодами (символьный язык программирования, предложения которого по своей структуре в основном подобны командам и обрабатываемым данным конкретного машинного языка) или языками Ассемблера, компиляторы — только с языками высокого уровня.

Заметим, что результатом трансляции является объектный модуль на языке, близком к машинному, поэтому в нем уже не остается признаков того, на каком первоначальном языке был написан программный модуль. Это создает принципиальную возможность создавать программы из модулей, написанных на разных языках. Специфика исходного языка, однако, может сказываться на физическом представлении базовых типов данных, способах обращения к процедурам/функциям и т. п.

Значительную часть объектного модуля составляют команды и данные машинного языка именно в той форме, в какой они будут существовать во время выполнения программы. Тем не менее программа в общем случае состоит из нескольких модулей. Поскольку транслятор обрабатывает только один конкретный модуль, он не может должным образом обработать те части этого модуля, в которых запрограммированы обращения к данным или процедурам, определенным в другом модуле. Такие обращения называются внешними ссылками. Те места в объектном модуле, где содержатся внешние ссылки, транслируются в некоторую промежуточную форму, подлежащую дальнейшей обработке. Другими словами, объектный модуль — это программа на машинном языке с неразрешенными внешними ссылками.

Разрешение внешних ссылок выполняется на следующем этапе подготовки, который обеспечивается специальным редактором связей, или компоновщиком. Редактор связей объединяет все объектные модули, входящие в программу. Поскольку для компоновщика доступны уже все компоненты программы, он имеет возможность обработать те места в объектных модулях, которые содержат внешние ссылки. Результатом работы редактора связей является загрузочный модуль, который представляет собой программный

модуль в форме, пригодной для загрузки в оперативную память для исполнения. Загрузочный модуль сохраняется в виде файла на внешней памяти. Для выполнения программа должна быть перенесена (загружена) в оперативную память. Эта функция выполняется специальным загрузчиком, который обычно входит в состав операционной системы.

Иногда используется вариант, подразумевающий прямое исполнение исходного модуля. Такой вариант получил название интерпретация, т. е. реализация смысла некоторого синтаксически законченного текста, представленного на конкретном языке. Интерпретация от трансляции отличается тем, что перевод исходной программы в исполняемую совмещен во времени, т. е. строка текста исходной программы анализируется и тут же исполняется.

Применение трансляторов приводит к меньшим затратам машинного времени, но к большим затратам машинной памяти, чем при интерпретации, поэтому для исполнения программ в большинстве случаев применяют трансляторы, а значительная часть прикладного программного обеспечения имеет загрузочный модуль. В случае сетевых приложений (например, Web-приложений или Web-страниц) единственным возможным способом запуска программы становится интерпретация, поэтому такие языки, как HTML, XML, Java, PHP, Perl и другие, являются интерпретируемыми.

Совокупность языка программирования и соответствующего ему языкового процессора называют системой программирования. В последние годы появились так называемые интегрированные среды разработки (IDE — Integrated Development Environment), пользовательский интерфейс которых служит для организации взаимодействия с пользователем. С помощью средств интегрированной среды разработчику удобно проектировать интерфейсную часть приложения, а также писать программный код. В интегрированной среде разработки проходят все этапы создания программного продукта, включая отладку. Как правило, в IDE совмещены функции интерпретатора и компилятора. Режим интерпретации используется в основном для отладки программного кода, а режим компиляции — для создания исполняемых загрузочных модулей (исполняемых файлов). Все современные IDE поддерживают визуальный стиль проектирования приложений и принципы объектно-ориентированного подхода. Наиболее популярными IDE являются Delphi, C++ Builder фирмы Borland, а также Visual Basic и Visual Studio.NET фирмы Microsoft.

Вторая группа языковых средств лингвистического обеспечения САПР представлена языками и проектирования, служа-

щими для обмена информацией между пользователем и ЭВМ об объектах и процессе проектирования. В САПР приходится не только получать численные решения задач, но и автоматизировать описание объектов, процессы обработки данных, ввода графических изображений, схем, чертежей и т. п. Для этой цели и служат языки проектирования, среди которых выделяют входные и выходные языки, языки сопровождения, промежуточные и внутренние языки [2].

Входные языки предназначены для задания исходной информации об объектах и целях проектирования. Во входных языках выделяют схемные, графические языки и языки моделирования.

Схемные языки применяются для описания электрических принципиальных и функциональных схем и содержат данные об элементах схем и их связях друг с другом.

Графические языки необходимы для ввода графической информации — чертежей, схем, изображений и т. п. Геометрия деталей задается координатным, структурно-символическим (например, с использованием свойств типовых графических элементов), аналитическим (в виде математических уравнений поверхностей и линий) и мозаичным способами. При этом используются графические примитивы и элементарные графические операции.

Языки моделирования близки к алгоритмическим языкам и применяются для описания процессов в моделируемом объекте.

Выходные языки используются для представления результатов проектирования в удобной для проектировщика форме таблиц, графиков, чертежей, диаграмм, текста. При этом необходимо обеспечить соблюдение требований стандартов на оформление конструкторской, программной и технологической документации.

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 принято объединять под общим названием диалоговый язык. Современные диалоговые языки широко используют средства машинной графики.

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

Внутренние языки устанавливают единую форму представления информации в памяти ЭВМ путем использования определенных соглашений об интерфейсах отдельных программ, что делает САПР открытой по отношению к новым элементам программного обеспечения.

Примерами современных языков проектирования служат языки описания аппаратуры HDL (Hardware Description Language), предназначенные для использования на всех этапах разработки цифровых электронных систем — проектирования, верификации, синтеза и тестирования, модификации и сопровождения. Наиболее универсальным и распространенным языком описания аппаратуры является VHDL. На этом языке возможно как поведенческое, так и структурное и потоковое описание цифровых схем. Язык VHDL используется во многих системах для моделирования цифровых схем (OrCAD), проектирования программируемых логических интегральных микросхем, базовых матричных кристаллов, заказных интегральных микросхем.

Другим примером может служить встроенный язык Spice системы схемотехнического моделирования, позволяющий создавать математические модели электрических схем на основе моделей элементов и схемы их соединений.

В системе подготовки конструкторской документации AutoCAD имеется встроенный язык проектирования AutoLisp — модификация языка Lisp, имеющая функции доступа к объектам, таблицам и словарям системы AutoCAD. Основой языка является работа со списками, которые могут иметь произвольную длину и включать элементы разной природы (числа, текстовые строки, указатели файлов и т. д.). В то же время в языке доступны обычные арифметические вычисления, логические операции, работа с файлами и т. д. С помощью языка AutoLisp можно писать программы или вводить в командной строке выражения, которые затем вычисляет система AutoCAD. Для чтения и разбора выражений в систему AutoCAD встроен интерпретатор AutoLisp.

Третью группу языков лингвистического обеспечения САПР образуют языки управления [2]. Они необходимы для формирования управляющих команд производственным и технологическим оборудованием, периферийными устройствами ЭВМ, системами мониторинга, диагностики, измерений и контроля. Типичный пример — язык управления станками с ЧПУ.

Для связи ЭВМ с различной внешней аппаратурой и устройствами используются так называемые драйверы — специальные программы, непосредственно взаимодействующие с реальными ап-

паратными компонентами. При разработке драйверов могут использоваться разные языки высокого и низкого уровней.

3.4. Информационное обеспечение САПР

В настоящее время непрерывно возрастает доля машинного времени по обработке информации, и в ближайшем будущем она составит свыше 80 % общего машинного времени [2]. Бессистемное хранение информации не может обеспечить ее успешную обработку. Поэтому возникла необходимость построения развитых информационных систем, реализующих автоматизированный процесс сбора, хранения и обработки данных.

Совокупность баз данных, систем управления ими и набор прикладных программ (приложений баз данных) составляют ядро информационного обеспечения САПР.

3.4.1. Базы данных и системы управления ими

База данных (БД) представляет собой совокупность данных различного характера, отображающих состояние объектов и их отношения в рассматриваемой конкретной предметной области. Под предметной областью понимается множество объектов, которые должны быть представлены для использования в САПР. Базы данных обеспечивают хранение информации, а также удобный и быстрый доступ к ней. Информация в БД должна быть непротиворечивой, целостной, обладать минимальной избыточностью и быть защищенной от несанкционированного доступа [2, 40].

Сведения, хранимые в базах данных САПР РЭС, можно условно разделить на две основные группы: архив БД и рабочий массив БД. В архиве находятся такие сведения, которые редко изменяются, например справочные данные о типах и параметрах унифицированных деталей, приборов и элементов (транзисторов, резисторов, конденсаторов и т. п.). Кроме того, в архиве хранятся данные о типовых проектных решениях и технологических процессах, материалах, правилах и ограничениях, регламентируемых ГОСТами и нормативами, об условных графических изображениях на чертежах схем и т. д.

Рабочий массив БД включает результаты предыдущих этапов проектирования конкретных РЭС, предназначенные для использования на последующих этапах (технические описания, спецификации и другие документы, содержащие информацию о проекте). Особенностью этой части базы данных является ее более частое обновление, чем архива.

Система управления базой данных (СУБД) представляет собой совокупность языковых и программных средств, предназначенных для создания, ведения и совместного использования БД. По характеру применения выделяют персональные (локальные) и многопользовательские (сетевые или удаленные) СУБД. Персональные СУБД предоставляют возможность создания локальных БД, т. е. работающих на одном компьютере. К персональным СУБД относятся Paradox, dBase, FoxPro, Access и др. Непременной частью многопользовательских СУБД является сеть, обеспечивающая аппаратную связь ЭВМ и делающая возможной корпоративную работу множества пользователей с одними и теми же данными. Наиболее известными многопользовательскими СУБД являются Oracle, Informix, SyBase, Microsoft SQL Server, InterBase [40].

Набор прикладных программ (приложений БД) служит для обработки данных, содержащихся в БД. Необходимо заметить, что иногда термином «база данных» обозначают не только саму БД, но и приложения, обрабатывающие ее данные. Так, например, в системе сквозного проектирования печатных плат P-CAD вся информация о радиоэлектронных компонентах хранится в специальной БД — библиотеке компонентов PЭС, для управления которой используется специальный программный модуль (менеджер библиотек) Library Executive, входящий в пакет P-CAD.

Расположение БД в значительной степени влияет на характер прикладной программы, обрабатывающей содержащиеся в этой базе данные. Различают одноуровневые (однозвенные), двухуровневые (двухзвенные) и многоуровневые (многозвенные) приложения БД. Одноуровневыми называют приложения, использующие локальные БД. К двухуровневым относят приложения, использующие удаленные базы данных и содержащие так называемые клиентскую и серверную части. Многоуровневые (обычно трехуровневые) приложения БД содержат клиентскую часть, сервер приложений и сервер базы данных.

В зависимости от характера СУБД (локальная или сетевая) и приложения БД (одно-, двух- или многоуровневых) различают несколько вариантов структуры информационного обеспечения САПР [1]:

- локальная структура;
- структура «файл-сервер»;
- двухуровневая структура «клиент-сервер»;
- трехуровневая структура «клиент-сервер».

Особенностью локальных БД является расположение их на одном компьютере с использующими их программами. В этом случае

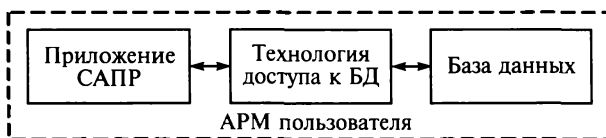


Рис. 3.3. Локальная структура баз данных

говорят, что информационная система имеет локальную структуру (рис. 3.3).

Работа с БД происходит, как правило, в однопользовательском режиме. Для управления совместным доступом к БД необходимы специальные средства контроля и защиты. Каждая разновидность БД осуществляет подобный контроль своими способами и обычно имеет встроенные средства разграничения доступа.

При использовании локальной БД в сети можно организовать многопользовательский доступ. В этом случае файлы БД и предназначенное для работы с ней программное обеспечение располагаются на сервере сети. Каждый пользователь запускает со своего компьютера это серверное приложение. Такой сетевой вариант использования локальной БД соответствует структуре «файл-сервер». Приложение для работы с БД при использовании структуры «файл-сервер» также может быть записано на каждый компьютер пользователя, при этом приложению должно быть известно местонахождение общей БД, как показано на рис. 3.4. При работе с данными на каждом пользовательском компьютере сети используется локальная копия БД, данные в которой периодически обновляются из БД на сервере.

Структура «файл-сервер» обычно применяется в сетях с небольшим числом пользователей, для ее реализации используют персональные СУБД, например Paradox или dBase. Достоинства

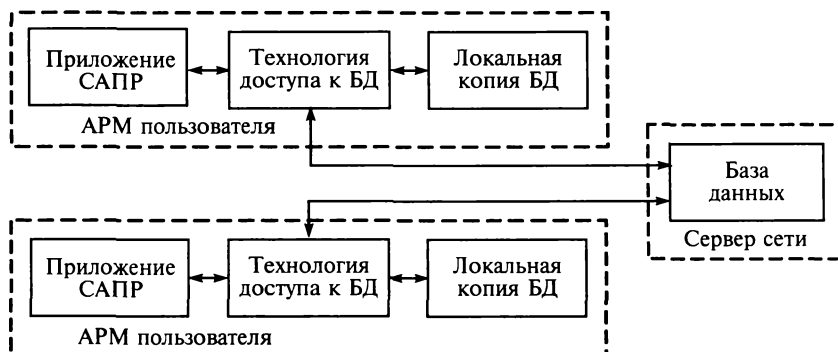


Рис. 3.4. Структура «файл-сервер»

ми этой структуры являются простота реализации, а также то, что приложение фактически разрабатывается в расчете на одного пользователя и не зависит от компьютера сети, на который оно устанавливается.

Тем не менее структуре «файл-сервер» присущ и ряд значительных недостатков, наиболее существенными из которых являются следующие. Во-первых, если пользователю необходимо несколько записей из таблицы БД, с сервера по сети пересылается вся таблица. В результате циркуляции в сети больших объемов избыточной информации резко возрастает нагрузка на сеть, что приводит к снижению ее быстродействия и, следовательно, производительности САПР в целом. Во-вторых, в связи с тем что на каждом отдельном компьютере сети имеется своя копия БД, изменения, сделанные в ней одним пользователем, в течение некоторого времени остаются неизвестными для других пользователей, поэтому требуются постоянное обновление БД и синхронизация работы пользователей. В-третьих, так как управление БД осуществляется с разных компьютеров, то в значительной степени затруднена организация управления доступом, а также соблюдение требований по защите информации и поддержания целостности БД.

Когда база данных размещается на специализированном компьютере — сервере сети, а приложение, осуществляющее работу с этой БД, находится на компьютере пользователя, то такая структура получила название «клиент-сервер» (рис. 3.5). В этом случае все информационное обеспечение САПР делится на две неоднородные части: сервер и клиент БД. В связи с тем что компьютер-сервер отделен от клиента, иногда его также называют удаленным сервером. Здесь под клиентом понимается программное обеспечение пользователя, использующее БД. Для получения данных клиент формирует и отправляет запрос удаленному серверу, на котором размещена БД. Запрос формулируется на языке SQL, являющемся стандартным средством доступа к серверу. После получения запроса удаленный сервер направляет его специальной программе (серверу баз данных), управляющей удаленной БД и обеспечивающей выполнение запроса и выдачу его результатов клиенту.

Такая структура обладает следующими достоинствами:

- снижается нагрузка на сеть;
- повышается защищенность информации, в связи с тем что обработка запросов всех клиентов выполняется единой программой, расположенной на сервере;
- упрощается клиентское ПО за счет отсутствия в нем кода, связанного с контролем БД и разграничением доступа к ней.

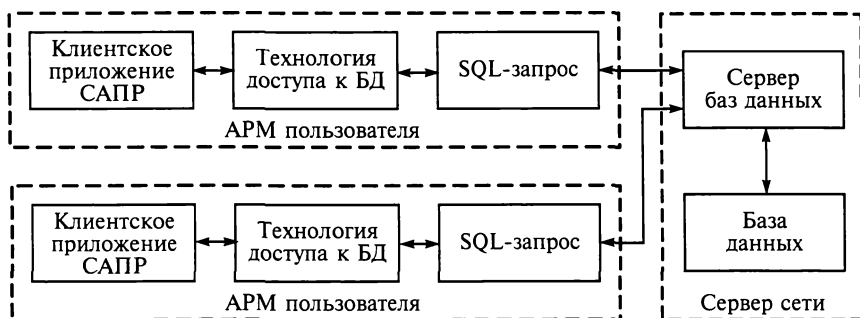


Рис. 3.5. Двухуровневая структура «клиент-сервер»

Для реализации структуры «клиент-сервер» обычно используются многопользовательские СУБД, например Oracle или Microsoft SQL Server. Часто подобные СУБД также называют промышленными, поскольку они позволяют организовать доступ к информации в БД большому числу пользователей организации или предприятия. Промышленные СУБД являются сложными системами и требуют мощной вычислительной техники и высококвалифицированного обслуживания.

Описанная структура является двухуровневой (уровень приложения клиента и уровень сервера БД). Иногда клиентское ПО также называют сильным или «толстым» клиентом. Дальнейшее развитие данной структуры привело к появлению трехуровневого варианта: приложение-клиент, сервер приложений и сервер БД (рис. 3.6).

В трехуровневой структуре часть средств и кода, предназначенных для организации доступа к данным и их обработке, из приложения клиента передается серверу приложений. Само клиентское приложение при этом называют слабым или «тонким» клиентом. В сервере приложений удобно располагать средства и код,

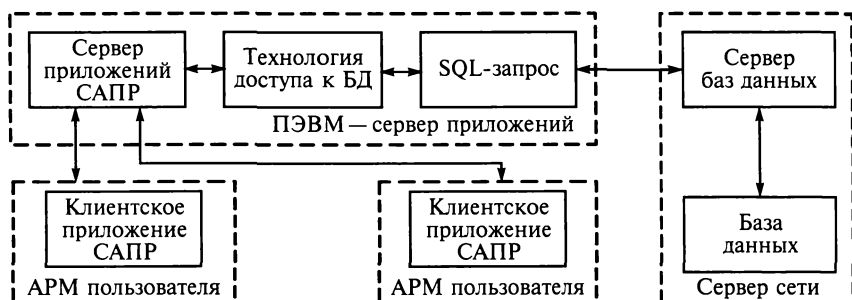


Рис. 3.6. Трехуровневая структура «клиент-сервер»

общие для всех клиентских приложений, например средства доступа к БД.

Основные достоинства трехуровневой структуры «клиент-сервер» состоят в том, что, во-первых, сервер БД разгружается от выполнения ряда операций, которые перенесены на сервер приложений, во-вторых, уменьшается размер клиентских приложений за счет упрощения кода и, в-третьих, облегчается настройка самих клиентов — при изменении общего кода сервера приложений автоматически изменяется поведение приложений-клиентов.

Какой бы структуре не было отдано предпочтение, СУБД должна предоставлять доступ к данным любым пользователям независимо от представления данных, физического размещения в памяти, технологии доступа к запрашиваемым данным и решать проблемы одновременного запроса одних и тех же данных разными пользователями, обеспечения защиты данных от несанкционированного доступа.

Для корректного выполнения всех требуемых функций СУБД должна использовать различные описания данных, поэтому проект базы данных начинают с анализа предметной области и выявления требований к ней отдельных пользователей, которыми могут быть, например, инженеры-проектировщики РЭС, для которых и создается конкретная БД. Разработка базы данных, как правило, поручается администратору базы данных (АБД). Функции АБД могут выполнять как отдельный специалист, так и группа специалистов или даже штатное подразделение, которое управляет всеми аппаратными и программными средствами базы данных [2, 40].

Объединяя представления отдельных пользователей о содержимом БД, полученные в результате опроса, и свои представления, АБД создает обобщенное неформальное описание создаваемой базы данных. Такое описание, выполненное с использованием средств естественного языка, математического аппарата и других средств, понятных всем разработчикам базы данных, называют инфологической моделью данных (рис. 3.7). Заметим, что эта модель полностью независима от физических параметров среды хранения данных.

Остальные модели, представленные на рис. 3.7, машинно-ориентированные. С их помощью СУБД позволяет программам и пользователям осуществлять доступ к необходимой информации, которая отыскивается СУБД на запоминающих устройствах по физической модели данных.

Так как доступ к данным осуществляется с помощью конкретной СУБД, модели должны быть представлены на языке описа-

ния данных этой СУБД. Это описание, создаваемое АВД по инфологической модели данных, называют даталогической моделью.

Такая трехуровневая архитектура (инфологический, даталогический и физический уровни) позволяет обеспечить независимость хранимых данных от использующих их программ. Администратор БД может при необходимости реорганизовать физическую структуру хранимых данных, изменив лишь физическую модель данных, а также подключить к системе любое число новых пользователей, дополнив даталогическую модель, причем указанные изменения физической и даталогической моделей не будут замечены существующими пользователями системы. Следовательно, независимость данных обеспечивает возможность реализации одного из рассмотренных в подразд. 3.1 принципов создания САПР — принципа развития, т. е. возможности модернизации баз данных без разрушения существующего программного обеспечения САПР.

В процессе развития теории и практического использования баз данных, а также средств вычислительной техники созданы СУБД, поддерживающие различные даталогические модели представления данных: иерархическую, сетевую, объектно-ориентированную и реляционную.

В *иерархической модели* данные представляются в виде древовидной структуры, что удобно для работы с иерархически упорядоченной информацией, однако при работе со сложными функционально-логическими связями данных иерархическая модель оказывается слишком громоздкой.

В *сетевой модели* данные организуются в виде сложных структур, состоящих из «наборов» — поименованных двухуровневых деревьев графа. Недостатками сетевой модели является жесткость структуры и высокая сложность ее реализации.

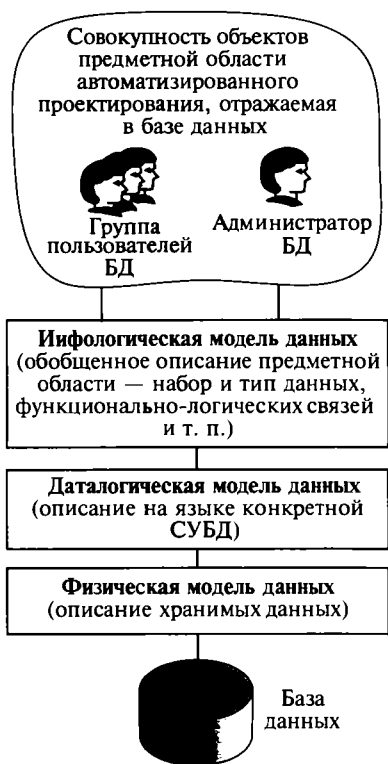


Рис. 3.7. Трехуровневое представление моделей данных

В *объектно-ориентированной модели* отдельные записи базы данных представляются в виде объектов. Между записями базы данных и функциями их обработки устанавливаются взаимосвязи с помощью механизмов, подобных соответствующим средствам объектно-ориентированных языков программирования. Объектно-ориентированные модели сочетают особенности сетевой и реляционной моделей и используются для создания крупных БД со сложными структурами данных.

Реляционная модель основана на использовании для обработки данных математического аппарата теории множеств. В данной модели любое представление данных сводится к совокупности двумерных таблиц особого вида, связанных между собой отношениями (relation). Достоинствами реляционной модели данных являются простота, гибкость структуры, возможность математического описания и удобство реализации на ЭВМ. Необходимо заметить, что большинство современных БД являются реляционными.

3.4.2. Реляционные базы данных

Реляционная база данных состоит из взаимосвязанных таблиц, содержащих информацию об объектах одного типа, а совокупность всех таблиц образует единую БД. Каждая таблица БД состоит из строк и столбцов и предназначена для хранения данных об однотипных объектах информационной системы САПР. Строки таблицы называются записями, столбцы таблицы — полями. Каждое поле должно иметь уникальное в пределах таблицы имя.

На рис. 3.8 схематично изображен фрагмент таблицы базы данных со справочной информацией о транзисторах. Для представления в БД традиционному наименованию полей соответствуют уникальные имена A, B, C, D и E.

Поле может содержать символьные или числовые данные одного из допустимых типов. Необходимо заметить, что особенности организации таблиц зависят от конкретной СУБД, при этом существуют общие правила создания таблиц. Основу таблицы составляет описание ее полей, каждая таблица должна иметь хотя бы одно поле. С таблицей можно выполнять следующие операции: создание, т. е. определение структуры, реструктуризация, переименование и удаление.

Понятие структуры таблицы является более широким и включает описание полей, ключ, индексы, ограничения на значения полей, ограничения ссылочной целостности между таблицами и пароли [2, 40].

Тип транзистора	Коэффициент усиления $h_{21э}$	Максимально допустимая рассеиваемая мощность коллектора $P_{к\text{ max}}$, Вт	Максимально допустимый ток коллектора $I_{к\text{ max}}$, А	Зарубежный аналог
А	В	С	Д	Е
КТ342А	150	0,25	0,05	BCY58А
КТ819А	30	60	10	BD705
КТ814А	50	10	1,5	BD166
КТ827А	1000	125	20	BDX85C
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Рис. 3.8. Фрагмент таблицы базы данных «Транзисторы»

Ключ представляет собой комбинацию полей, данные в которых однозначно определяют каждую запись в таблице. Простой ключ состоит из одного поля, а составной — из нескольких полей. Поля, по которым построен ключ, называют ключевыми. В каждой таблице может быть определен только один ключ, обеспечивающий однозначную идентификацию записей таблицы, ускорение выполнения запросов к БД, установление связи между отдельными таблицами БД. Иногда ключ также называют первичным или главным индексом.

Необходимо заметить, что таблицы различных форматов имеют свои особенности построения ключей, но тем не менее существуют общие требования:

- ключ должен быть уникальным, достаточным и не избыточным, т.е. он не содержит поля, которые можно удалить без нарушения уникальности ключа;
- в состав ключа не могут входить поля некоторых типов, например поле с графическими данными или поле с комментариями.

Выбор ключевого поля не всегда прост и однозначен, особенно для таблиц, содержащих множество полей. Нежелательно выбирать в качестве ключевых поля, содержащие, например, фамилии людей в таблице проектировщиков какого-либо изделия РЭС или названия готовой продукции, заготовок или компонентов РЭС в таблице данных склада. В этом случае высока вероятность существования однофамильцев, изделий с одинаковыми названиями, которые различаются, к примеру, цветом, климатическим исполне-

нием, набором дополнительной комплектации. Для подобных таблиц в качестве ключа можно использовать, например, поле кода сотрудника и поле артикула изделия, причем указанные значения должны быть уникальными.

Как и ключ, индекс представляет собой своеобразное оглавление таблицы, которое просматривается перед обращением к ее записям. Индекс также строят по полям таблицы, однако его главной особенностью является то, что он может допускать повторение значений составляющих его полей. Поля, по которым построен индекс, называют индексными. Простой индекс состоит из одного поля, а составной (сложный) — из нескольких полей. Индексы при их создании именуются. Использование индекса позволяет увеличить скорость поиска данных, проводить сортировку записей таблицы, устанавливать связи между отдельными таблицами БД.

Одной из главных задач СУБД является обеспечение быстрого доступа к данным (поиска данных). Время доступа к данным в значительной степени зависит от используемых для поиска методов и способов. В настоящее время используют следующие методы доступа к данным таблиц: последовательный, прямой и индексно-последовательный.

При *последовательном доступе* выполняются поочередный просмотр всех записей таблицы и выбор из них требуемых. Существенным недостатком метода являются значительные временные затраты на поиск, прямо пропорциональные числу записей таблицы. Поэтому его используют, как правило, только для относительно небольших таблиц.

При *прямом доступе* выбор нужной записи в таблице осуществляется на основании ключа или индекса. При этом просмотр других записей не выполняется.

Индексно-последовательный доступ включает в себя элементы последовательного и прямого методов доступа и используется при поиске группы записей. Сущность метода заключается в том, что находится индекс первой записи, удовлетворяющей заданным условиям, и соответствующая запись выбирается из таблицы (прямой доступ). После обработки первой найденной записи осуществляется последовательный переход к следующему значению индекса, и в таблице выбирается запись, соответствующая значению этого индекса.

Достоинством прямого и индексно-последовательного методов является максимально возможная скорость доступа к данным, а недостатком — расход памяти ЭВМ на хранение информации о ключах и индексах.

Указанные методы доступа реализуются СУБД и не требуют специального программирования, а задачей разработчика является определение соответствующей структуры БД, и в том числе определение ключей и индексов. Например, если для поля создан индекс, то при поиске записей по этому полю автоматически используется индексно-последовательный метод доступа, а если индекс отсутствует — то последовательный метод.

Кроме рассмотренных методов доступа к данным при выполнении операций с таблицами используется один из следующих способов доступа к данным — навигационный или реляционный.

Навигационный способ доступа заключается в обработке каждой отдельной записи таблицы и обычно используется в локальных или удаленных БД небольшого размера. Если необходимо обработать несколько записей, то они обрабатываются поочередно.

Реляционный способ доступа основан на SQL-запросах, предназначен для обработки группы записей и ориентирован на выполнение операций с удаленными БД, несмотря на то что его можно использовать и для локальных БД.

Способ доступа к данным выбирается программистом и зависит от средств доступа к БД, используемых при разработке приложения. Следовательно, методы доступа к данным определяются структурой БД, а способы доступа — приложением.

В частном случае БД может состоять из одной таблицы, однако, как правило, реляционная БД включает набор взаимосвязанных таблиц. Процесс организации связи между таблицами получил название связывание или соединение таблиц. Связи между таблицами можно устанавливать как при создании БД, так и при выполнении соответствующего приложения САПР при помощи средств, предоставляемых СУБД. Для связи таблиц используются так называемые поля связи, или совпадающие поля. Поля связи обязательно должны быть индексированными. В подчиненной таблице для связи с главной таблицей задается индекс, называемый *внешним ключом*. Состав полей этого индекса должен полностью или частично совпадать с составом полей индекса главной таблицы.

На рис. 3.9 показан упрощенный пример схемы связи между двумя таблицами, в названия полей которых включены префиксы, указывающие на принадлежность поля соответствующей таблице. Так, названия полей главной таблицы начинаются с буквы М (Master), а подчиненной таблицы — с буквы D (Detail). Такой принцип именования полей облегчает ориентацию в их названиях, особенно при большом количестве таблиц. В главной таблице со-



Рис. 3.9. Схема связи между таблицами базы данных

держание полей аналогично соответствующим полям на рис. 3.8 (тип транзистора, коэффициент усиления, мощность, ток и аналог), а поля D_А, D_В и D_С подчиненной таблицы содержат информацию о складах комплектующих, их наличии и количестве соответственно.

В главной таблице (см. рис. 3.9) определен ключ, построенный по полю M_А, а в подчиненной — индекс, составленный по полю D_А. Связь между таблицами устанавливается по полям D_А и M_А. Индекс по полю D_А является внешним ключом.

Связь между таблицами определяет отношение подчиненности, при котором одна таблица является главной (иногда называемой родительской или мастером — Master), а вторая — подчиненной (в другой терминологии дочерней или детальной — Detail). Существуют следующие виды связи: «один-к-одному», «один-ко-многим», «многие-к-одному» и «многие-ко-многим» [40].

Отношение «один-к-одному» означает, что одной записи в главной таблице соответствует одна запись в подчиненной таблице, и обычно используется при разбиении таблицы с множеством полей на несколько отдельных таблиц. В этом случае в первой таблице остаются поля с наиболее важной информацией, а остальные поля переносятся в другие таблицы.

Отношение «один-ко-многим» встречается наиболее часто и означает, что одной записи главной таблицы может соответствовать как несколько записей в подчиненной таблице, так и ни одной. После установления связи между таблицами при перемещении на какую-либо запись в главной таблице в подчиненной автоматически становятся доступными записи, у которых значение поля связи равно значению поля связи текущей записи главной таблицы. Типичным примером является, например, организация учета расхода комплектующих при сборке изделий РЭС, для чего удобно создать две таблицы:

- таблицу готовой продукции, содержащую такую информацию об изделиях, как наименование, шифр, годовой объем выпуска;
- таблицу комплектующих, в которую заносятся данные о выдаче необходимых ЭРЭ для сборки изделия и о возврате дефектных элементов.

В этой ситуации главной является таблица готовой продукции, а подчиненной — таблица комплектующих. В одном изделии РЭС обычно содержится множество разнообразных ЭРЭ, поэтому одной записи в главной таблице может соответствовать множество записей в подчиненной таблице. Если на сборку изделия еще не выдавались комплектующие, то для него нет записей в подчиненной таблице. После связывания обеих таблиц при выборе записи с данными конкретного изделия в таблице комплектующих будут доступны только записи с данными об ЭРЭ, примененных в этом изделии.

Отношение «многие-ко-многим» имеет место, когда одной записи главной таблицы может соответствовать несколько записей подчиненной таблицы и одновременно одной записи подчиненной таблицы — несколько записей главной. На практике отношение «многие-ко-многим» реализуется редко из-за сложности организации связи между таблицами и взаимодействия между их записями. Кроме того, для данного отношения понятия главной и подчиненной таблиц не имеют смысла.

Среди рассмотренных наиболее общим является отношение «один-ко-многим», другие же виды отношений по сути являются его вариантами. Так, отношение «один-к-одному» представляет собой частный случай отношения «один-ко-многим», а отношение «многие-к-одному» является его зеркальным отображением. Отношение «многие-ко-многим» сводится путем преобразования и деления таблиц к отношению «один-ко-многим».

Одно из наиболее главных требований к ВД — обеспечение целостности и непротиворечивости информации, хранящейся в ВД.

Одним из путей выполнения этого требования является использование механизма транзакций.

Транзакция представляет собой выполнение последовательности операций, переводящих БД из одного целостного состояния в другое. Использование транзакций необходимо при выполнении последовательности взаимосвязанных операций с БД, а также при многопользовательском доступе к БД. При этом возможны две ситуации.

1. Успешно выполнены все операции. В этом случае транзакция также считается успешной, все изменения в БД, которые были произведены в рамках транзакции отдельными операциями, подтверждаются, и в результате БД переходит из одного целостного состояния в другое.

2. Неудачное завершение одной или нескольких операций. При этом вся транзакция считается неуспешной, и результаты выполнения всех, даже успешно выполненных операций, отменяются, и происходит возврат БД в состояние, в котором она находилась до начала транзакции.

Часто в транзакцию объединяют операции над несколькими таблицами, в том случае когда необходимо внесение в разные таблицы взаимосвязанных изменений, например осуществляется перенос записей из одной таблицы в другую. Здесь возможна ситуация, когда запись из одной таблицы уже удалена, но во вторую таблицу еще не попала, что бывает, в частности, при сбое электропитания компьютера. Если же запись сначала заносится во вторую таблицу и только потом удаляется из первой, тогда сбой может привести к появлению одной записи в двух таблицах. И в первом и во втором случае нарушается целостность и непротиворечивость БД. Именно поэтому операции удаления записи из одной таблицы и занесения ее в другую таблицу объединяют в одну транзакцию, выполнение которой гарантирует, что при любом ее результате целостность БД нарушена не будет.

Для реализации механизма транзакций СУБД предоставляют ряд средств, в том числе бизнес-правила. Бизнес-правила — это механизмы управления БД, не имеющие отношения к бизнесу как к предпринимательству и предназначенные для поддержания БД в целостном состоянии, а также выполнения некоторых других действий (например, накапливания статистических данных по работе с БД).

Бизнес-правила реализуют следующие ограничения БД:

- задание допустимого диапазона значений и значений по умолчанию;

- обеспечение уникальности значения;
- запрет пустого значения;
- ограничения ссылочной целостности.

Бизнес-правила реализуются на физическом и (или) программном уровнях. В первом случае эти правила задаются при создании таблиц и входят в структуру БД. При этом заданное на физическом уровне ограничение в дальнейшей работе с БД нельзя нарушить или обойти. Во втором случае бизнес-правила определяются на программном уровне, причем действие этих правил распространяется только на приложение, в котором они реализованы. Преимущество такого подхода заключается в простоте изменения бизнес-правил, а недостаток — в снижении безопасности БД, так как каждое приложение может устанавливать свои правила управления БД.

Проектирование реляционной БД начинается с разработки структуры данных, т. е. с определения состава таблиц и связей между ними. Иногда проектирование структуры БД называют проектированием на логическом уровне. В качестве основных критериев оценки эффективности структуры БД рассматриваются скорость доступа к данным, отсутствие дублирования и целостность данных.

При проектировании структуры БД выделяют три основных подхода.

1. Сбор информации об объектах решаемой задачи в рамках одной таблицы и последующее разбиение ее на несколько взаимосвязанных таблиц.
2. Определение типов исходных данных, их взаимосвязей и требований к обработке данных, а затем получение структуры БД с помощью CASE-средств.
3. Использование методов системного анализа для структурирования информации.

Различают два способа проектирования БД: ручное и автоматизированное. Ручное проектирование применяется для разработки относительно небольших БД. Однако во многих пакетах САПР используются крупные базы данных, состоящие из нескольких десятков или сотен различных взаимосвязанных таблиц. Для облегчения проектирования таких БД предназначены программные средства класса ETL (Extract Transfer Load), которые обеспечивают извлечение, приведение к общему формату, преобразование и загрузку данных в хранилища, а также системы автоматизации разработки приложений — средства CASE. Средства CASE (Computer Aided Software Engineering) представляют собой набор

программ, поддерживающих процессы создания и сопровождения сложных информационных систем. К таким программам относятся средства анализа и формулировки требований, проектирования БД и соответствующего программного обеспечения, генерации кода, верификации, тестирования, контроля качества, управления конфигурацией и проектом в целом. Система CASE включает в себя набор CASE-средств определенного функционального назначения в виде единого программного продукта.

CASE-системы для разработки баз данных классифицируют по ориентации на этапы жизненного цикла, функциональной полноте, типу используемых моделей, степени независимости от СУБД и программно-аппаратной платформе.

По ориентации на этапы жизненного цикла выделяют следующие основные типы CASE-систем:

- системы построения и анализа моделей предметной области, например Design/IDEF фирмы Meta Software и AllFusion Process Modeler (прежнее название BPWin) фирмы Computer Associates;
- системы анализа и проектирования, позволяющие создавать проектные спецификации, такие, как Vantage Team Builder фирмы Cayenne, Silverrun (Silverrun Technologies), PRO-I (McDonnell Douglas);
- системы проектирования БД, например AllFusion ERwin Data Modeler (Computer Associates), S-Designer (SPD) и DataBase Designer (Oracle);
- системы разработки приложений — Uniface (Compuware), JAM (JYACC), PowerBuilder (Sybase), Developer/2000 (Oracle), New Era (Informix), SQL Windows (Centura), Delphi (Borland).

По функциональной полноте CASE-системы условно делятся на следующие группы:

- системы, предназначенные для решения частных задач на одном или нескольких этапах жизненного цикла, например AllFusion ERwin Data Modeler, S-Designer и Silverrun (Silverrun Technologies);
- интегрированные системы, поддерживающие весь жизненный цикл информационной системы, например Vantage Team Builder и система Designer/2000 совместно с Developer/2000.

По типу моделей CASE-системы бывают трех видов: структурные, объектно-ориентированные и комбинированные.

Структурные системы CASE основаны на методах структурного и модульного программирования, структурного анализа и синтеза, например Vantage Team Builder.

Объектно-ориентированные CASE-системы позволяют сократить сроки разработки, повысить надежность и качество функционирования информационной системы. Типичными примерами объектно-ориентированных систем CASE являются Rational Rose фирмы Rational Software и Object Team фирмы Cayenne.

Комбинированные CASE-системы, например Designer/2000, поддерживают одновременно и структурное, и объектно-ориентированное программирование.

По степени независимости от СУБД среди CASE-систем выделяют две группы: независимые и встроенные в СУБД:

- независимые CASE-системы поставляются в виде автономных средств, не входящих в состав конкретной СУБД и обычно поддерживающих несколько форматов баз данных. К числу независимых относятся SDesigner, AllFusion ERwin Data Modeler и Silverrun;
- встроенные CASE-системы, как правило, поддерживают только один формат базы данных, в состав СУБД которой они входят. Примером встроенной системы является система Designer/2000, входящая в состав СУБД Oracle.

По программно-аппаратной платформе различают CASE-системы, ориентированные на работу с определенными типами ПЭВМ и операционных систем, под управлением которых возможно использование программного продукта, созданного с помощью конкретной CASE-системы.

3.5. Техническое обеспечение САПР

Техническое обеспечение систем автоматизированного проектирования в целом представлено совокупностью взаимосвязанных устройств, предназначенных для аппаратной поддержки проектирования автоматизированным способом. Техническое обеспечение условно делится на группы вычислительного, сетевого, периферийного и другого оборудования (рис. 3.10).

К техническому обеспечению САПР предъявляются следующие требования [1, 2, 21]:

- удобство использования инженерами-проектировщиками, возможность оперативного взаимодействия пользователей со средствами вычислительной техники, поддержка интерактивного режима работы;
- достаточная производительность ПЭВМ для решения задач всех этапов жизненного цикла проекта за приемлемое время;

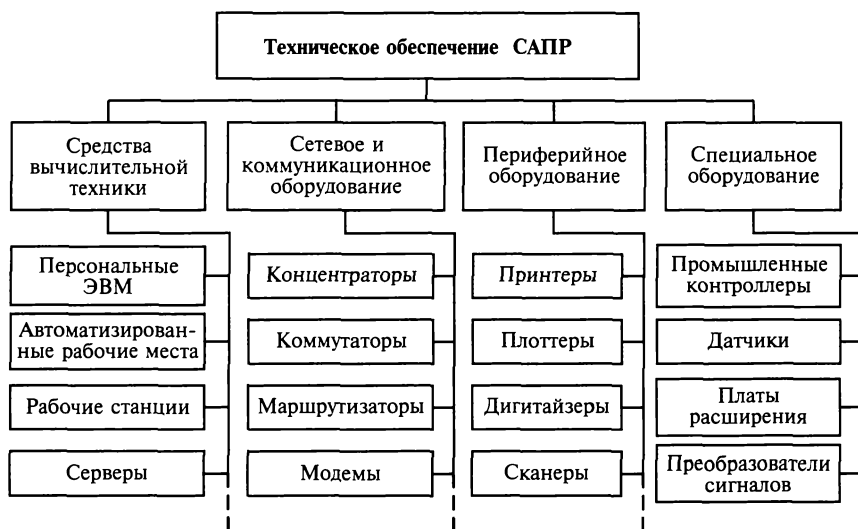


Рис. 3.10. Структура технического обеспечения САПР

- возможность одновременной работы необходимого числа специалистов для совместной деятельности над проектом;
- открытость комплекса технических средств для расширения и модернизации системы по мере совершенствования и развития техники;
- высокая надежность, приемлемая стоимость и др.

Удовлетворение перечисленных требований возможно при наличии средств вычислительной техники с достаточной производительностью, емкостью памяти, устройствами ввода-вывода текстовой и графической документации, соединенных друг с другом каналами связи для совместного использования данных. Средства связи обеспечивают физическое соединение узлов системы передачи данных и могут использовать как открытое пространство (все виды беспроводной связи), так и физическую среду (например, металлические или волоконно-оптические кабели). Иногда систему передачи данных представляют как соединение двух конечных узлов по общему каналу связи. Все узлы должны состоять из оконечного оборудования данных (ООД), аппаратуры передачи данных (АПД) и интерфейса [33].

Примерами ООД служат дисплеи, принтеры, персональные ЭВМ и т. п. В ООД можно выделить оконечные устройства, клиенты и серверы. Оконечные устройства (терминалы) используют для операций ввода-вывода и отображения информации (клавиатура,

Основные типы сетей

Тип сети	Краткая характеристика
Локальная сеть (LAN — Local Area Network)	Объединяет ЭВМ в рамках одного отдела проектной организации или предприятия
Городская сеть (MAN — Metropolitan Area Network)	Объединяет ЭВМ на территории города
Региональная сеть (WAN — Wide Area Network)	Объединяет ЭВМ на территории региона или страны
Глобальная сеть (GAN — Global Area Network)	Объединяет ЭВМ по всему миру
Персональная сеть (PAN — Personal Area Network)	Обеспечивает обмен данными между пользователем и ЭВМ через тело человека посредством прикосновений
Сеть, организованная по линиям электропередачи (PLAN — Power Line Area Network)	Позволяет использовать для передачи данных линии электропередачи переменного тока и не имеет ограничений по числу присоединяемых ЭВМ

плоттер, сканер и монитор). Клиентами в данном случае являются ПЭВМ, АРМ, рабочие станции. Серверы поддерживают базы данных и программы, а также передают информацию клиентам и оконечным устройствам.

Аппаратурой передачи данных называют оборудование для сопряжения ООД с каналом связи. По своей сути АПД представляет собой устройство для преобразования сигналов, поступающих от ООД в форму, удобную для передачи по каналу связи. Типичными примерами АПД являются модем и сетевая плата.

Любая группа соединенных между собой каналами связи узлов рассматривается как сеть передачи данных, а процесс совместного использования ресурсов сети несколькими устройствами называют передачей данных по сети. В простейшем случае сеть передачи данных состоит из двух или нескольких ПЭВМ, соединенных общей средой передачи.

Наиболее часто сети классифицируют по их размеру с учетом охвата географической территории, расстояния между узлами, числу ПЭВМ, скорости передачи данных, среды передачи и физической архитектуры (табл. 3.1) [33].

Локальные сети используются, как правило, в небольших проектных организациях или отделах предприятия и объединяют не более нескольких десятков компьютеров, совместно использующих ресурсы данных одного или нескольких серверов. С помощью се-

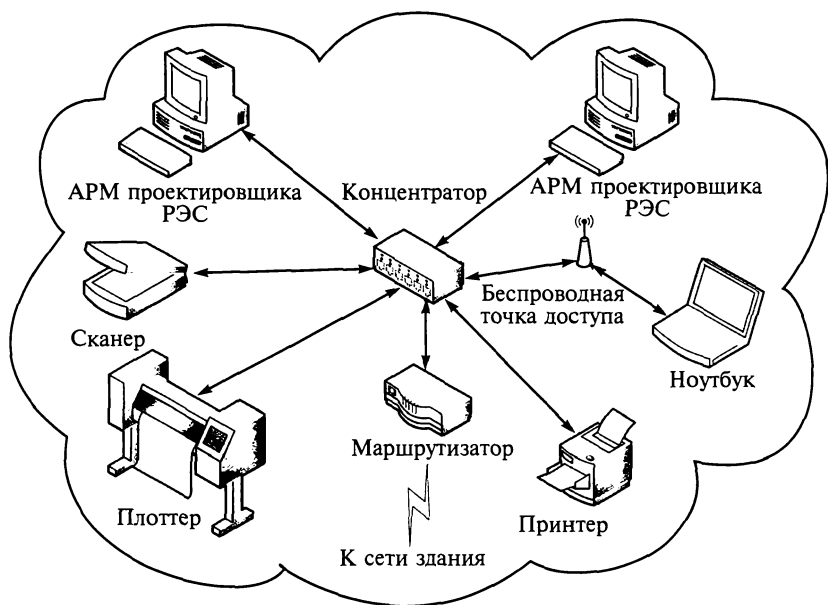


Рис. 3.11. Пример схемы локальной компьютерной сети

товой ОС локальные сети обеспечивают двустороннюю связь на скоростях от 10 до 1 000 Мбит/с между различными устройствами передачи данных в пределах одного помещения, здания или комплекса зданий (рис. 3.11).

Сеть здания называют сеть, связывающую локальные сети различных подразделений одного предприятия внутри одного здания. Как правило, сеть здания включает в себя коммутатор или маршрутизатор (рис. 3.12) для соединения с другими сетями [33].

Сеть комплекса зданий объединяет локальные сети разных зданий одного предприятия, расположенных относительно близко друг от друга, как показано на рис. 3.13. Такие сети применяются на территориях промышленных предприятий, научно-исследовательских центров, университетов и других организаций с развитой инфраструктурой. Обычно при реализации сети комплекса зданий в качестве передающей среды используют волоконно-оптические кабели, соединяющие маршрутизаторы и коммутаторы.

Сеть предприятия состоит из некоторых или всех рассмотренных выше сетевых конфигураций (сети зданий и комплексов зданий), объединенных в систему с общим управлением.

Городская компьютерная сеть представляет собой высокоскоростную сеть, охватывающую крупную территорию (от пяти до

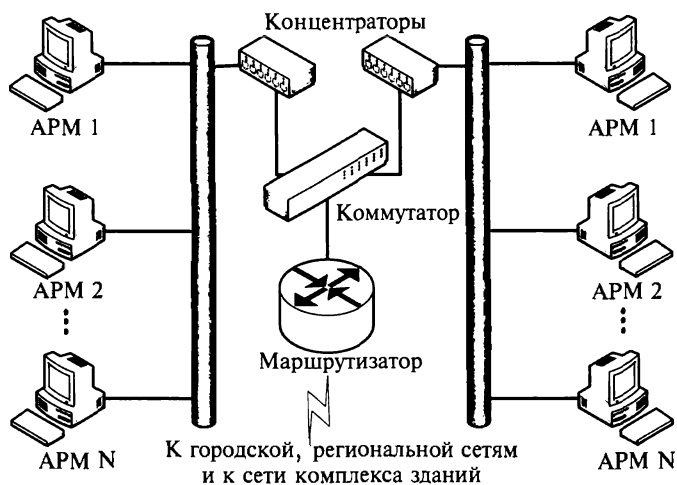


Рис. 3.12. Фрагмент схемы сети здания

нескольких сотен километров), например территорию всего города. Городская сеть может быть единой либо объединять две или более локальные сети, что позволяет им совместно использовать ресурсы данных. Крупные предприятия часто объединяют в такую сеть все свои локальные сети.

Региональные сети обеспечивают передачу данных на большие расстояния (от ста до нескольких тысяч километров) в пределах крупных и рассредоточенных регионов, например страны или целого континента.

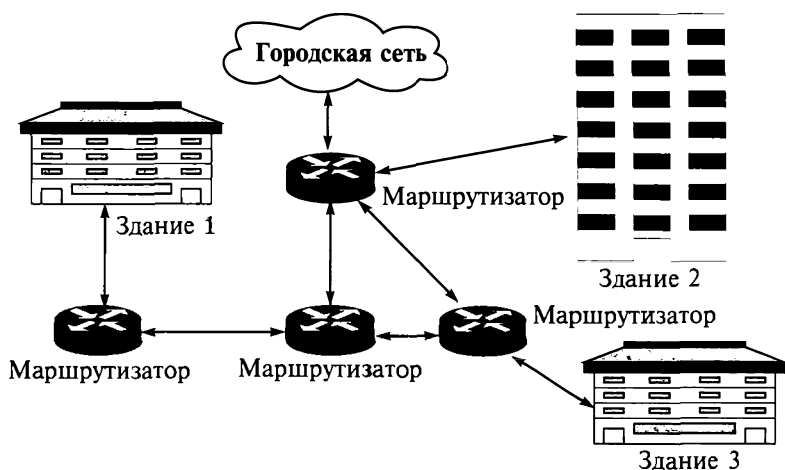


Рис. 3.13. Сеть комплекса зданий

Глобальные сети обеспечивают связь между странами по всему миру. Наиболее известным примером глобальной сети является Интернет, объединяющий другие сети, связывая между собой страны мира. Использование глобальной сети позволяет обмениваться опытом разработок между специалистами различных проектных организаций, осуществлять международные проекты и т. п.

Структура любой сети передачи данных показывает, как различные компоненты сети — компьютеры, периферийные устройства, кабели и другое оборудование — соединяются между собой физически и логически. Такая структура получила название *топология сети*.

В общем виде выделяют двухточечную и многоточечную топологии [33]. Двухточечная топология используется в сетях, переносящих цифровую информацию только между двумя узлами. Например, часто двухточечные каналы передачи данных соединяют между собой две ЭВМ или ЭВМ с любым другим цифровым оборудованием с высокой пропускной способностью. Многоточечная топология объединяет три или более узла с использованием единой среды передачи. Наибольшее распространение получили звездообразный, шинный, кольцевой, решетчатый и гибридный виды многоточечной топологии.

Звездообразная топология определяет сеть передачи данных, в которой удаленные узлы (например, АРМ) с помощью кабеля соединяются с центральным компьютером-концентратором, выполняющим функцию многоконтактного соединителя (рис. 3.14, а). При такой топологии удаленные узлы не могут непосредственно соединяться друг с другом, поэтому они должны обмениваться информацией через концентратор.

В шинной топологии все узлы соединены с одной общей линией передачи — шиной, концы которой не образуют замкнутого контура (рис. 3.14, б). Использование такой топологии значительно упрощает управление потоком данных между компьютерами, так как всем узлам сети доступна вся передаваемая по сети информация.

Кольцевая топология определяет сеть передачи данных, в которой все узлы соединяются последовательно, образуя замкнутую петлю (кольцо), как показано на рис. 3.14, в. Передача данных ведется односторонне, при этом сигнал должен проходить через все узлы кольца, каждый из которых выполняет функцию повторителя, получая сигналы от соседнего узла и транслируя их к следующему узлу сети.

В решетчатой (ячеистой) топологии (рис. 3.14, г) каждый узел сети имеет двухточечные линии связи со всеми остальными узла-

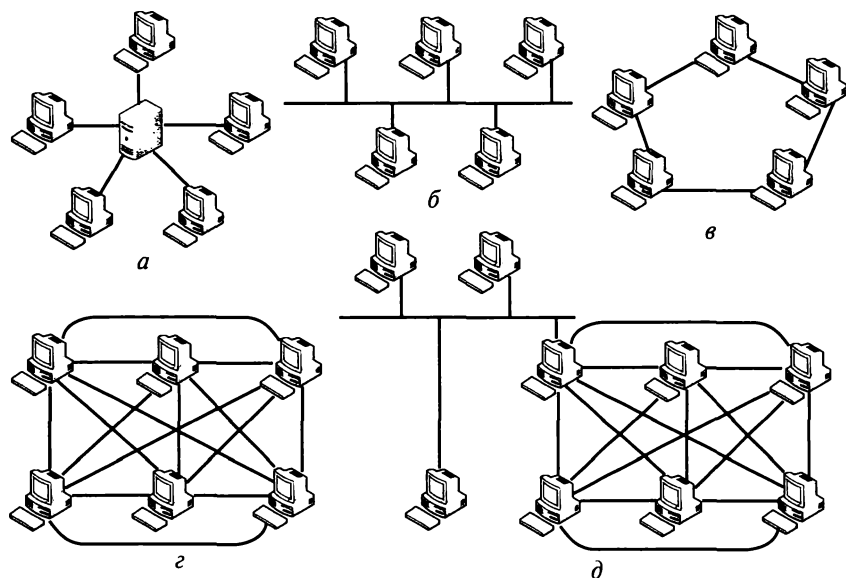


Рис. 3.14. Виды топологии сети:

a — звездообразная; *б* — шинная; *в* — кольцевая; *г* — решетчатая; *д* — гибридная

ми. Недостаток решетчатой топологии заключается в том, что для соединения n компьютеров в сеть требуется $n(n - 1)/2$ физических каналов передачи — кабелей, причем на каждый компьютер приходится $n - 1$ подключение. Однако значительными преимуществами решетчатой топологии являются высокая надежность и усиленная защита от несанкционированного доступа.

Гибридная топология представляет собой сочетание двух или более видов рассмотренных выше топологий для организации крупной сети со сложной топологией. В качестве примера на рис. 3.14, *д* показана гибридная топология.

Для обработки данных в современных САПР широко применяются ПЭВМ и рабочие станции. Рабочие станции по сравнению с обычными ПЭВМ представляют собой высокопроизводительную вычислительную систему, ориентированную на выполнение определенных функций программно-аппаратным образом. Например, в САПР для радиоэлектроники широко применяют графические рабочие станции для выполнения процедур геометрического моделирования и машинной графики из-за высоких требований к ресурсам вычислительной техники [21]. Автоматизированное рабочее место (АРМ) создают на базе рабочих станций или ПЭВМ. В состав типовых устройств АРМ обычно входят одно- или многопроцессор-

ная ЭВМ, устройства ввода-вывода (клавиатура, мышь, дисплей и др.), а также принтер, сканер, плоттер, дигитайзер и другие периферийные устройства [1, 21].

Для перевода в электронный вид графической и текстовой конструкторской документации в САПР используют дигитайзеры и сканеры. Дигитайзеры применяют для ручного ввода («перерисовывания») чертежей. Для автоматического ввода информации используют сканеры планшетного или протяжного типа с оптическим способом считывания. Основной характеристикой сканера является его разрешающая способность, определяемая в dpi (dpi — dots per inch), т. е. в количестве точек (пикселей) на один дюйм. Современные модели сканеров имеют разрешающую способность от 300 до 9 600 dpi. Отсканированная информация имеет растровую форму, представленную в одном из стандартных форматов сжатия изображений, например TIFF, BMP, JPEG, RAW, и для дальнейшей обработки необходимо осуществить ее перевод в векторную форму, в частности, формата DXF [21].

Для вывода информации применяют принтеры и плоттеры. Первые из них ориентированы на получение документов малого формата (A3, A4), вторые — для вывода графической информации на широкоформатные носители. В этих устройствах преимущественно используется растровый (т. е. построчный) способ вывода со струйной или лазерной технологией печати. Типичная разрешающая способность лазерных принтеров составляет 300 — 1 200 dpi, а у струйных принтеров и плоттеров — до 9 600 dpi, что позволяет выводить графическую информацию фотографического качества.

Дигитайзеры, сканеры, принтеры, плоттеры и другое периферийное оборудование могут совместно использоваться пользователями нескольких АРМ в рамках локальной сети.

3.6. Другие виды обеспечения САПР

Наряду с рассмотренными видами обеспечений САПР стандарты выделяют в качестве самостоятельных компонентов организационно-методическое, правовое и эргономическое обеспечения.

Под *организационно-методическим обеспечением* САПР понимают входящие в ее состав документы, регламентирующие порядок эксплуатации САПР, причем документы, относящиеся к процессу создания САПР, не входят в состав организационно-методического обеспечения. Документация методической составляющей обеспечения представлена различного рода инструкциями, распоряжениями, нормативами, требованиями. Организационная соста-

вляющая подразумевает комплектование подразделений САПР профессионально грамотными специалистами, имеющими навыки и знания для работы со всеми видами обеспечения САПР. От качества их работы зависит эффективность всего комплекса САПР, а иногда и всего производства [1, 21].

К *правовому обеспечению* САПР РЭС относят документы, в которых зафиксированы права и обязанности подразделений и лиц, эксплуатирующих или сопровождающих САПР. Кроме того, в них фиксируется ответственность лиц за неправильные решения, за несанкционированный доступ к информации, а также за использование нелегального программного обеспечения и (или) нарушение авторских прав. В последнее время вопросы правового характера приобрели особую актуальность, поэтому значимость правового обеспечения существенно возросла.

Теоретическую основу *эргономического обеспечения* современных САПР составляют закономерности взаимодействия между средствами вычислительной техники и пользователями с учетом физических, инженерно-психологических и медико-биологических основ восприятия информации органами чувств человека. Интенсивное внедрение персональных компьютеров и программных средств САПР без учета эргономического обеспечения приводит к низкой эффективности их использования, а также к неоправданной перегрузке, росту заболеваемости зрительного аппарата и другим нарушениям здоровья пользователей САПР. Поэтому при создании и эксплуатации любых САПР РЭС оценка их эффективности с учетом эргономических показателей имеет особое значение.

3.7. Примеры САПР

3.7.1. САПР схмотехнического проектирования

В области автоматизации схмотехнического проектирования наибольшее распространение получили варианты программы Spice, созданные в нескольких фирмах.

В программе PSpice для персональных компьютеров предусмотрены статический, динамический и частотный виды анализа, смешанное логико-аналоговое моделирование (mixed-signal simulation), температурный (с индивидуальными значениями температуры по приборам), шумовой и спектральный анализы. В логической части реализовано событийное моделирование, выявляют-ся риски сбоя, рассчитываются зависимые от нагрузки задержки.

Для оптимизации параметров градиентными методами можно использовать программу PSpice Optimizer.

В библиотеках программы PSpice имеется несколько тысяч математических моделей элементов (диодов, биполярных и полевых транзисторов, операционных усилителей, стабилизаторов, тиристоров, компараторов, магнитных устройств с учетом насыщения и гистерезиса, оптронов, кварцевых резонаторов, длинных линий с учетом задержек, отражений, потерь и перекрестных помех и др.). Библиотека открыта для включения моделей пользователя, имеются соответствующие инструментальные средства пополнения библиотеки. Предусмотрено взаимодействие аналоговой и цифровой частей схемы.

Известен также ряд других программ аналогового и смешанного моделирования. В их число входят программы ICAP/4Window (Intusoft), Saber Mixed-technology Simulator (фирмы Analog), Viewanalog (Viewlogic Systems), Continuum (Mentor Graphics) и др.

К числу отечественных программ схемотехнического анализа относится программа ПА9, в которой наряду с видами анализа, обычными для программ анализа электронных схем, реализовано моделирование механических, гидравлических, тепловых процессов. Программа написана на языке Java и тем самым ориентирована на использование в распределенных системах проектирования [21].

Схемотехническое проектирование радиотехнических схем (RF-схем) отличается рядом особенностей математических моделей и используемых методов, особенно в области СВЧ-диапазона. Для анализа линейных схем обычно применяют методы расчета полюсов и нулей передаточных характеристик, моделирование стационарных режимов нелинейных схем чаще всего выполняют с помощью методов гармонического баланса, основанного на разложении неизвестного решения в ряд Фурье, его подстановки в систему дифференциальных уравнений с группированием членов с одинаковыми частотами тригонометрических функций, в результате получают системы нелинейных алгебраических уравнений, подлежащие решению. Сокращение времени в случае слабо нелинейных схем достигается при моделировании СВЧ-устройств с помощью рядов Вольтерра [21].

Имеются специальные программы для анализа электромагнитной совместимости компонентов в конструктивах РЭА. К ним, например, относятся программы семейства Omega PLUS, с помощью которых определяется форма сигналов в конструкциях с печатными платами, кабельными соединениями, микрополосковыми

линиями; анализируются статические электрические и магнитные поля в геометрических плоских и объемных конструкциях; выполняется расчет полосковых и микрополосковых устройств, взаимных индуктивностей и емкостей многопроводных линий передачи; моделируются электромагнитные излучения в печатных платах; рассчитываются задержки с учетом паразитных емкостей и индуктивностей. При моделировании компоненты схемы представляются в виде линейных эквивалентных схем входных и выходных цепей, проводится частотный анализ, фиксируются максимальные амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей, электрических токов и напряжений, результаты используются для принятия необходимых конструктивных решений.

3.7.2. САПР для проектирования печатных плат

Среди программного обеспечения проектирования печатных плат для платформы Windows наиболее популярны система OrCAD, программы SPECCTRA и PCB Design Studio (Cadence Design Systems), системы P-CAD и Protel 99SE (Protel International) и некоторые другие [21].

С помощью ряда редакторов, имеющихся в OrCAD, выполняется интерактивное проектирование печатных плат. Имеются программы размещения компонентов, автотрассировки проводников и создания управляющих файлов для фотоплоттеров. В состав системы входят также средства для анализа и оптимизации электронных схем и проектирования устройств на ПЛИС. Поэтому система OrCAD является системой сквозного проектирования РЭС.

Программа SPECCTRA компании Cadence — одна из наиболее мощных программ проектирования печатных плат — может выполнять размещение и трассировку как в интерактивном, так и в автоматическом режиме. Размещение происходит за несколько проходов, во время которых выявляются и устраняются конфликты типа пересечений проводников в одном слое или нарушения проектных норм.

Широко известна система проектирования печатных плат P-CAD, позволяющая выполнить полный цикл проектирования печатных плат, включая интерактивное размещение компонентов, трассировку проводников и выпуск документации. Автоматическое размещение компонентов на плате и трассировка проводников осуществляются с помощью отдельно поставляемого пакета SPECCTRA. В системе P-CAD имеются библиотека корпусов микросхем, библиотека современных импортных элементов, которую

можно пополнить библиотеками отечественной элементной базы, препроцессоры подготовки информации для изготовления фотошаблонов для фотоплоттеров. Поддержка текстовых форматов DXF и PDIF позволяет обмениваться информацией с пакетами AutoCAD, OrCAD, Viewlogic и др.

Компания Protel International (новое название Altium) предлагает наряду с P-CAD систему сквозного проектирования PЭС Protel собственной разработки, имеющую возможности, аналогичные возможностям системы P-CAD.

Переход от системы CAD к системе САМ заключается в преобразовании результатов конструкторского проектирования в управляющую информацию для генераторов изображений [21]. В случае печатных плат для такого перехода можно использовать программы семейства LAVENIR фирмы Lavenir Technology, с их помощью создаются и дорабатываются управляющие файлы для фотоплоттеров и станков с ЧПУ, контролируется соблюдение проектных норм.

Технологическое проектирование печатных плат заключается в преобразовании результатов конструкторского проектирования в файлы управляющей информации для фотоплоттеров и автоматизированных линий.

3.7.3. САПР для геометрического моделирования и компьютерной графики

Для синтеза трехмерных изображений в САПР преимущественно используют средства таких известных систем, как CATIA, Unigraphics, Inventor, Solidworks и др. Кроме того, применяются графические библиотеки (совокупность подпрограмм, предназначенных для решения задач компьютерной графики) и пакеты компьютерной графики и геометрического моделирования. Такие пакеты представляют собой совокупность методов и средств для создания, обработки и представления (визуализации) графической информации, непосредственно не связанные с проектированием в технике.

В проектировании PЭС при разработке и оформлении конструкторской документации наиболее широкое применение находят машиностроительные САПР, имеющие многомодульную структуру, состоящую из групп программ конструкторского проектирования механических объектов, промышленного дизайна, инженерного анализа (функционального моделирования), технологического проектирования, обмена данными, визуализации.

Типичными примерами «тяжелых» САПР являются Unigraphics (UGS — Unigraphics Solution), CATIA (Dessault Systemes), Pro/Engineer (PTC — Parametric Technology Corporation). До недавнего времени с ними конкурировали системы I-DEAS (SDRC), CADD5 (Computervision) и EUCLID (Matra Datavision).

Лидирующее положение в классе «средних» САПР занимают системы Solid Works (Solid Works Corporation), Solid Edge (UGS), Inventor (Autodesk). Компания PTC предлагает САПР под названием Pro/Desktop. В России нашли широкое распространение отечественные системы «Компас» («Аскон») и T-Flex CAD («Топ Системы»), а также некоторые другие системы, в числе которых САПР компаний Autodesk, Beantly, «Интермех», Bee-Pitron. Все эти системы ориентированы в первую очередь на платформу Wintel, как правило, имеют подсистемы: конструкторско-чертежную 2D, твердотельного 3D геометрического моделирования, технологического проектирования, управления проектными данными, ряд подсистем инженерного анализа и расчета отдельных видов машиностроительных изделий, а также библиотеки типовых конструктивных решений.

В приложениях П1 — П5 приведены примеры использования различных программных средств при автоматизированном проектировании РЭС.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой САПР, из каких основных элементов состоит САПР?
2. Какие системные принципы реализованы в САПР?
3. По каким признакам классифицируют САПР?
4. Какие подсистемы относятся к проектирующим, а какие — к обслуживающим?
5. Каков состав основных видов обеспечения САПР?
6. Что включает в себя математическое обеспечение САПР?
7. Какие требования предъявляются к математическому аппарату САПР?
8. Что представляет собой программное обеспечение САПР?
9. Каким основным требованиям должно удовлетворять программное обеспечение?
10. Какими программами представлено общесистемное программное обеспечение?
11. Каков состав базового программного обеспечения?
12. Какие программы называют прикладными?
13. Что представляет собой лингвистическое обеспечение САПР?
14. Каков состав и назначение языков программирования?

15. В чем различия языков высокого и низкого уровней?
16. Каков состав и назначение языков проектирования?
17. Что представляют собой языки управления и какова область их применения?
18. Каков состав информационного обеспечения САПР?
19. Что представляет собой база данных?
20. Как классифицируют СУБД?
21. Какие существуют модели представления данных в СУБД?
22. Каков состав реляционной базы данных?
23. В чем различие ключевого и индексного полей?
24. Что представляют собой транзакция и бизнес-правила?
25. В чем состоят основные подходы к проектированию структуры БД?
26. Какие CASE-средства используются для автоматизированного проектирования БД?
27. Каким требованиям должно удовлетворять техническое обеспечение САПР?
28. Что представляет собой вычислительная сеть?
29. Какие основные виды сетей существуют?
30. Каковы основные виды топологии сетей и в чем их отличие?
31. Что представляют собой АРМ и рабочая станция?
32. Какие устройства используют для ввода-вывода графической и текстовой конструкторской документации?
33. Каков состав организационно-методического обеспечения САПР?
34. В чем заключается роль правового обеспечения САПР?
35. Решению каких задач способствует эргономическое обеспечение САПР?
36. Какие программные продукты применяются для схемотехнического моделирования?
37. Какие программные средства используются в области проектирования печатных плат?
38. Какие САПР применяются для разработки и оформления конструкторской документации?

В настоящее время нельзя назвать область человеческой деятельности, для которой в той или иной степени не использовались бы методы моделирования. Особенно это относится к проектированию и управлению различными объектами, где процессы принятия решений основаны на получаемой с помощью моделей информации. Моделирование в широком смысле является основным методом исследования сложных систем и используется для принятия решений в различных сферах инженерного творчества. При этом системы и их части описываются множествами математических моделей, каждая из которых характеризует определенные аспекты и свойства моделируемого объекта.

Компьютерное моделирование можно рассматривать как один из самых мощных методов и инструментов познания, анализа и синтеза, которым располагают проектировщики, ответственные за разработку, производство и функционирование современных РЭС. Идея компьютерного моделирования состоит в замене реального объекта его образом в виде математической модели (ММ), разработки соответствующей программы для ЭВМ и проведения машинных экспериментов с целью получения новых знаний об объекте или решения определенной задачи. При этом у исследователя появляется возможность экспериментировать с моделью системы даже в тех случаях, когда делать это на реальном объекте практически невозможно или нецелесообразно. Работа не с самим объектом или процессом, а с его математической моделью дает возможность относительно быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в любых возможных ситуациях.

4.1. Требования к математическим моделям РЭС

Понятие математической модели не имеет строгого формального определения. Обычно под математической моделью объекта понимают совокупность отношений, выраженных при помощи

системы математических символов и обозначений, которые отражают наиболее существенные свойства изучаемого объекта.

Процесс моделирования предполагает наличие объекта (системы) исследования, исследователя, перед которым поставлена конкретная задача, и модели, создаваемой для получения информации о системе и необходимой для решения поставленной задачи.

В общем случае РЭС как объект моделирования можно представить кортежем символов, например

$$\text{РЭС} = \langle \text{ЦН}, \text{О}, \text{СТР}, \text{ТТХ} \rangle,$$

где ЦН — целевое назначение; О — оператор; СТР — структура; ТТХ — тактико-технические характеристики.

Целевое назначение определяет перечень задач, решение которых должно обеспечивать РЭС, например для радиолокационной станции это обнаружение целей, определение их координат, автоматическое сопровождение целей и др.

Оператор системы представляет собой комплекс математических отношений, устанавливающих связи между переменными (входными, фазовыми координатами, выходными) в соответствии с используемыми принципами действия.

Под структурой понимается некоторая организация РЭС, характеризующая ее качественный и количественный состав, множество связей между компонентами, основные свойства компонентов. Важное значение при проектировании имеет геометрическое размещение компонентов в задаваемом объеме или на заданной площади.

Массив тактико-технических характеристик задает количественные значения показателей, определяющих эффективность функционирования радиосистем, например дальность действия, точность, показатели надежности, помехозащищенности и т. д.

Для эффективного решения задач проектирования математическая модель должна удовлетворять ряду общих требований, а также требованиям, отражающих специфику РЭС. К основным общим требованиям ММ относятся следующие.

Полнота ММ позволяет отразить в достаточной мере именно те характеристики и особенности системы, которые интересуют проектировщиков с точки зрения поставленной цели проведения моделирования. Например, модель может полно описывать протекающие в системе процессы, но не отражать ее габаритные, массовые или стоимостные показатели.

Точность ММ дает возможность обеспечить приемлемое совпадение реальных и найденных при помощи ММ значений выход-

ных переменных системы, составляющих вектор $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$. Пусть y_i^M и y_i^3 — найденное при помощи ММ и реальное по результатам эксперимента значения i -й выходной переменной. Тогда относительные погрешности ε_i , $i = \overline{1, n}$, ММ при одних и тех же значениях входных переменных определяются по формуле

$$\varepsilon_i = |y_i^M - y_i^3|/y_i^3, \quad i = \overline{1, n}.$$

В качестве скалярной оценки вектора погрешности $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)^T \in R^n$ можно принять какую-либо его норму, например

$$|\varepsilon| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad \text{или} \quad |\varepsilon| = \max_{i=\overline{1, n}} |\varepsilon_i|.$$

Адекватность ММ — это способность ММ получать выходные переменные системы с погрешностью не более некоторого заранее заданного значения. В общем смысле под адекватностью ММ понимают правильное качественное, структурное и точное количественное описание именно тех характеристик системы, которые наиболее важны в данном конкретном случае.

Экономичность ММ оценивают затратами на вычислительные ресурсы (машинное время и память), необходимые для проведения вычислительного эксперимента с ММ на ЭВМ. Эти затраты зависят от числа арифметических операций при использовании модели, от размерности пространства переменных, характеризующих состояние системы и других факторов. Требования экономичности во многих случаях противоречат требованиям высокой точности и адекватности ММ и на практике могут быть удовлетворены лишь на основе разумного компромисса.

Робастность ММ характеризует ее устойчивость по отношению к погрешностям исходных данных, способность не допускать их чрезмерного влияния на результат вычислительного эксперимента.

Продуктивность ММ связана с возможностью получения достоверных исходных данных. Если исходные данные являются результатом измерений, то точность их измерения должна быть не ниже, чем для тех переменных, которые получаются при использовании ММ. В противном случае ММ считается непродуктивной, и ее применение для проектирования РЭС теряет смысл.

Наряду с перечисленными требованиями ММ должна обладать следующими свойствами:

- информативностью, т. е. модель должна содержать информацию, достаточную для решения задач проектирования;

- адаптивностью, т. е. приспособленностью к различным значениям входных переменных, параметров элементов, воздействий внешней среды;
- возможностью развития (эволюции) в процессе совершенствования проектируемой системы и др.

Специфические требования к ММ, кроме того, обусловлены особенностями различных классов РЭС, в том числе радиотехнических и оптико-электронных комплексов, предназначенных для радиолокации, радиосвязи, радиоуправления, радионавигации, автонавещения, телевидения, радиосвязи и т. п. Эти комплексы решают широкий класс задач, в том числе обнаружение целей, сопровождение целей по дальности, направлению и скорости, наведение на цель, передача сообщений на большие расстояния и многие другие. Главная особенность подобных РЭС состоит в том, что большинство решаемых ими задач связано с созданием и обработкой радиосигналов, анализом их спектров, а также с использованием параметров этих сигналов — частоты, амплитуды, фазы, временного положения и направления прихода. Обработка радиосигналов ведется специальными методами с использованием генерирующих, приемно-усилительных и преобразующих устройств. При этом учитываются свойства радиосигналов, обусловленные диапазоном частот, применяемым методом модуляции, наличием амплитудных, фазовых и других искажений, а также влияние помех и шумов.

Радиосигналы, сформированные в процессе изменения одного из параметров, сравниваются с некоторым опорным сигналом. Это требует использования в радиосистемах специальных устройств — дискриминаторов, демодуляторов, фильтров, селекторов. Кроме того, основными элементами многих РЭС являются различные генераторы высокочастотных колебаний, приемные и антенные устройства, а также системы автоматической регулировки усиления, фазовой и частотной автоподстройки передающих и приемных устройств. Поэтому при решении задач анализа и синтеза РЭС широко используются методы спектрального анализа, оптимальной фильтрации, кодирования, выделения полезного сигнала на фоне шума и др.

Специфика ММ РЭС проявляется также при рассмотрении автоматических радиолокационных и оптико-электронных пеленгационных систем, решении задач срыва захвата или слежения, автосопровождения целей, самонаведения и др. К математическим методам, используемым в РЭС, предъявляют жесткие требования к быстродействию обработки радиосигналов, обусловленному ско-

ростью распространения радиоволн, а также необходимостью рассмотрения их работы в различных состояниях функционирования, учитывающих параметры антенн, помеховую обстановку, метеословия, работу других систем и т. п.

При исследовании процессов в РЭС для решения задач проектирования и технологической подготовки производства невозможно учесть все факторы, какие-то требования являются существенными для моделирования, а какими-то можно пренебречь. При этом выдвигается система допущений (гипотез), которая тщательно обосновывается и позволяет выявить и учесть при математическом описании наиболее характерные черты исследуемой системы. В результате формируется ММ проектируемого объекта.

На рис. 4.1 приведена укрупненная схема, отражающая основные этапы работ при построении ММ систем. Эта схема содержит этапы, которые являются общими для любых методов построения моделей (аналитических, экспериментальных и др.). Инициацией начала работ являются возникновение какой-либо проблемы (задачи), требующей использования ММ, и получение задания на моделирование.

На первом этапе описывается проблемная область, формулируются цели и задачи, для решения которых требуются ММ. Например, такими задачами могут быть оптимизация конструкции РЭС, оптимизация режимов технологических процессов и т. д.

На втором этапе составляется полный перечень требований к ММ, по существу, этот перечень представляет собой техническое задание на разрабатываемую модель. Задание должно содержать сведения о входных и выходных переменных, области их изменения, допустимые погрешности, требования к быстродействию и др.

На основе выполнения первых двух этапов разрабатывается концепция модели (третий этап), дается ее вербальное описание, строится схема, учитывающая логические связи между переменными, делаются предположения о методах построения модели.

Четвертый этап является самым трудоемким. В зависимости от метода построения ММ этот этап разбивается на несколько подэтапов. Например, при использовании экспериментальных методов на этом этапе могут быть выполнены работы по планированию и проведению эксперимента, обработки его результатов и др.

На пятом этапе проверяется адекватность компьютерной программы, разработанной на основе математической модели. Для этого программа тестируется во всем диапазоне изменения переменных. По результатам тестирования и сопоставления с экспериментальными данными делается вывод об адекватности модели

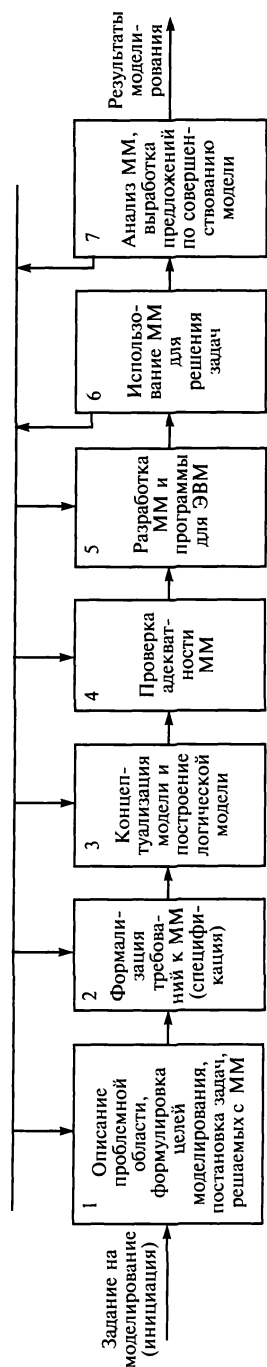


Рис. 4.1.1. Основные этапы построения математической модели

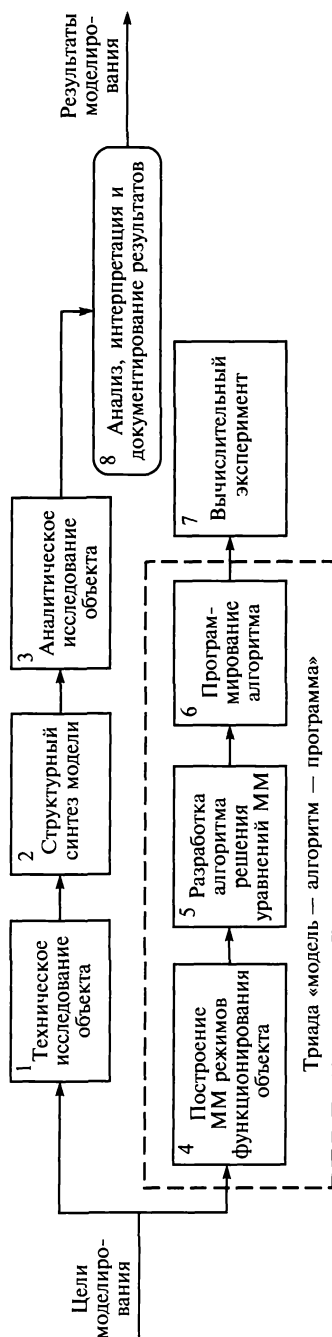


Рис. 4.2. Схема организации процесса компьютерного моделирования

или необходимости внесения изменений, т. е. коррекции ранее выполненных этапов.

Окончательная проверка пригодности модели делается на шестом (завершающем) этапе на основе ее использования для решения задач, сформулированных на первом этапе.

В процессе компьютерного моделирования исследователь имеет дело с тремя объектами: системой (реальной, проектируемой, воображаемой), математической моделью и программой ЭВМ, реализующей алгоритм решения уравнений модели. Традиционная схема компьютерного моделирования как единого процесса построения и исследования модели, содержащая триаду «модель—алгоритм—программа», представлена на рис. 4.2.

Эффективность компьютерного моделирования во многом зависит от качественного выполнения следующих работ:

- определение (изучение) объекта, т. е. установление границ изменения переменных, ограничений, измерителей эффективности функционирования объекта и т. д.;
- формализация объекта (построение модели), т. е. переход от реального объекта к некоторой логико-математической схеме;
- подготовка данных, необходимых для построения модели, и представление их в соответствующей форме;
- разработка моделирующего алгоритма и программы для ЭВМ;
- оценка адекватности, т. е. определение степени уверенности, с которой можно судить о корректности выводов о реальном объекте, полученных на основании модели;
- стратегическое планирование вычислительного эксперимента для получения необходимой информации;
- тактическое планирование, т. е. определение способа проведения каждой серии испытаний, предусмотренных планом эксперимента;
- проведение вычислительных (имитационных) экспериментов;
- интерпретация и анализ данных машинного моделирования;
- реализация полученных результатов моделирования;

В ходе автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства РЭС используется большое число разнообразных математических моделей. Эти ММ классифицируются по разным признакам: по характеру отражаемых свойств разрабатываемого объекта, по отношению к иерархическому уровню, по способу получения и т. д. (рис. 4.3) [15]. Многие из содержащихся на рис. 4.3 моделей будут рассмотрены в последующих главах.

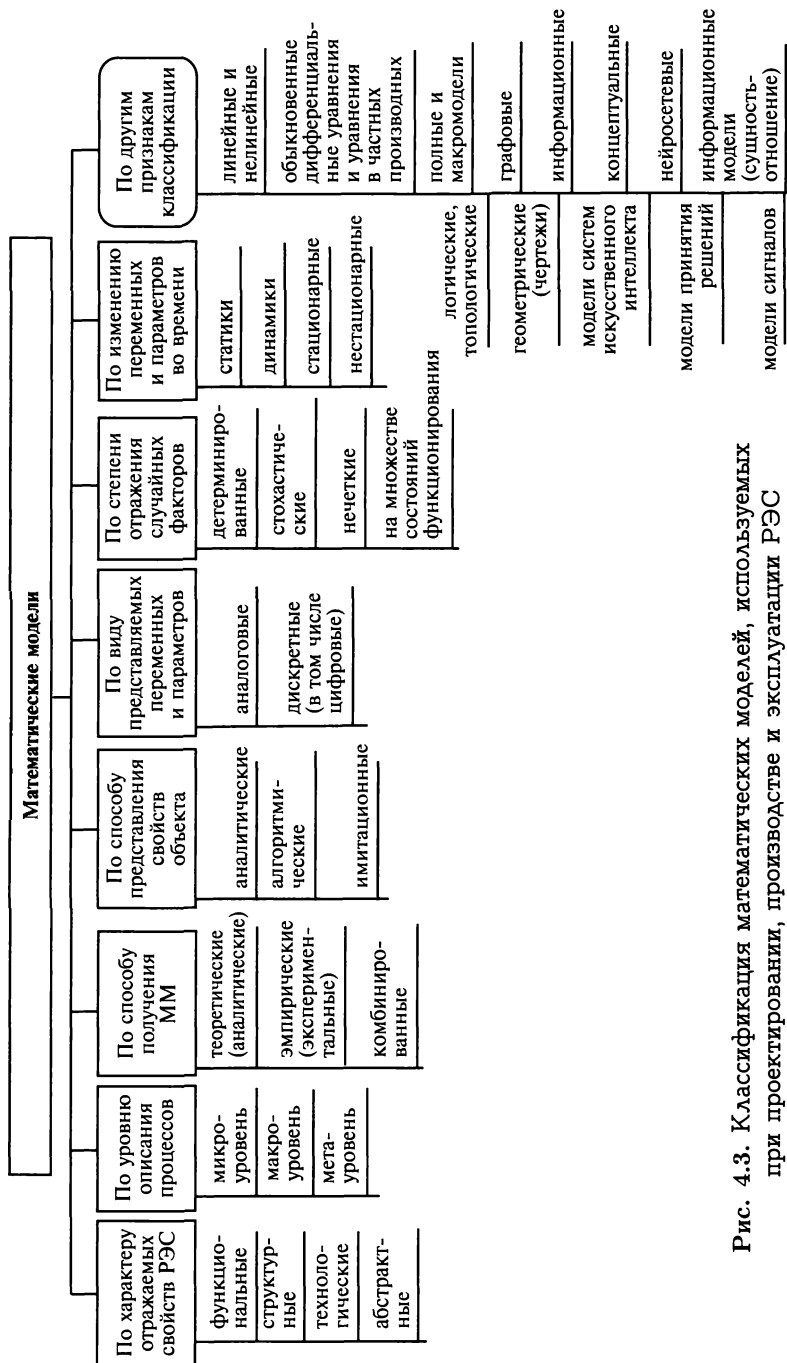


Рис. 4.3. Классификация математических моделей, используемых при проектировании, производстве и эксплуатации РЭС

Большинство математических моделей предназначено для определения значений выходных переменных исследуемого объекта (вектора y) в зависимости от значений входных управляющих воздействий (вектора x) и воздействий внешней среды (вектора v) при задаваемых параметрах (массив A) объекта, обычно называемых внутренними или функциональными. Такие модели обобщенно записываются в виде

$$y = F(x, v; A) \quad (4.1)$$

или как система функций:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x, v; A); \\ y_2 &= f_2(x, v; A); \end{aligned} \quad (4.2)$$

Функциональные модели вида (4.1), (4.2) широко используются для описания электрических, тепловых, механических и других процессов в РЭС.

В общем виде функциональные модели задают как динамические системы (ДС). В простейшем случае ДС представляет собой систему, функционирование которой задается обыкновенными дифференциальными уравнениями в форме Коши обычно с гладкими правыми частями, что гарантирует существование и единственность решения. В более сложном случае система обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши дополняется нелинейными алгебраическими уравнениями и набором вспомогательных формул. В широком смысле под ДС понимается непрерывно наблюдаемая и изменяющая свое состояние под воздействием внешних и внутренних причин система, которая функционирует в непрерывном времени.

Основными объектами данной модели являются векторы входных переменных (входа) x , фазовых координат (переменных состояния) z , выходных переменных (выхода) y , такие, что

$$\begin{aligned} x &= (x_1, x_2, \dots, x_m)^T \in \mathcal{X} = \mathcal{X}_1 \times \mathcal{X}_2 \times \dots \times \mathcal{X}_m; \\ z &= (z_1, z_2, \dots, z_n)^T \in \mathcal{Z} = \mathcal{Z}_1 \times \mathcal{Z}_2 \times \dots \times \mathcal{Z}_n; \\ y &= (y_1, y_2, \dots, y_p)^T \in \mathcal{Y} = \mathcal{Y}_1 \times \mathcal{Y}_2 \times \dots \times \mathcal{Y}_p, \end{aligned}$$

где $\mathcal{X}, \mathcal{Z}, \mathcal{Y}$ — множества значений векторов x, z, y соответственно; $\mathcal{X}_i, i = \overline{1, m}, \mathcal{Z}_j, j = \overline{1, n}, \mathcal{Y}_k, k = \overline{1, p}$, — множества значений компонент x_i, z_j, y_k векторов x, z, y ; $\mathcal{X} = \mathcal{X}_1 \times \dots \times \mathcal{X}_m$ — декартово (прямое) произведение, состоящее из всех упорядоченных совокупно-

стей вида $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, причем $x_1 \in \mathcal{X}_1, x_2 \in \mathcal{X}_2, \dots, x_m \in \mathcal{X}_m$; аналогичные определения имеют место для $\mathcal{Y}$ и $\mathcal{Z}$; t — символ транспонирования вектора.

Вектор $z(t_0)$ фазовых координат целиком определяет состояние ДС в фиксированный момент времени t_0 . Положение системы $z(t)$ в любой момент времени t в будущем, т. е. для $t > t_0$, единственным образом определяется вектором $z(t_0) = z_0$ и изменением входных воздействий (траекторий) $x(\cdot) = \{x(s), s \in [t_0, t]\}$ и не зависит от того, каким образом система пришла в состояние z_0 . Для таких систем имеет место следующее отображение:

$$\varphi: \mathcal{T} \times \mathcal{T} \times \mathcal{Z} \times \mathcal{X}(\cdot) \rightarrow \mathcal{Z}. \quad (4.3)$$

т. е. закон, по которому каждому элементу $(t, t_0, z, x(\cdot))$ множества $\mathcal{T} \times \mathcal{T} \times \mathcal{Z} \times \mathcal{X}(\cdot)$, называемого областью определения отображения, ставится в соответствие некоторый элемент z множества $\mathcal{Z}$, называемый областью значений отображения. Здесь $\mathcal{T}$ — множество значений моментов времени t (t_0) и $\mathcal{X}(\cdot)$ — множество траекторий изменения входного воздействия $x(\cdot)$.

Можно использовать также более привычную форму записи φ в виде оператора, называемого переходной функцией, т. е.

$$z(t) = \varphi(t, t_0, z_0, x(\cdot)). \quad (4.4)$$

Связь между вектором переменных состояния z и контролируемым вектором выхода y задается некоторым выходным отображением

$$\psi: \mathcal{T} \times \mathcal{Z} \rightarrow \mathcal{Y},$$

ставящим в соответствие каждой паре t, z , называемой событием или фазой, из множества $\mathcal{T} \times \mathcal{Z}$ — пространства событий (фазового пространства) конкретный элемент из множества $\mathcal{Y}$. Эта зависимость между y и z может быть отражена также с помощью оператора

$$y(t) = \psi(t, z).$$

Таким образом, динамическая система Σ задается четверкой множеств $\mathcal{T}, \mathcal{X}, \mathcal{Z}, \mathcal{Y}$ и двумя операторами φ, ψ , т. е.

$$\Sigma = (\mathcal{T}, \mathcal{X}, \mathcal{Z}, \mathcal{Y}; \varphi, \psi),$$

ее общая схема представлена на рис. 4.4.

В качестве простейшего примера динамической системы рассмотрим электрическую RL -цепь (рис. 4.5). Переменными в данной системе являются напряжения $u_1, u_R, u_2 = u_L$ и ток I . Выделим вход x , выход y , фазовую координату z . Пусть $x = u_1, y = u_2, z = I$.

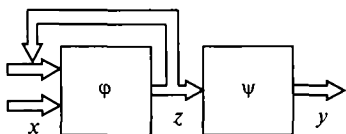


Рис. 4.4. Схема динамической системы

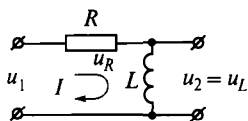


Рис. 4.5. RL -цепь

Модель динамики RL -цепи в виде обыкновенного дифференциального уравнения записывается следующим образом:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{1}{L} u_L(t) = \frac{1}{L} [u_1(t) - u_R(t)] = -\frac{R}{L} I(t) - \frac{1}{L} u_1(t)$$

или с использованием обозначения системных переменных:

$$\dot{z}(t) = az(t) - bx(t); \quad y(t) = cz(t).$$

где $a = -R/L$; $b = 1/L$; $c = L$.

Сопоставление решения данного дифференциального уравнения

$$z(t) = e^{a(t-t_0)} z_0 - b \int_{t_0}^t e^{a(t-s)} x(s) ds$$

с оператором φ в формулах (4.4) и (4.3) показывает их структурное соответствие.

Наряду с функциональными моделями вида (4.1) или (4.3) при решении задач проектирования РЭС и технологии производства используются функциональные модели бизнес-процессов, которые строятся в соответствии со стандартом IDEF0 [20].

В процедурах конструкторского проектирования широко используются ММ, отражающие структурные свойства объектов, в частности их геометрические формы, размеры, взаимное расположение элементов в пространстве и т.д. Такие модели называются структурными, они обычно представляются графами (см. подразд. 4.5). Достаточно подробно наиболее употребляемые виды моделей и их примеры будут рассмотрены в следующих темах настоящей главы.

Большое разнообразие видов ММ во многом определяется широким спектром задач, которые решаются при проектировании РЭС. К ним прежде всего относятся задачи оптимизации конструкции РЭС, оценки показателей эффективности функционирования РЭС, анализ функций чувствительности выходных показателей к изменению значений параметров элементной базы и др.

4.2. Математические модели на микроуровне

Модели, описывающие физические состояния элементов и частей РЭС и процессы в сплошных средах, т.е. поля электрического потенциала в полупроводниковых кристаллах, распределение температуры в модулях, напряженно-деформированное состояние механических конструкций и т.п., называют математическими моделями на микроуровне или распределенными моделями. В этих моделях фазовыми координатами (переменными) являются плотности токов, электрические потенциалы, температуры, механические напряжения и т.д., а независимыми переменными — время и пространственные координаты. Математические модели на микроуровне записываются в виде интегральных или дифференциальных уравнений в частных производных, дополненных краевыми (начальными и граничными) условиями. Примерами таких уравнений являются уравнения электродинамики, теплопроводности, упругости и др.

В общем виде модель на микроуровне можно записать следующим образом:

$$\Phi \left(z, u, v, \frac{\partial z}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial s}, \frac{\partial^2 z}{\partial s^2}, \dots; s, t, A \right) = 0.$$

где Φ — оператор связи между переменными и их производными; z, u, v — векторы фазовых координат, управляющих и внешних воздействий соответственно; s — вектор пространственных координат; t — время; A — массив параметров.

При решении задач моделирования на микроуровне, т.е. определении значений функции $z(s, t)$, соответствующая ММ содержит:

- основное уравнение

$$F(z(s, t)) = f(s, t), \quad s \in D, \quad t > t_0;$$

- граничные условия

$$\Gamma(z(s, t)) = g(s, t), \quad s \in D_{\text{гр}}, \quad t > t_0;$$

- начальные условия

$$T(z(s, t)) = z(s, t_0), \quad s \in D, \quad t = t_0.$$

Здесь F, Γ, T — операторы (линейные) основного уравнения, граничных и начальных условий соответственно; $D, D_{\text{гр}}$ — область определения пространственных координат s и ее граница; t_0 — начальный момент времени; $f(s, t)$ — воздействия на систему; $g(s, t)$ — функции, входящие в уравнения граничных условий.

Наиболее часто употребляемые основные уравнения ММ на микроуровне приведены в табл. 4.1.

В этих уравнениях переменные E , H , W , J_p , J_n , G_m и другие являются векторными. Над векторными и скалярными переменными в декартовой системе координат (s_1, s_2, s_3) выполняются следующие операции:

$$\begin{aligned}\text{grad } T &= \vec{s}_1 \frac{\partial T}{\partial s_1} + \vec{s}_2 \frac{\partial T}{\partial s_2} + \vec{s}_3 \frac{\partial T}{\partial s_3}; \\ \text{div} (\text{grad } T) &= \nabla^2 T = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T}{\partial s_i^2}; \\ \text{rot } E &= \vec{s}_1 \left(\frac{\partial}{\partial s_2} E_{s_3} - \frac{\partial'}{\partial s_3} E_{s_2} \right) + \vec{s}_2 \left(\frac{\partial}{\partial s_3} E_{s_1} - \frac{\partial}{\partial s_1} E_{s_3} \right) + \\ &+ \vec{s}_3 \left(\frac{\partial}{\partial s_1} E_{s_2} - \frac{\partial'}{\partial s_2} E_{s_1} \right) = \begin{vmatrix} \vec{s}_1 & \vec{s}_2 & \vec{s}_3 \\ \partial/\partial s_1 & \partial/\partial s_2 & \partial/\partial s_3 \\ E_{s_1} & E_{s_2} & E_{s_3} \end{vmatrix}\end{aligned}$$

где $\vec{s}_i$ — вектор единичной длины, направленный вдоль положительной полуоси s_i , $i = 1, 2, 3$; $E_{s_i} = \partial E / \partial s_i$, $i = 1, 2, 3$.

Для решения ММ на микроуровне применяются численные методы, основанные на дискретизации независимых переменных s , t . В результате дискретизации в области непрерывного изменения переменные s , t заменяются множествами значений в узловых точках, которые рассматриваются как узлы некоторой сетки. Поэтому методы решения уравнений в частных производных называют также сеточными. Наибольшее распространение из числа сеточных методов получили метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ).

При использовании МКР производные в уравнениях модели заменяют конечно-разностными аналогами, для этого с учетом особенностей задачи выбирают вид и шаг сетки, выделяют внутренние и граничные узлы. В результате задача моделирования сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно потенциалов в узлах сетки.

Метод конечных элементов представляет собой комбинацию конечно-разностных и проекционных методов. Здесь используется специально построенная система носителей, в качестве которых могут быть треугольные или криволинейные образы. Благодаря этому расширяется класс решаемых задач. Часто метод МКЭ называют проекционно-сеточным. Неизвестные коэффициенты (проекции) в нем определяются методом Бубнова — Галеркина [2, 15].

Основные уравнения ММ на микроуровне

Уравнение	Модель (уравнения)	Обозначения переменных и параметров	Область применения
Теплопроводности Фурье	$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q;$ $\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + g / \rho;$ $q = -\lambda \operatorname{grad} T$	c — удельная теплоемкость; a — коэффициент температуропроводности; g — количество теплоты, выделяемой в единицу времени в единице объема; T — температура; λ — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность; q — плотность теплового потока	Моделирование тепловых режимов, температурных полей
Непрерывности: для дырок для электронов	$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} J_p + g_p$ $\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} J_n + g_n$	p, n — концентрации дырок и электронов; J_p, J_n — плотности дырочного и электронного токов; g_p, g_n — скорости процессов генерации рекомбинации дырок и электронов; q — заряд электрона	Моделирование электрических процессов в полупроводниковых приборах
Пуассона	$\operatorname{div} E = \rho / (\epsilon \epsilon_0)$	E — напряженность электрического поля; ρ — плотность электрического заряда; ϵ — диэлектрическая проницаемость; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная	Моделирование электрических процессов в полупроводниковых приборах

Диффузии	$\frac{\partial N}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} N)$	N — концентрация частиц; D — коэффициент диффузии	Моделирование технологических операций диффузии примесей при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных схем
Максвелла	$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t};$ $\operatorname{rot} H = \frac{\partial D}{\partial t} + J;$ $\operatorname{div} D = \rho; \quad \operatorname{div} B = 0;$ $D = \epsilon E; \quad \vec{B} = \mu \vec{H};$ $J = \sigma \vec{E}$	E, H — напряженности электрического и магнитного полей; D, B — электрическая и магнитная индукции; J — плотность тока проводимости; ρ — плотность заряда в заданном объеме; ϵ, μ — электрическая и магнитная проницаемость среды; σ — удельная проводимость среды	Моделирование электромагнитных полей в устройствах СВЧ, антеннах и т.д.
Теории упругости, Ламе	$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} W +$ $+\mu \Delta W + G_m = \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}$	W — вектор перемещений; G_m — вектор массовых сил; λ, μ — постоянные Ламе; ρ — плотность; Δ — оператор Лапласа	Моделирование напряженно-деформированных состояний механических конструкций (несущих конструкций)

4.3. Математические модели на макроуровне

При моделировании на макроуровне в объекте выделяют дискретные элементы, например электрорадиоэлементы и другие детали, которые в дальнейшем рассматривают в виде неделимых единиц. Фазовыми координатами (переменными) в ММ на макроуровне являются электрические напряжения, токи, температуры, расходы, силы, скорости и т.п., а в качестве непрерывной независимой переменной по сравнению с моделированием на микроуровне остается только время. Функциональные модели на макроуровне записываются в виде систем алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений. Эти модели рассматриваемого объекта, входящего в состав системы, характеризуют его взаимодействие с другими элементами системы.

Математическая модель системы формируется из моделей элементов с использованием компонентных и топологических уравнений. Компонентные уравнения связывают фазовые переменные, относящиеся к одному элементу. Для описания состояния элемента применяются фазовые переменные двух типов: потенциала U и потока I . Применительно к электрическим элементам это электрическое напряжение и ток, входящие, например, в уравнение закона Ома для резистора.

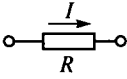
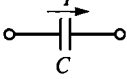
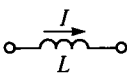
Топологические уравнения отражают способы связи между элементами в составе системы и записываются в соответствии с основными физическими законами. Эти уравнения обычно содержат однотипные фазовые переменные (U или I), относящиеся к разным элементам системы. Например, при использовании законов Кирхгофа топологические уравнения записываются относительно либо токов ветвей, либо напряжений.

При составлении ММ системы в ней выделяют простые и сложные элементы. Состояние простого элемента описывается одним линейным уравнением, связывающим переменные U и I . Выделяют три типа простых элементов: резистивный, емкостной и индуктивный. Модели этих элементов и условные обозначения на схемах приведены в табл. 4.2, а их параметры — в табл. 4.3. Данные элементы представляют собой двухполюсники. Кроме того, двухполюсниками являются независимые источники напряжения и тока, их обозначения на схемах показаны на рис. 4.6.

Более сложные элементы — транзисторы, трансформаторы и другие — рассматриваются как многополюсники, состоящие из совокупностей взаимосвязанных двухполюсников. Важным видом

Т а б л и ц а 4.2

Модели простых элементов

Тип простого элемента	Математическая модель	Условное обозначение на схемах
Резистивный	$I(t) = \frac{1}{R} U(t)$	
Емкостной	$I(t) = C \frac{dU(t)}{dt};$ $U(t) = U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t U(\tau) d\tau; U_0 = U(0)$	
Индуктивный	$\frac{dI(t)}{dt} = \frac{1}{L} U(t);$ $I(t) = I_0 + \frac{1}{L} \int_0^t U(\tau) d\tau; I_0 = I(0)$	

Т а б л и ц а 4.3

Параметры простых элементов

Параметр	Система (цепь)		
	электрическая	тепловая	механическая
I	Электрический ток	Тепловой поток	Сила
U	Электрическое напряжение	Температура	Скорость
R	Электрическое сопротивление	Тепловое сопротивление	Механическое сопротивление
C	Электрическая емкость	Теплоемкость	Масса
L	Электрическая индуктивность	—	Гибкость

многополюсников являются четырехполюсники, имеющие только четыре вывода или две пары зажимов.

Для записи ММ, характеризующих динамические режимы в электрических схемах, обычно используют инвариантную форму, т.е. модель записывают в виде системы уравнений. В общем случае система обыкновенных дифференциальных уравнений, полученная на основе компонентных и топологических уравнений, записывается в виде

$$F(\dot{z}, z, x, t) = 0, \quad (4.5)$$

где z — вектор фазовых (базисных, определяющих) координат; $\dot{z} = dz(t)/dt$; x — вектор входных воздействий.

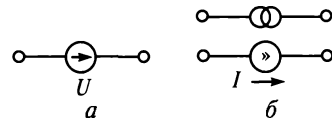


Рис. 4.6. Независимый источник напряжения (а) и независимый источник тока (б)

При решении задач моделирования применяются различные формы представления модели (4.5):

- нормальная форма

$$\dot{z} = \varphi(z, x; t);$$

- линеаризованная форма

$$\dot{z} = Az(t) - Bx(t); \quad (4.6)$$

- алгебраизованная и линеаризованная форма

$$M_n z_n = B_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Здесь A, B — матрицы соответствующих размерностей; M_n, B_n, z_n — значения компонентов модели, которые имеют место в момент времени $t = t_n$.

Линеаризация и алгебраизация могут осуществляться как ко всем, так и к отдельным переменным, уравнениям или их частям.

Наряду с рассмотренными формами математических моделей широко используются схемные формы представления моделей объектов, в частности в виде эквивалентных схем и графов. Эквивалентные схемы строят на основе принципиальных электрических схем с использованием общепринятых обозначений двухполюсников и добавлением ветвей с учитываемыми паразитными параметрами. В эквивалентных схемах для отражения взаимосвязей подсистем используются различные виды связей и преобразовательные элементы. Соотношения между фазовыми переменными двух подсистем реализуются с помощью трансформаторной и гираторной связей.

Например, на рис. 4.7 приведена эквивалентная схема биполярного транзистора, которая включает четыре резистивных элемента: $R_б, R_к$ — объемные сопротивления базы и коллектора; $R_{yэ}, R_{yк}$ — сопротивления утечки переходов; два емкостных: $C_э, C_к$ — емкости переходов; три источника тока: $I_{эд}, I_{кд}, I_г$ — токи пере-

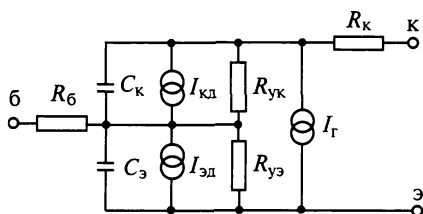


Рис. 4.7. Эквивалентная схема биполярного транзистора

ходов, являющиеся функциями $U_{сэ}, U_{ск}$ на емкостях [21].

Основу ММ составляют компонентные уравнения

$$\dot{U}_{сэ} = \frac{1}{C_э} (I_э(t) - I_г(t) - I_{эд}(t));$$

$$\dot{U}_{ск} = \frac{1}{C_к} (I_к(t) - I_г(t) - I_{кд}(t)).$$

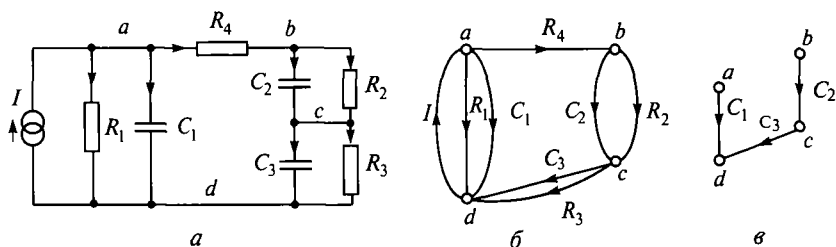


Рис. 4.8. Эквивалентная схема фрагмента электрической цепи (а), ориентированный граф $G(V, D_n)$ (б), покрывающее дерево $G_\pi(V, D_n)$ (в)

На основе эквивалентных схем составляются топологические уравнения. Для этого эквивалентные схемы удобно представлять ориентированными (направленными) графами, что облегчает выбор фазовых (базисных) переменных и запись уравнений. Рассмотрим последовательность составления топологических уравнений на примере простой эквивалентной схемы, показанной на рис. 4.8 [21]. Подробнее элементы теории графов рассматриваются в подразд. 4.5.

1. На эквивалентной схеме обозначаются участки (узлы), имеющие одинаковые электрические потенциалы, и стрелками указываются направления токов. Для рассматриваемой схемы таких участков четыре, они соответствуют множеству вершин $\{a, b, c, d\}$ ориентированного графа (рис. 4.8, б). Направления токов в ветвях схемы могут выбираться произвольно, в последующем неправильно выбранные направления будут скорректированы заменой знаков соответствующих коэффициентов.

2. На основе сформированного множества вершин строится ориентированный граф $G(V, D)$, дуги $d \in D$ которого соответствуют ветвям эквивалентной схемы. Таким образом, полученный граф (см. рис. 4.8, б) имеет четыре вершины (множество $V = \{a, b, c, d\}$) и восемь дуг (множество $D = \{I, R_1, R_2, R_3, R_4, C_1, C_2, C_3\}$).

3. В графе $G(V, D)$ выделяется покрывающее (фундаментальное, остовное) дерево $G_\pi(V, D_\pi)$, которое включает все вершины и дуги $(|V| - 1)$, соединяющие вершины таким образом, чтобы в дереве не было ни одного замкнутого контура, здесь $|V|$ — число вершин графа G (мощность множества V). Пример выделенного дерева с $D_\pi = \{C_1, C_2, C_3\}$ показан на рис. 4.8, в, на графе $G(V, D)$ дуги $d_i \in D_\pi$ выделены утолщенными линиями. В результате множество дуг D графа $G(V, D)$ разбивается на два подмножества: подмножество ветвей дерева $D_{вд} = D_\pi$ и подмножество хорд $D_x = D \setminus D_{вд} = \{I, R_1, R_2, R_3, R_4\}$.

4. В соответствии с выделенным деревом записывается матрица $M = \|m_{ij}\|_{k,n}$, число строк k которой равно числу хорд ($k = |D_x|$), а число столбцов n — числу ветвей дерева ($n = |D_{вд}|$). Элементы матрицы M определяются следующим образом: $m_{ij} = -1$, если при подключении к дереву G_n i -й хорды d_i образуется контур с j -й ветвью d_j и направления дуг d_i, d_j в контуре совпадают (например, $d_i = I, d_j = C_1$); $m_{ij} = +1$, если направления дуг d_i, d_j не совпадают (например, $d_i = R_1, d_j = C_1$); $m_{ij} = 0$, если хорда d_i с ветвью d_j контура не образуют (например, $d_i = R_2, d_j = C_1$). Полученную матрицу M называют матрицей контуров и сечений. Для рассматриваемого примера M -матрица имеет вид

		Ветви дерева ($D_{вд}$)		
		C_1	C_2	C_3
Хорды (D_x)	I	$\left(\begin{array}{ccc} +1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & +1 & +1 \end{array} \right)$		
	R_1			
	R_2			
	R_3			
	R_4			

5. С использованием M -матрицы записываются топологические уравнения для векторов напряжений и токов:

$$U_x - MU_{вд} = 0; \quad I_{вд} + M^T I_x = 0,$$

где U_x, I_x — векторы напряжений и токов хорд; $U_{вд}, I_{вд}$ — векторы напряжений и токов ветвей покрывающего дерева; M^T — транспонированная матрица контуров и сечений.

Математические модели на макроуровне необходимы для автоматизированного решения широкого круга задач конструкторского и технологического проектирования. К этим задачам прежде всего относятся следующие:

- исследование влияния значений элементов электрической схемы на функциональные характеристики модулей, блоков и элементов радиосистемы, т. е. решение задач анализа чувствительности;
- оценка показателей надежности проектируемой РЭС, в том числе при эксплуатации в различных условиях; создание систем диагностики для устранения возможных отказов;
- моделирование и оптимизация режимов работы узлов и блоков РЭС;
- настройка элементов РЭС и систем автоматического управления режимами работы;

- решение задач модернизации ранее спроектированных РЭС с целью улучшения их тактико-технических характеристик.

К дополнительным требованиям, предъявляемым к ММ на макроуровне по сравнению с приведенными в подразд. 4.1, следует отнести:

- высокую степень универсальности, которая должна охватить номенклатуру элементов и частей проектируемых РЭС и протекающих в них процессов;
- возможность адаптации к различным производственным и эксплуатационным условиям, т. е. необходима возможность ввода в модели различного рода возмущающих воздействий;
- способность к агрегированию, чтобы на основе моделей сравнительно простых элементов можно было оперативно создавать модели более сложных частей РЭС и систем в целом.

Проектируемые объекты с использованием ММ на макроуровне могут анализироваться во временной и частотной областях. Анализ во временной области используется для исследования переходных процессов, оценки динамических свойств объектов (быстродействия, максимальных отклонений от требуемых значений и т. д.) при различных входных воздействиях. Достоинством данного вида анализа является возможность его применения как для линейных, так и нелинейных систем. Анализ в частотной области применяется при исследовании колебательных процессов в объекте, устойчивости, определении частотных характеристик, полосы пропускания и т. д. При этом анализируемые нелинейные объекты обычно линеаризуются.

4.4. Моделирование цифровых устройств

В настоящее время многие РЭС основаны на цифровой обработке сигналов, радиосистемы имеют процессорные модули, память, интерфейсы, операционную систему и т. д. Архитектура таких РЭС напоминает архитектуру ПЭВМ. Во многом это связано с тем, что практически все радиосистемы в настоящее время содержат автоматические устройства, построенные на базе микропроцессорной техники, которая имеет дело с цифровыми сигналами. Наличие микропроцессора в радиосистеме приводит к необходимости преобразования непрерывных (аналоговых) сигналов, заключающегося в их дискретизации по времени и квантовании по уровню. На выходе отдельных устройств системы цифровые сигналы преобразуются в аналоговые. Такие системы следует рассматривать как непрерывно-дискретные или цифровые системы.

Анализ и синтез цифровых систем требует введения новых понятий, появляются дополнительные элементы в функциональных и структурных схемах системы (аналого-цифровые преобразователи, цифро-аналоговые преобразователи и др.), а также программное обеспечение для микропроцессоров или ЭВМ, используемых в контуре управления. При переходе от описания работы радиосистем обыкновенными дифференциальными уравнениями (непрерывными по времени) к разностным уравнениям, используемым для дискретных систем, возможны качественные изменения свойств системы, в частности из управляемой система может стать неуправляемой.

В дискретных системах (ДС) используются различные виды сигналов, получаемых в результате квантования и аналого-цифрового преобразования непрерывного по времени и амплитуде сигнала $x(t)$ (рис. 4.9, а). К этим сигналам относятся следующие:

- непрерывный по амплитуде и дискретный во времени сигнал (амплитудно-импульсный модулированный сигнал) $x(kT_0, h)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ с постоянным шагом квантования T_0 при длительности импульса h (рис. 4.9, б), в моменты времени $t = kT_0$, $k = 0, 1, 2, \dots$, для него имеет место

$$x(kT_0, h) = x(t);$$

- решетчатый непрерывный по амплитуде и дискретный во времени сигнал (амплитудно-модулированный дискретный сигнал) $x(k, T_0)$, получаемый аналогично $x(kT_0, h)$ при $h \ll T_0$ (рис. 4.9, в), при этом

$$x(k, T_0) = x(kT_0, h) = x(t), \quad t = kT_0, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

- дискретный по амплитуде и непрерывный во времени с шагом квантования T_0 сигнал $x_a(kT_0)$ (рис. 4.9, г), при этом

$$x_a(kT_0) = x(t), \quad t = kT_0, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

- дискретный по амплитуде и во времени сигнал $x_a(kT_0, h)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ (рис. 4.9, д);
- решетчатый дискретный по амплитуде и во времени сигнал (рис. 4.9, е)

$$x_a(k, T_0) = \begin{cases} x(t) & \text{при } t = kT_0; \\ 0 & \text{при } t \in (kT_0, (k+1)T_0), \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

- дискретный по амплитуде и непрерывный во времени (ступенчатый) сигнал $x_a(t)$ (рис. 4.9, ж).

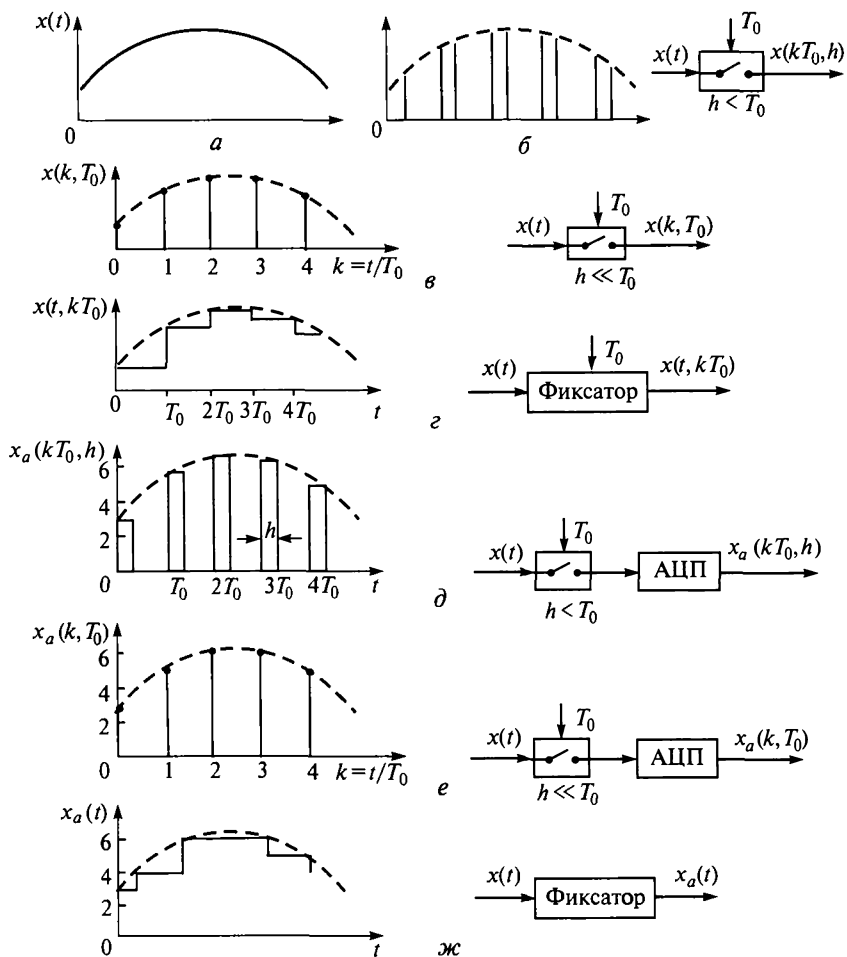


Рис. 4.9. Типы сигналов дискретных систем:
а — $x(t)$; б — $x(kT_0, h)$; в — $x(t, kT_0)$; г — $x(k, T_0)$; д — $x_a(kT_0, h)$;
е — $x_a(k, T_0)$; ж — $x_a(t)$

Наряду с перечисленными в дискретных системах могут применяться двоичные по амплитуде и дискретные во времени сигналы (рис. 4.10), поток битов, полосовые цифровые сигналы и др.

В автоматических радиосистемах (АРС) информация поступает в цифровое управляющее устройство в дискретные моменты времени $t = kT_0$, $k = 0, 1, 2, \dots$, поэтому между моментами дискретизации АРС является разомкнутой, т.е. сигнал $y(t)$ с выхода системы по каналу обратной связи на вход не поступает. Кроме того, обработка информации при формировании сигнала управле-

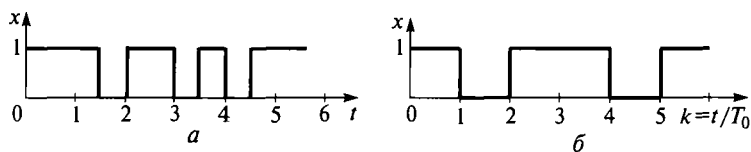


Рис. 4.10. Сигналы двоичные по амплитуде и непрерывные во времени (а) и двоичные по амплитуде и дискретные во времени (б)

ния приводит к появлению времени запаздывания между $y_a(k, T_0)$ и $u_a(k, T_0)$, причем сигнал $u(t)$ зависит не только от алгоритма управления, но и от используемого цифро-аналогового преобразователя. Поэтому система с цифровым управляющим устройством в отсутствие помех не может обеспечить качество работы замкнутой АРС лучше, чем при аналоговичной непрерывной АРС.

При рассмотрении ДС обыкновенным дифференциальным уравнением, описывающим динамические режимы систем с непрерывным временем, соответствуют линейные дискретные модели в виде разностных уравнений, например

$$y(k-n) - \alpha_{n-1}y(k-n-1) - \dots - \alpha_0y(k) = \beta_{n-1}x(k-n-1) - \dots + \beta_0x(k),$$

где $\alpha_i, \beta_i, i = \overline{0, n-1}$, — параметры дискретной модели; $y(k), x(k)$ — выходная и входная переменные вида $y(k, T_0), x(k, T_0)$ или $y_a(k, T_0), x_a(k, T_0)$. В дальнейшем при записи решетчатых сигналов x, y период дискретизации T_0 обычно будет опускаться.

При переходе от обыкновенного дифференциального уравнения к разностному производная $dy(t)/dt$ заменяется на разность первого порядка $\Delta y(k)$ следующим образом:

$$\frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{\Delta y(k)}{T_0}; \quad \Delta y(k) = y(k) - y(k-1), \quad (4.7)$$

вторая производная $d^2y(t)/dt^2$ — на разность второго порядка $\Delta^2 y(k)$:

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} \approx \frac{\Delta^2 y(k)}{T_0^2}, \quad \Delta^2 y(k) = \Delta y(k) - \Delta y(k-1) = y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)$$

и т. д.

Разность $\Delta y(k)$ в (4.7) называется левой разностью, наряду с ней может использоваться и правая разность

$$\Delta y'(k) = y(k-1) - y(k).$$

Например, дифференциальному уравнению первого порядка

$$T \frac{dy(t)}{dt} = x(t)$$

в разностной форме при периоде дискретизации T_0 на основе (4.7) соответствует разностное уравнение

$$y(k) - y(k-1) = \frac{T_0}{T} x(k).$$

По аналогии с использованием преобразования Лапласа при анализе и синтезе непрерывных систем в случае дискретных систем применяются $\mathcal{D}$ -преобразование и $\mathcal{Z}$ -преобразование. $\mathcal{D}$ -Преобразование, или дискретное преобразование Лапласа, решетчатой функции $f(k)$ (оригинала) определяется зависимостью

$$\mathcal{D}\{f(k)\} = F(q) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)e^{-qk} \quad (4.8)$$

где $q = pT_0$ — переменная $\mathcal{D}$ -преобразования; $p = c + j\omega$ — комплексная переменная преобразования Лапласа; $F(q)$ — изображение функции $f(k)$.

Вводя новую переменную $z = e^q$, из (4.8) получают формулу для $\mathcal{Z}$ -преобразования

$$\mathcal{Z}\{f(k)\} = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k)z^{-k}$$

где $F(z)$ — изображение решетчатой функции $f(k)$.

При определении передаточных функций ДС используются операторы сдвига вперед и назад. Оператор сдвига вперед (упреждения) формально обозначают умножением на z , он обладает следующим свойством:

$$zf(k) = f(k-1),$$

в общем случае

$$z^n f(k) = f(k+n).$$

Оператор сдвига назад z^{-1} выполняет функцию задержки:

$$z^{-1}f(k) = f(k-1) \quad \text{и} \quad z^{-n}f(k) = f(k-n).$$

Например, для дискретной системы, описываемой разностным уравнением

$$\alpha_n y(k-n) - \alpha_{n-1} y(k-n-1) - \dots - \alpha_1 y(k-1) - \alpha_0 y(k) = \\ = \beta_m x(k-m) - \beta_{m-1} x(k-m-1) - \dots - \beta_1 x(k+1) - \beta_0 x(k), \quad (4.9)$$

с использованием оператора сдвига вперед получаем

$$\alpha_n z^n y(k) - \alpha_{n-1} z^{n-1} y(k) - \dots + \alpha_1 z y(k) - \alpha_0 y(k) =$$

$$= \beta_m z^m x(k) + \beta_{m-1} z^{m-1} x(k) + \dots + \beta_1 z x(k) + \beta_0 x(k),$$

или

$$\alpha(z)y(k) = \beta(z)x(k), \quad (4.10)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha(z) &= \alpha_n z^n + \alpha_{n-1} z^{n-1} + \dots + \alpha_1 z + \alpha_0; \\ \beta(z) &= \beta_m z^m + \beta_{m-1} z^{m-1} + \dots + \beta_1 z + \beta_0. \end{aligned}$$

В соответствии с (4.10) передаточная функция (ПФ) системы $W(z)$, определяемая как

$$W(z) = \frac{y(k)}{x(k)},$$

имеет вид

$$W(z) = \frac{\beta(z)}{\alpha(z)}.$$

Аналогично, представив уравнение (4.9) в виде

$$\begin{aligned} &\alpha_n y(k) + \alpha_{n-1} y(k-1) + \dots + \alpha_1 y(k-n+1) + \alpha_0 y(k-n) = \\ &= \beta_m x(k+m-n) + \beta_{m-1} x(k+m-n-1) + \dots + \beta_1 x(k-n+1) + \beta_0 x(k-n), \end{aligned}$$

с использованием оператора сдвига назад получаем

$$\alpha(z^{-1})y(k) = \beta(z^{-1})x(k)$$

и

$$W(z) = \frac{\beta(z^{-1})}{\alpha(z^{-1})},$$

где

$$\begin{aligned} \alpha(z^{-1}) &= \alpha_n + \alpha_{n-1} z^{-1} + \dots + \alpha_1 z^{-n+1} + \alpha_0 z^{-n}; \\ \beta(z^{-1}) &= \beta_m z^{-n+m} + \beta_{m-1} z^{-n+m-1} + \dots + \beta_1 z^{-n+1} + \beta_0 z^{-n} \end{aligned}$$

Полученные уравнения справедливы при нулевых начальных условиях, т. е. при всех $k \leq 0$ должно выполняться $x(k) = 0$ и $y(k) = 0$.

Для дифференциального уравнения системы «вход-выход»

$$\begin{aligned} &a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ &= b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t), \quad m \leq n, \end{aligned}$$

можно записать разностное уравнение

$$y(k) + \alpha_1 y(k-1) + \dots + \alpha_n y(k-n) = \beta_0 x(k) + \beta_1 x(k-1) + \dots + \beta_m x(k-m).$$

Используя оператор сдвига или Z -преобразование при нулевых начальных условиях, получаем

$$y(k)(1 - \alpha_1 z^{-1} - \dots - \alpha_n z^{-n}) = x(k)(\beta_0 - \beta_1 z^{-1} - \dots - \beta_m z^{-m})$$

и соответственно ПФ дискретной системы (дискретную передаточную функцию)

$$W(z) = \frac{\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_m z^{-m}}{1 - \alpha_1 z^{-1} - \dots - \alpha_n z^{-n}}, \quad (4.11)$$

которая позволяет определять выход y по значению входа x .

В пространстве переменных состояния $\bar{z}$ модель линейной стационарной дискретной системы имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{z}(k+1) &= \Phi \bar{z}(k) - \Gamma x(k); \\ y(k) &= C \bar{z}(k) - D x(k), \end{aligned} \quad (4.12)$$

где $\bar{z}$ — n -вектор фазовых координат в дискретной форме (в отличие от аргумента z изображения Z -преобразования переменные состояния выделены чертой сверху); x — m -вектор входа; y — r -вектор выхода; $\Phi \in R^{n \times n}$, $\Gamma \in R^{n \times m}$, $C \in R^{r \times n}$, $D \in R^{r \times m}$ — матрицы параметров.

Если системе (4.12) соответствует непрерывная система (4.6), то для периода квантования T_0 имеет место

$$\Phi = e^{AT_0}; \quad \Gamma = \int_0^{T_0} e^{A(T_0-\tau)} B d\tau.$$

Статическую характеристику (передаточный коэффициент) дискретной системы можно получить из выражения передаточной функции, если принять $z = 1$. В этом случае для ПФ (4.11) статическая характеристика определяется формулой

$$W(1) = \frac{\sum_{i=0}^m \beta_i}{1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

Звену чистого запаздывания с ПФ $W_3(p) = e^{-\tau p}$, если $\tau = dT_0$, $d = 1, 2, 3, \dots$, соответствует импульсная передаточная функция

$$W(z) = \frac{b}{1 - \alpha_1 z^{-1}} = \frac{bz}{z - \alpha_1}.$$

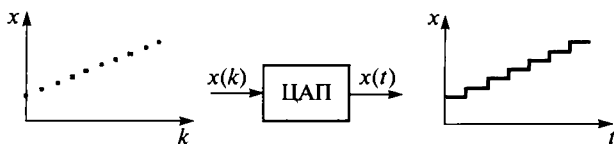


Рис. 4.11. Восстановление квантованного сигнала

В результате передаточная функция ДС при наличии запаздывания записывается в виде

$$W(z) = \sum_{i=0}^m \beta_i z^{-d} \left(1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i z^{-d} \right)^{-1}$$

Как правило, в цифровых автоматических системах объект управления рассматривается как непрерывный, а управляющее устройство реализуется средствами вычислительной техники на базе микропроцессоров. Поэтому в таких системах используются элементы преобразования непрерывных сигналов в дискретные и обратно, а также обработки сигналов, представленных цифровым кодом, которые не требовались в непрерывных системах. Для сопряжения аналоговых модулей радиосистемы с бортовой или управляющей ЭВМ с объектом применяются специализированные устройства ввода-вывода информации, называемые устройствами сопряжения с объектом (УСО).

Объекты управления автоматических систем могут иметь исполнительные и измерительные устройства как аналогового, так и цифрового типа. Например, в качестве исполнительных устройств применяются электроприводы, рассчитанные на аналоговые входные сигналы, или цифровые электроприводы, воспринимающие цифровую информацию. Основными элементами цифровых радиосистем являются управляющая ЭВМ, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), цифровые фильтры (ЦФ), цифровые фазовые детекторы и др.

Непрерывный сигнал из квантованного восстанавливается с помощью экстраполятора. Наиболее часто для этого применяются ЦАП, которые выполняют функции экстраполятора нулевого порядка (рис. 4.11) и формируют кусочно-постоянный сигнал.

В цифровых следящих радиосистемах наряду с АЦП и ЦАП используются цифровые фазовые детекторы, цифровые частотные дискриминаторы, цифровые временные дискриминаторы, цифровые синтезаторы частот, цифровые фильтры и другие цифровые устройства. Цифровые фильтры, в частности, выполняют следующие функции:

- обеспечение требуемой формы дискретных сигналов;
- устранение высокочастотных гармонических составляющих после ЦАП;
- формирование корректирующих устройств и др.

Для реализации корректирующих устройств используют различные виды ЦФ. В общем случае передаточную функцию ЦФ, реализующего корректирующее устройство со входом x и выходом y , можно записать в виде

$$W_{\text{кф}}(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{d_m z^{m-l} + d_{m-1} z^{m-1-l} + \dots + d_0 z^{-l}}{1 + a_{l-1} z^{-1} + a_{l-2} z^{-2} + \dots + a_0 z^{-l}},$$

при этом

$$Y(z) = \sum_{i=0}^m d_i z^{i-l} X(z) - \sum_{i=0}^{l-1} a_i z^{i-l} Y(z).$$

При моделировании дискретных устройств различают синхронные и асинхронные модели [21]. Синхронные модели состоят из логических уравнений для описания установившихся состояний, в этих моделях переменная времени отсутствует. Их основу составляют логические операции конъюнкции (И), дизъюнкции (ИЛИ) и отрицания (НЕ), реализуемые простейшими элементами цифровых устройств — конъюнктором, дизъюнктором и инвертором (рис. 4.12). Этим моделям соответствуют синхронные схемы цифровых устройств, передача сигналов в них происходит с частотой синхронизирующих (тактовых) импульсов, которые вырабатываются специальным генератором и подаются на синхровходы устройств. Частота тактовых импульсов выбирается с учетом того, чтобы к моменту прихода нового синхроимпульса переходные процессы, вызванные предыдущим импульсом, практически закончились.

Асинхронные модели также включают логические операции и, кроме того, отражают временные задержки при распространении сигналов элементами и модулями РЭС. В общем виде асинхронная модель логического элемента записывается в виде

$$y(t) = f_{\text{л}}[x(t - t_{\text{зад}})].$$

где $f_{\text{л}}$ — логическая функция; x — входной сигнал; $t_{\text{зад}}$ — время задержки сигнала в элементе.

В ДС следует различать статические и динамические риски сбоя. Возникновение статического риска сбоя рассмотрим на примере элемента И при подаче на его входы двух сигналов в проти-

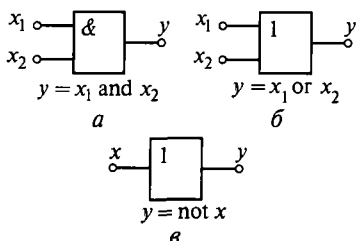


Рис. 4.12. Простейшие логические элементы:

a — конъюнктор; *б* — дизъюнктор; *в* — инвертор (x_1, x_2 — входы, y — выход)

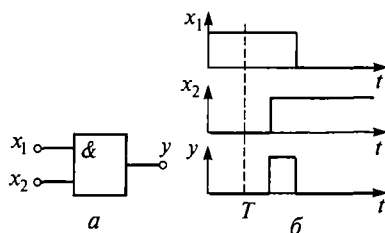


Рис. 4.13. Пример статического риска сбоя:

a — схема элемента; *б* — диаграмма сигналов

воположных направлениях (рис. 4.13, б). В идеальном случае оба перепада должны приходить в момент времени T одновременно. Вследствие разброса времени задержек сигналы x_1, x_2 могут поступить на входы так, как показано на рис. 4.13, б. В этом случае на выходе элемента появляется импульс помехи, который может привести к сбою в работе всего устройства. Для выявления и устранения таких рисков сбоя применяют трехзначное синхронное моделирование [21].

Тремя возможными значениями сигналов x_i и y считают 0, 1, $\otimes$, где $\otimes$ интерпретируется как неопределенность. В табл. 4.4 приведены правила выполнения основных логических операций И, ИЛИ, НЕ в трехзначном алфавите.

На каждом этапе решения уравнений модели элемента при анализе рисков сбоя выполняют двукратное решение, при этом рассматриваются исходные, промежуточные (после первого решения) и итоговые (после второго решения) значения переменных. Для входных сигналов x_1, x_2 допустимы следующие последователь-

Таблица 4.4
Основные логические операции в трехзначном алфавите

Вход x_1	НЕ	Элементы	
		И	ИЛИ
		Вход x_2	
		0 — $\otimes$ — 1	0 — $\otimes$ — 1
		Выход y	
0	1	0 — 0 — 0	0 — $\otimes$ — 1
$\otimes$	$\otimes$	0 — $\otimes$ — $\otimes$	$\otimes$ — $\otimes$ — 1
1	0	0 — $\otimes$ — 1	1 — 1 — 1

Т а б л и ц а 4.5

Пример трехзначного моделирования

Последовательность значений	x_1	x_2	y
Исходная	1	0	0
Промежуточная	$\otimes$	$\otimes$	$\otimes$
Итоговая	0	1	0

ности исходных, промежуточных и итоговых значений: $0 - 0 - 0$, $1 - 1 - 1$, $0 - \otimes - 1$, $1 - \otimes - 0$. Появление последовательностей $0 - \otimes - 0$ или $1 - \otimes - 1$ для других переменных означает возможность статического риска сбоя [21].

Результаты трехзначного моделирования для диаграммы сигналов (см. рис. 4.13, б) представлены в табл. 4.5.

Трехзначный алфавит может использоваться и в асинхронных моделях, когда неопределенное значение обусловлено случайным разбросом времени задержки $t_{\text{зад}}$.

Динамический риск сбоя выражается в появлении нескольких перепадов выходного сигнала y вместо одного при правильном функционировании схемы. Обнаружение динамических рисков сбоя производится аналогично статистическим рискам, но с использованием пятизначного алфавита $\{0, 1, \otimes, \alpha, \beta\}$, где α означает положительный перепад, β — отрицательный перепад. На динамический риск сбоя указывают появления последовательностей $0 - \otimes - 1$ или $1 - \otimes - 0$.

В настоящее время выпускается большое число контроллеров, которые обеспечивают цифровую обработку сигналов и расчет управляющих воздействий для объектов с несколькими входами, а также групп объектов. Эти контроллеры предусматривают функционирование с различными видами сигналов на входе и выходе — цифровыми, аналоговыми, широтно-модулированными и др.

4.5. Графовые модели конструкций РЭС

Как уже отмечалось, важными принципами конструирования РЭС являются принципы модульности и иерархичности. В соответствии с этими принципами конструкция радиосистемы имеет иерархическую структуру, состоящую из компонентов (модулей) разной степени сложности (рис. 4.14). Здесь компоненты верхнего уровня представляют собой шкафы, стойки и т.п. Каждый шкаф Π_i состоит из нескольких блоков (панелей, кассет) $B_j(\Pi_i)$, $j = \overline{1, n_i}$. В свою очередь, блоки содержат печатные платы $\Pi_k(B_{ji})$, $k = \overline{1, n_{ji}}$, на которых расположены модули нижнего уровня

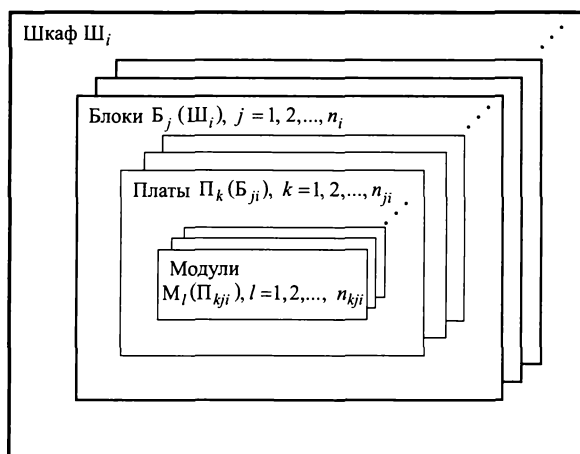


Рис. 4.14. Иерархия конструктивных модулей

$M_l(P_{kji}), l = \overline{1, n_{kji}}$, в виде неделимых устройств (микросхем, транзисторов и других электрорадиоэлементов). Через n_i, n_{ji}, n_{kji} на рисунке обозначено число блоков в i -м шкафу, число плат в j -м блоке i -го шкафа и число элементов на k -й плате j -го блока i -го шкафа соответственно.

Математические модели представленных на рис. 4.14 конструктивных модулей должны позволять в автоматизированном режиме решать следующие задачи:

- компоновки модулей;
- размещения модулей низших уровней в вышестоящих уровнях;
- трассировки соединений;
- получения конструкторско-технологической документации.

Под задачей компоновки обычно понимается задача оптимального распределения модулей низшего уровня по конструктивным модулям высшего уровня.

Задача размещения заключается в определении наилучшего расположения задаваемого множества элементов (модулей) в коммутационном (монтажном) пространстве, например микросхем на печатной плате, плат в блоке и т. д.

Задачи трассировки проводных и печатных соединений заключаются в оптимизации соединений между контактами модулей (элементов) при различного рода ограничениях.

Достаточно подробно постановка и методы решения задач компоновки, размещения и трассировки рассматриваются в пятой главе. При решении задач используются математические модели монтажно-коммутационного пространства и принципиальных элект-

рических схем проектируемых РЭС. В этих моделях широко используется аппарат теории графов и теории множеств.

Простейший граф G определяется множеством вершин $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ и множеством ребер $R = \{r_1, \dots, r_m\}$. Ребро $r \in R$ характеризует связь между парой вершин (v_i, v_j) . Геометрически граф $G = G(V, R)$ представляется в виде множества точек V и множества кривых (прямых), соединяющих вершины $v_i, v_j \in V$, которые находятся в некотором отношении друг к другу.

Если связи между вершинами направленные, то мы имеем дело с ориентированными ребрами или дугами, а граф называется ориентированным или направленным графом (сокращенно орграфом) и обозначается $\mathcal{G}(V, D)$, где D — множество дуг.

Вершина v инцидентна дуге $d \in D$ (ребру $r \in R$), если она является началом или концом этой дуги, а дуга d (ребро r) инцидентна вершине v , если она входит или выходит из этой вершины. Вершины v_i и v_j , соединенные ребром или дугой, называются смежными. Смежными называются ребра, которые имеют общую вершину. Дуга (или ребро), начинающаяся и кончающаяся в одной и той же вершине, называется петлей.

Подграфом $G'(V', R')$ графа $G(V, R)$ (или $\mathcal{G}(V', D')$ графа $\mathcal{G}(V, D)$) называется граф с множеством вершин $V' \subseteq V$ и множеством ребер $R' \subseteq R$ (дуг $D' \subseteq D$), каждое из которых инцидентно только вершинам из V' .

Число ребер, инцидентных вершине $v \in V$ графа $G(V, R)$, называется степенью вершины и обозначается $s(v)$. Для орграфа $\mathcal{G}(V, D)$ полустепенью исхода $s_n(v)$ вершины $v \in V$ называется число вершин, смежных из v , а полустепенью захода $s_z(v)$ — число вершин, смежных к v .

Для графа $G(V, R)$ последовательность ребер $r_1 = (v_0, v_1)$, $r_2 = (v_1, v_2), \dots, r_k = (v_{k-1}, v_k)$ называется маршрутом, соединяющим вершины v_0 и v_k . Маршрут называется цепью, если все его ребра различны, и простой цепью, если различны и все его вершины. Замкнутая цепь, в которой $v_0 \equiv v_k$, называется циклом. Граф $G(V, R)$ связный, если любая пара его вершин соединена маршрутом. Длина маршрута (цепи) равна количеству ребер в порядке их прохождения. Длина кратчайшей простой цепи, соединяющей вершины v_i и v_j , называется расстоянием $\rho(v_i, v_j)$ между v_i и v_j .

Аналогично для ориентированного графа $\mathcal{G}(V, D)$ чередующаяся последовательность вершин и дуг $v_0; d_1 = (v_0, v_1); v_1; d_2 = (v_1, v_2); v_2; \dots; v_{k-1}; d_k = (v_{k-1}, v_k); v_k$ называется ориентированным маршрутом, маршрут замкнут, если $v_0 = v_k$. Путем называется маршрут, в котором все вершины различны, кроме первой и

последней. Если существует путь из вершины v_i в v_j , то v_j достижима из v_i . Оргграф $\mathcal{G}(V, D)$ называется сильносвязным (сильным), если любые его вершины взаимно достижимы, и одностороннесвязным, если для любых двух вершин, по крайней мере, одна достижима из другой.

Граф $G(V, R)$ называется деревом, если он связный и не содержит циклов, таким образом, дерево — это простейший связный граф, в котором нет кратных ребер и петель. Любое дерево с n вершинами содержит $n - 1$ ребер. Дерево с одной выделенной вершиной называется корневым деревом. Остовным деревом (остовом) называется подграф $G_0(V_0, R_0)$ графа $G(V, R)$, содержащий все вершины графа G , т. е. $V_0 = V$, и являющийся деревом. Обобщением понятия «дерево» является понятие «лес», лесом называется произвольный граф без циклов (необязательно связный).

Для оргграфа $\mathcal{G}(V, D)$ вершина v_k называется его корнем, если любая другая вершина графа достижима из v_k . Ориентированный граф $\mathcal{G}(V, D)$ называется ориентированным деревом, если он имеет корень и соответствующий ему неориентированный граф $G(V, R)$ является обычным деревом. В ориентированном дереве можно выделить ориентированные поддеревья.

Остовным входящим деревом, или остовом, со стоком в вершине v_c ориентированного графа $\mathcal{G}(V, D)$ называется некоторый подграф $\mathcal{G}_{v_c}$, обладающий следующими свойствами: а) подграф $\mathcal{G}_{v_c}$ содержит все вершины оргграфа $\mathcal{G}(V, D)$; б) v_c как вершина оргграфа $\mathcal{G}_{v_c}$ имеет нулевую полустепень исхода ($s_n(v) = 0$); в) вершина v_c достижима из любой вершины $v \neq v_c$ оргграфа $\mathcal{G}_{v_c}$ единственным путем. Таким образом, остов $\mathcal{G}_{v_c}$ не содержит контуров, а каждая его вершина $v \neq v_c$ имеет $s_n(v) = 1$.

Иллюстрации основных понятий графа $G(V, R)$ и оргграфа $\mathcal{G}(V, D)$ приведены на рис. 4.15.

При решении конструкторских задач размещения и трассировки монтажно-коммутационное пространство (МКП) разбивается на дискреты (элементарные площадки), в которых могут размещаться элементы (модули), например микросхемы на печатной плате. Математическое описание дискретного МПК обычно представляется взвешенным симметрическим графом $G_v(V, R)$, где множество вершин V соответствует множеству установочных площадок, а множество ребер R — множеству связей (ветвей) между позициями. Каждое ребро r_{ij} графа характеризуется весовым коэффициентом c_{ij} , пропорциональным расстоянию между центрами установочных площадок v_i и v_j . Для определения расстояния (длины) l_{ij} между двумя вершинами v_i с координатами (x_i, y_i) и v_j с координатами

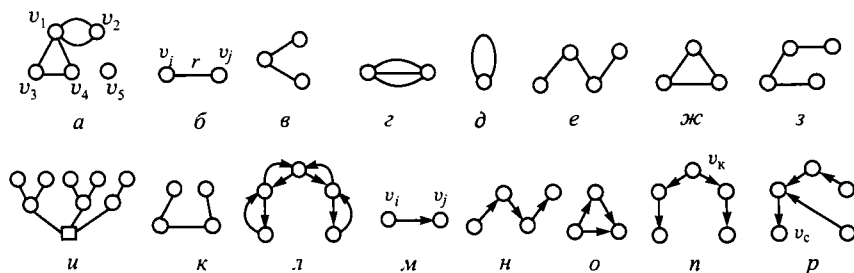


Рис. 4.15. Примеры графов:

a — граф; *б* — ребро с граничными вершинами; *в* — смежные ребра; *г* — кратные ребра; *д* — петля; *е* — цепь; *жс* — цикл; *з* — дерево; *и* — корневое дерево; *к* — лес; *л* — ориентированный граф; *м* — дуга с началом v_i и концом v_j ; *н* — путь; *о* — контур; *п* — ориентированное дерево с корнем v_k ; *р* — остовное входящее дерево со стоком в вершине v_c орграфа *л*

натами (x_i, y_i) на плоскости XOY коммутационного пространства используется одна из следующих формул:

$$l_{ij}^0 = |x_i - x_j| - |y_i - y_j|; \quad (4.13)$$

$$l_{ij}^2 = \sqrt{(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2}; \quad (4.14)$$

$$l_{ij}^k = |(x_i - x_j)^k| - |(y_i - y_j)^k|, \quad k \geq 2. \quad (4.15)$$

Формула (4.13) применяется, когда трассы проводятся по направлениям, параллельным осям координат (с горизонтальными и вертикальными участками), т. е. имеет место ортогональная метрика. При проведении трасс по кратчайшему расстоянию на плоскости используется формула (4.14), т. е. евклидова метрика. Формула (4.15) используется в задачах, когда одновременно минимизируется суммарная длина соединений и значения наиболее «длинных» соединений.

Взвешенный граф может задаваться с помощью матрицы смежности $S_l = \|l_{ij}\|_{|v| \times |v|}$, учитывающей длины ребер, где $|v|$ — число вершин графа. На рис. 4.16 приведены фрагмент МКП и соответствующего ему взвешенного графа. Матрица смежности (смежностей) данного графа записывается в виде

$$S_l = \begin{matrix} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

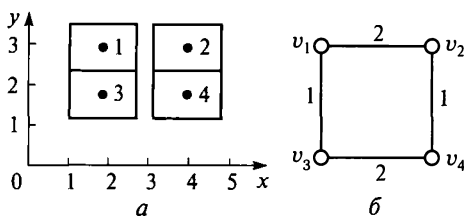


Рис. 4.16. Фрагмент монтажно-коммутационного пространства (а) и взвешенный граф $G_B(V, R)$ (б)

Наряду с рассмотренной дискретно-графовой моделью МКП, использующей ортогональную метрику, могут рассматриваться комбинированные модели, в которых допускается проведение соединений из одной позиции по шести направлениям. Фрагмент такого графа показан на рис. 4.17, соответствующая ему матрица инцидентий $A = \|a_{ij}\|_{|V| \times |R|}$ имеет вид

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{23} & r_{24} & r_{34} \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Широкое применение для моделирования МКП находят мультиграфы $G_M(V, R)$, у которых пары вершин могут соединяться несколькими ребрами.

Пример фрагмента МКП и соответствующего ему мультиграфа показан на рис. 4.18. Между соседними позициями графа в горизонтальном направлении допускается проведение двух соединений, в вертикальном — четырех. Матрица смежности S_M мультиграфа, представленного на рис. 4.18, б, отражает кратности ребер и имеет вид

$$S_l = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 2 & 4 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 4 \\ 4 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 4 & 2 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Электрические принципиальные схемы могут быть представлены различными видами графовых моделей, в том числе в виде взвешенного графа, мультиграфа, графа Кенига и др. На рис. 4.19 приведены фрагмент принципиальной электрической схемы устройства, содержащий три элемента (DD1, DD2, DD3) (рис. 4.19, а), и математическое описание этой схемы с помощью взвешенного графа $G_B(V, R)$ (рис. 4.19, б), мультиграфа $G_M(V, R_M)$ (рис. 4.19, в), графа Кенига $G_K(V_K, R_K)$ (рис. 4.19, г). В этих графах

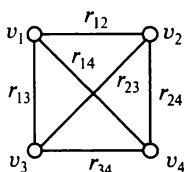


Рис. 4.17. Графовая модель МКП, допускающая проведение соединений по шести направлениям

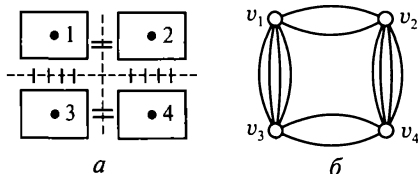


Рис. 4.18. Фрагмент монтажно-коммутационного пространства (а) и соответствующий мультиграф (б)

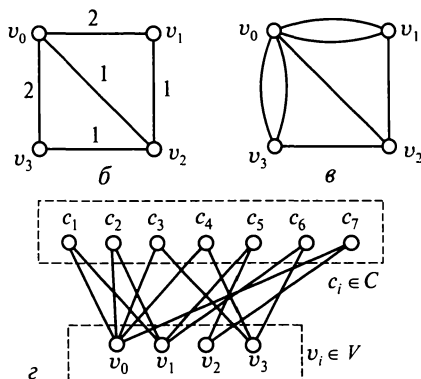
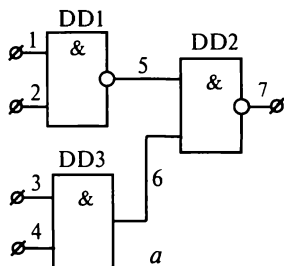
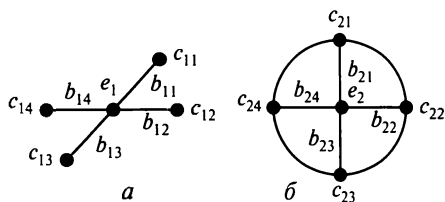


Рис. 4.19. Фрагмент электрической схемы (а), взвешенный граф (б), мультиграф (в) и граф Кенига (г)

множество вершин $V = \{v_0, v_1, v_2, v_3\}$ содержит четыре вершины: три вершины v_i , $i = 1, 2, 3$, соответствуют элементам схемы (DD1, DD2, DD3), а вершина v_0 — фиктивному компоненту, объединяющему внешние контакты. Номерами на схеме обозначены связи (ребра) между вершинами.

Графы $G_v(V, R)$ и $G_m(V, R_m)$ задаются обычными матрицами смежности S . Более полно топологические свойства устройства описывает граф Кенига $G_k(V_k, R_k)$, который представляет собой двудольный, или бихроматический, граф. Для его задания формируется два непересекающихся подмножества вершин V и C , элементами подмножества C являются эквипотенциальные электрические соединения элементов схемы (по существу ребра графа G_m).

Рис. 4.20. Графовые модели компонентов с гибкими выводами (а) и жестко фиксированными выводами (б)



Матрица смежностей S_K графа G_K имеет следующий вид:

$$S_K = \begin{matrix} & v_0 & v_1 & v_2 & v_3 & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 \\ \begin{matrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

В качестве моделей отдельных компонентов электрической схемы, имеющих несколько контактов, широко используются звездные графы $G_s(e, C, B)$. Здесь e — вершина, характеризующая сам компонент; C — множество контактов компонента; B — множество ветвей, определяющих принадлежность контактов c_{ij} компоненту e_i . На рис. 4.20 показаны примеры графов G_s для компонентов с нефиксированными (гибкими) выводами (рис. 4.20, а) и компонента, для которого порядок выводов жестко фиксирован и проведение проводников между выводами недопустимо (рис. 4.20, б). В последнем случае граф замкнутый, типа «колесо».

С использованием звездных графов компонентов строится графовая модель всего устройства. Пример такой модели $G_s(V_s, R_s)$ для фрагмента схемы рис. 4.19, а показан на рис. 4.21. Множество вершин V_s графа объединяет подмножества вершин $E = \{e_0, e_1, e_2, e_3\}$, соответствующих множеству конструктивных модулей схемы, с подмножествами $C_i = \{c_{ij}\}$, $i = 0, 1, 2, 3$, содержащих выводы компонентов (c_{ij} — соответствует j -му выводу i -го компонента). Таким образом, V_s определяется соотношением

$$V_s = E \cup \left(\bigcup_{i=0}^3 C_i \right)$$

Множество ветвей (ребер) R_s содержит подмножество W связей между компонентами и подмножества ветвей $B_i = \{b_{ij}\}$, $i = 0, 1, 2, 3$, соответствующих контактам компонентов схемы. В нашем случае $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_7\}$, $B_0 = \{b_{01}, b_{02}, \dots, b_{05}\}$ и т.д.

Модель $G_s(V_s, R_s)$ удобно задавать с помощью двух матриц инцидентий: матрицы A_E , определяющей отношение контактов к

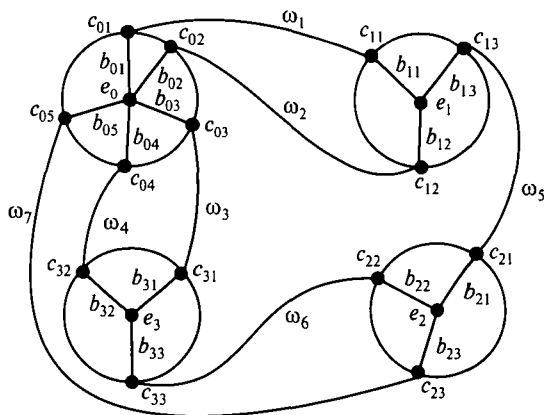


Рис. 4.21. Графовая модель устройства, использующая звездные графы компонентов

компонентам, и матрицы A_W , определяющей связи контактов с ветвями $\omega \in W$

Число строк матрицы A_E равно $|E|$, а число столбцов — общему числу контактов компонентов. Для графа, представленного на рис. 4.21, матрица A_E имеет следующий вид:

$$A_E = \begin{matrix} & c_{01} & c_{02} & c_{03} & c_{04} & c_{05} & c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ \begin{matrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Как видно из построенной матрицы A_E , в каждом ее столбце содержится только одна единица, так как конкретный вывод c_{ij} может принадлежать только одному компоненту e_i . Число единиц в i -й строке равно числу выводов у компонента e_i .

Матрица A_W имеет то же число столбцов, что и матрица A_E , а число строк в ней равно $|W|$. В нашем случае матрица A_W записывается в виде

$$A_W = \begin{matrix} & c_{01} & c_{02} & c_{03} & c_{04} & c_{05} & c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ \begin{matrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \\ \omega_5 \\ \omega_6 \\ \omega_7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Каждый столбец матрицы A_W содержит одну единицу, а число единиц в строке равно числу выводов (контактов), объединяемых одной электрической цепью.

Определенным недостатком рассмотренных графовых моделей является то, что они не отражают функциональные свойства компонентов моделируемых устройств. Дальнейшим развитием моделей, использующих теорию графов, являются гиперграфовые и ультраграфовые модели [2].

4.6. Математические модели на системном уровне

Математическое моделирование проектируемых радиосистем существенно отличается от моделирования отдельных устройств, входящих в систему. Эти отличия заключаются в следующем:

- моделирование функционирования системы в целом следует выполнять с учетом различных взаимосвязей ее элементов, только в этом случае можно исследовать ее системные свойства, которыми не обладают части, рассматриваемые по отдельности, другими словами, систему нельзя моделировать диакоптически (по отдельным составляющим ее устройствам), так как это не позволит выявить все особенности работы радиосистемы, обусловленные взаимосвязями частей;
- следует учитывать высокие размерности векторов переменных (фазовых координат, управляющих и возмущающих воздействий и др.), входящих в модель системы;
- радиосистемы характеризуются большой сложностью (большим числом компонентов) при слабой структурированности теоретических и фактических знаний как о системе в целом, так и о ее компонентах;
- элементы системы физически разнородны, в их основе лежат различные принципы действия, протекающие в них процессы имеют разную природу;
- на функционирование системы влияет большое число воздействий и факторов, характеризующихся случайностью и неопределенностью; отдельные связи между компонентами носят стохастический характер;
- большинство процессов, протекающих в системе, отличаются быстродействием, в качестве носителей информации используются разного вида сигналы, в том числе на сверхвысоких частотах;

- качество функционирования системы оценивается большим числом частных показателей.

Таким образом, ММ на системном уровне должны отражать все взаимосвязи многочисленных устройств системы радиосвязи, их характеристики, различного рода внутренние и внешние факторы. Например, на решение с использованием ММ таких важных задач, как оценка дальности действия и точности системы радиосвязи, большое влияние оказывает взаимодействие (согласование характеристик) передающего, антенно-фидерного и приемного устройств, а также наличие естественных и искусственных помех.

Математические модели на системном уровне широко применяются при проектировании РЭС для решения задач оценки эффективности работы в различных состояниях функционирования. Наиболее важной задачей моделирования является проверка выполнения требований к радиосистеме, содержащихся в техническом задании, в частности по характеристикам целевого назначения системы, надежности, помехозащищенности и т. д. Применение ММ позволяет имитировать работу системы в различных ситуациях до изготовления макетов и опытных образцов, сократить число дорогостоящих экспериментов на действующей системе, определить предельные условия работы системы без ее разрушения и др.

Процесс моделирования радиосистемы выполняется на ЭВМ и включает следующие основные этапы:

- формализация проектных задач, которые предполагается решать с использованием ММ;
- разработка требований к модели;
- построение обобщенной математической модели системы;
- планирование и организация вычислительных экспериментов;
- разработка программного обеспечения для проведения вычислительных экспериментов и проверка адекватности разработанной модели;
- выполнение машинных экспериментов;
- обработка результатов вычислительных экспериментов и использование их для решения проектных задач.

При разработке модели на системном уровне сначала строится формальная аналитическая модель на основе знаний о проектируемой системе, затем по аналитической модели разрабатывается программа для ЭВМ, т. е. машинная модель.

Формальные, или алгоритмические, модели применяются на разных уровнях моделирования радиосистем. В зависимости от степени детализации системы и описываемых свойств выделяют:

- модели потенциальной предельной достижимости;

- системотехнические (имитационные) модели;
- функциональные модели;
- схемотехнические модели и др.

Модели потенциальной предельной достижимости строятся на основе фундаментальных физических законов, они позволяют оценить показатели эффективности проектируемой системы.

Системотехнические, или имитационные, модели делятся на дискретные, непрерывные и комбинированные. Для разработки имитационных моделей обычно применяется агрегативный подход [30], в соответствии с которым радиосистема декомпозируется на ряд подсистем (компонентов) с сохранением взаимосвязей. Функционирование компонентов описывается математическими агрегатами. Каждый агрегат представляется многополюсником с входными и выходными зажимами, соответствующие поступающие и снимаемые сигналы называются входными и выходными. Состояние агрегата в каждый момент времени определяется вектором фазовых координат (вектором состояния). Связь между переменными агрегата определяется двумя операторами, аналогичными операторам динамической системы. Для описания соединений агрегатов составляется таблица, в которой единицы означают наличие связи между агрегатами, а нули — отсутствие. В ходе моделирования агрегаты обмениваются сигналами согласно таблице соединений, имитируя работу системы.

Широкими возможностями для исследования радиосистем обладают дискретные имитационные модели (ДИМ), позволяющие отразить разные аспекты динамики работы системы. Имитируемый процесс функционирования такой системы представляет собой упорядоченную во времени последовательность событий или действий. Под действием понимается изменение состояния компонентов или всей системы, а событие определяет начало или конец действия. Предполагается, что состояние системы может изменяться только в моменты времени совершения событий. В зависимости от способа организации действий выделяют четыре подхода к построению ДИМ [2, 30].

1. Событийный подход основан на следующих предположениях: действия всех компонентов, изменяющих состояние системы, одинаковы; связи между отдельными действиями, выполняемыми независимо одно от другого, отсутствуют; в результате одних и тех же событий происходят одинаковые действия. При данном подходе разработка ДИМ заключается в описании взаимосвязи событий между собой и временных характеристик действий компонентов. Построенная таким образом ДИМ позволяет имитировать функ-

ционирование системы в виде выполнения упорядоченной во времени последовательности событий.

2. Сканирование активностей* предполагает описание действий компонентов, которые могут быть различными. В зависимости от заданных условий каждое действие в системе вызывает определенное событие. Основу модели составляют наборы процедур, моделирующих действия, и процедур проверки условий начала и окончания действий. Условия проверяются на каждом шаге имитационного времени для всего множества действий, т. е. выполняется операция сканирования. Имитация работы системы с помощью ДИМ, использующих данный подход, требует больших временных затрат по сравнению с моделями событийного подхода, но вместе с тем позволяет полнее исследовать моделируемую систему.

3. Процессно-ориентированный подход применяется для построения ДИМ систем, у которых функциональные действия отдельных компонентов существенно различаются. При этом для разных компонентов имеет место своя последовательность элементарных действий. Имитационная модель системы строится как композиция описаний процессов компонентов и управляющих связей между ними. Такая модель наглядно и полно отражает физические процессы и архитектуру проектируемой системы, она удобна при выявлении узких мест в работе системы при различных ситуациях.

4. Транзактный подход в основном используется при построении ДИМ систем, состоящих из однотипных компонентов, которые выполняют простые операции. При моделировании системы необходимо учитывать последовательности выполнения действий. Процессы функционирования таких систем аналогичны процессам в системах массового обслуживания, моделирование которых связано с рассмотрением потока заявок на обслуживание, называемых транзактами. Заявки поступают в случайные моменты времени, время их обслуживания также обычно считается случайным.

При проектировании систем выделяют традиционные технологии моделирования, алгоритмическое моделирование, «мягкое» моделирование, учитывающее свойство нечеткости систем, моделирование, использующее методы искусственного интеллекта, когнитивное моделирование, множественное моделирование на основе формализма алгоритмических сетей и др.

* *Активность* — это элементарная работа по переводу системы из одного состояния в другое. Активность начинается и завершается событием. — *Прим. ред.*

С развитием науки и техники объектами исследования становятся все более сложные системы, которые нельзя исследовать только в предположении их нормальной работоспособности, или нормального функционирования. В сложных системах вследствие исключительно большого числа элементов, их многофункциональности, введения различных видов избыточности происходят изменения состояний работоспособности элементов без прекращения функционирования системы.

4.7. Модели массового обслуживания

Многие радиотехнические системы при решении задач анализа и синтеза рассматриваются как системы массового обслуживания (СМО). Типовая СМО содержит следующие элементы:

- входящий поток заявок;
- каналы (приборы) обслуживания;
- очередь заявок, ожидающих обслуживания (сценарий обслуживания);
- выходящий поток заявок.

СМО могут быть одноканальными и многоканальными, их функционирование заключается в выполнении поступающего потока требований (транзактов, заявок). Заявки поступают одна за другой или группами в некоторые, обычно случайные моменты времени. Обслуживание поступившей заявки продолжается какое-то время, которое также может рассматриваться как случайное, после чего соответствующий канал освобождается и снова готов для приема следующей заявки.

В зависимости от числа каналов и их производительности СМО обладает определенной пропускной способностью, позволяющей с некоторой эффективностью выполнять поток заявок. Задачами моделирования СМО является установление зависимости между характером потока заявок, производительностью каналов, числом каналов, сценарием и эффективностью обслуживания. Показателями эффективности обслуживания в зависимости от условий и целей исследуемой задачи могут быть средний процент заявок, получающих отказ и покидающих систему необслуженными; среднее время ожидания в очереди; вероятность того, что поступившая заявка будет принята к обслуживанию без ожидания в очереди; среднее число заявок в очереди (длина очереди) и т. д. Каждый из этих показателей с той или другой стороны характеризует степень приспособленности системы к выполнению потока заявок, т. е. ее пропускную способность.

В узком смысле под пропускной способностью обычно понимают среднее число заявок, которое система может обслужить в единицу времени. Наряду с этим используется термин «относительная пропускная способность», который определяется как среднее отношение числа обслуженных заявок к числу поданных. В общем случае пропускная способность (абсолютная и относительная) зависит как от параметров системы, так и от характера потока заявок.

Если заявки поступают регулярно, т.е. через точно определенные промежутки времени, и обслуживание каждой заявки имеет строго определенную длительность, то расчет пропускной способности системы не представляет особой трудности. На практике заявки обычно поступают в случайные моменты времени, длительность обслуживания заявок тоже носит случайный характер. Поэтому процесс работы системы протекает нерегулярно, в потоках заявок образуются местные сгущения и разрежения. Сгущения входного потока могут приводить к отказам в обслуживании и к образованию очередей, а разрежения — к непроизводительным простоям отдельных каналов или системы в целом. На эти случайности, вызываемые неоднородностью потока заявок, дополнительно накладываются случайности, связанные с задержками обслуживания отдельных заявок. В результате действия этих факторов процесс функционирования СМО представляет собой случайный процесс. Для решения задач анализа и синтеза СМО, оценки ее пропускной способности необходимо разработать математические модели случайных процессов, протекающих в системе.

Под потоком событий в теории массового обслуживания и надежности понимается последовательность событий, происходящих одно за другим в моменты времени t_1, t_2 . Примеры таких потоков: поток сообщений, последовательно поступающие обращения к базе данных, поток заявок на обслуживание телекоммуникационной сети, поток отказов в автоматической системе и т.п.

В общем случае события, образующие поток, могут быть различными. Если для моделирования работы СМО рассматривается поток, в котором события различаются лишь моментами появления, то его называют потоком однородных событий. Как уже отмечалось, обычно события происходят в случайные моменты времени, и соответствующий поток событий называется случайным. Однако в редких случаях возможны регулярные потоки, когда события следуют одно за другим через строго определенные промежутки времени. Регулярный поток сравнительно редко встречается в реальных системах, однако он представляет интерес как предель-

ный случай для других потоков. В последующем, если не оговорено особо, поток событий будет считаться однородным и случайным.

Для моделирования СМО важными свойствами потоков заявок являются следующие.

1. Стационарность. Поток событий называется стационарным, если вероятность попадания определенного числа событий на участок (интервал) времени длиной τ зависит только от длины этого участка и не зависит от того, где на оси времени расположен этот участок.

2. Отсутствие последействия. Поток событий называется потоком без последействия, если для любых неперекрывающихся интервалов времени число событий, попадающих на один участок, не зависит от числа событий, попадающих на другие участки времени.

3. Ординарность. Поток событий называется ординарным, если вероятность попадания двух или более событий на элементарный (малый) временной участок Δt пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания на этот участок одного события.

Поток событий, обладающий перечисленными тремя свойствами (стационарность, ординарность и отсутствие последействия), называется простейшим или стационарным пуассоновским. Для простейшего потока число событий, попадающих на любой фиксированный интервал времени, распределено по закону Пуассона.

Условию стационарности удовлетворяют потоки, вероятностные характеристики которых не зависят от времени. Для стационарного потока характерна постоянная плотность, т. е. среднее число заявок в единицу времени. На практике часто встречаются потоки, которые могут рассматриваться как стационарные на ограниченном интервале времени. Например, поток вызовов на телефонной станции в определенное время суток (рабочее время или ночное) может считаться стационарным, а в течение целых суток поток уже нельзя считать стационарным.

Условие отсутствия последействия, когда заявки поступают на обслуживание независимо друг от друга, во многих случаях приемлемо для входных потоков. Однако выходной поток обслуженных заявок обычно имеет последействие, даже если входной поток без последействия.

Условие ординарности потока означает, что заявки на обслуживание приходят поодиночке, а не группами (парами, тройками и т. п.). Если в неординарном потоке заявки поступают одинаковыми по составу группами, то его можно свести к ординарному. Для этого достаточно вместо потока отдельных заявок рассмотреть по-

ток групп заявок (пар, троек и т.д.). Если отдельные заявки случайным образом могут оказаться двойными, тройными и т.д., то приходится рассматривать поток разнородных событий.

Простейший поток заявок играет в теории массового обслуживания особую роль, аналогичную роли нормального закона среди законов распределения случайных величин. Известно, что при суммировании большого числа независимых случайных величин, имеющих различные законы распределения, результирующая величина имеет распределение, близкое к нормальному закону. Аналогично при суммировании большого числа ординарных стационарных потоков, имеющих последствие, получается поток, близкий к простейшему. Это имеет место при условии, что складываемые потоки должны оказывать на суммарный поток равномерно малое влияние. Обычно достаточно сложить не менее 4—5 потоков, чтобы получить поток, который можно рассматривать как простейший.

Представим отдельный независимый поток событий Π_i как последовательность моментов времени наступления событий (для входного потока — поступления заявок) $t_1^{(i)}, t_2^{(i)}$. Тогда суммирование нескольких потоков $\Pi_i, i = \overline{1, n}$, заключается в том, что все моменты времени появления событий накладываются на одну временную ось, и для суммарного потока Π_Σ можно записать

$$\Pi_\Sigma = \sum_{i=1}^n \Pi_i.$$

На рис. 4.22 показано суммирование потоков при $n = 3$.

Широкое использование простейшего потока в теории массового обслуживания объясняется следующим. Во-первых, простейшие и близкие к ним потоки часто встречаются на практике.

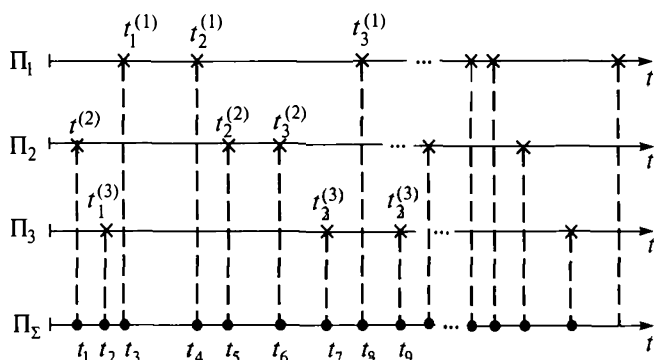


Рис. 4.22. Суммирование потоков событий

Во-вторых, при потоках заявок, отличающихся от простейших, во многих случаях можно получить приемлемые по точности результаты, если поток любой структуры заменить простейшим с той же плотностью.

Для простейшего потока, как уже отмечалось, число точек, попадающих на временной участок τ , распределено по закону Пуассона с математическим ожиданием

$$a = \lambda \tau,$$

где λ — плотность потока (среднее число событий, приходящееся на единицу времени).

Вероятность того, что за время τ произойдет ровно m событий, определяется по формуле

$$p_m(\tau) = \frac{(\lambda \tau)^m}{m!} e^{-\lambda \tau}, \quad m = 0, 1, 2,$$

В частности, вероятность того, что участок τ окажется пустым, т. е. $m = 0$,

$$p_0(\tau) = e^{-\lambda \tau}$$

Случайное время T между соседними событиями в простейшем потоке подчиняется показательному (экспоненциальному) распределению с плотностью вероятности

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0; \\ 0, & t < 0, \end{cases} \quad (4.16)$$

где λ — параметр распределения.

Функция распределения времени T для этого закона имеет вид

$$F(t) = P[T < t] = 1 - e^{-\lambda t} \quad t \geq 0,$$

а математическое ожидание и дисперсия соответственно равны

$$m_T = M[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda}; \quad D_T = \lambda \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - m_T^2 = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Здесь $M[T]$ — математическое ожидание случайной величины T ; $P[A]$ — вероятность случайного события A .

В случае показательного распределения времени T любая информация о том, сколько времени уже протекал этот промежуток, не влияет на закон распределения оставшегося времени. Это свойство показательного закона непосредственно связано со свойством отсутствия последействия простейшего потока.

Поток однородных событий, ординарный и без последствия, но нестационарный, называется нестационарным пуассоновским потоком. Такой поток характеризуется мгновенной плотностью потока $\lambda(t)$ в момент времени t , т. е.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[0; t + \Delta t] - M[0; t]}{\Delta t},$$

где $M[0; t]$ — математическое ожидание числа событий на участке $[0, t]$. Для нестационарного пуассоновского потока число событий m , попадающих на временной интервал τ , начинающийся в момент t_0 , подчиняется закону Пуассона

$$P_m(\tau, t_0) = \frac{a^m}{m!} e^{-a} \quad m = 0, 1, 2,$$

где a — математическое ожидание числа событий на временном интервале $[t_0; t_0 + \tau]$, т. е.

$$a = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \lambda(t) dt.$$

Плотность распределения вероятности времени T , функция распределения и вероятность того, что на интервале $[t_0; t_0 + \tau]$ не появится ни одного события, для данного потока соответственно равны

$$f_{t_0}(t) = \lambda(t_0 + t) \exp \left[- \int_{t_0}^{t_0 + t} \lambda(s) ds \right] \quad t > t_0;$$

$$F_{t_0}(t) = 1 - \exp \left[- \int_{t_0}^{t_0 + t} \lambda(s) ds \right] = 1 - e^{-a}; \quad P(t) = \mathcal{P}(T \geq t) = e^{-a}$$

Если в простейшем потоке снять ограничение на отсутствие последствия, при этом промежутки времени между последовательными событиями T_1, T_2 , представляя собой независимые случайные величины, то такой поток называется потоком с ограниченным последствием или потоком Пальма. Модель данного потока широко используется для выходных потоков СМО, а также при анализе надежности систем с резервированием. Например, если входной поток заявок простейший, то поток необслуженных заявок (в результате выбывания вследствие занятости всех каналов СМО) будет потоком с ограниченным последствием.

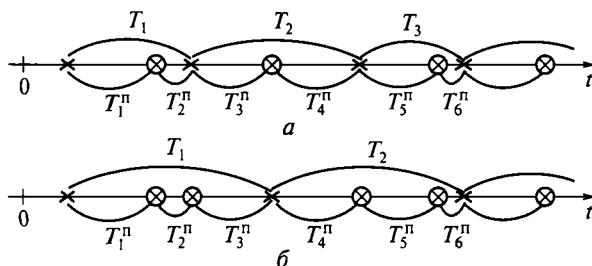


Рис. 4.23. Образование потоков Эрланга первого (а) и второго (б) порядков

Большое применение на практике находят модели потоков с ограниченным последствием в виде потоков Эрланга различного порядка, которые образуются «просеиванием» простейшего потока. Если в простейшем потоке «выбросить» каждую вторую точку, то оставшиеся точки образуют поток Эрланга первого порядка; если же в простейшем потоке сохранять каждую третью точку, то получим поток Эрланга второго порядка и т. д. На рис. 4.23, а, б показаны примеры образования таких потоков, «выброшенные» точки здесь обведены кружками.

Для потока Эрланга k -го порядка время T между соседними событиями равно сумме $k-1$ независимых случайных величин, т. е.

$$T = \sum_{i=1}^{k-1} T_i^n,$$

где $T_1^n, T_2^n, \dots, T_{k-1}^n$ — независимые случайные величины, подчиненные одному и тому же показательному закону с параметром λ (4.16).

Закон распределения времени T в этом случае называется законом Эрланга k -го порядка, его плотность вероятности

$$f_k(t) = \begin{cases} \frac{\lambda(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} & t \geq 0; \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

Математическое ожидание и дисперсия времени T равны

$$m_k = \frac{k-1}{\lambda}; \quad D_k = \frac{k-1}{\lambda^2},$$

а плотность потока

$$\Lambda_k = \frac{\lambda}{k-1}.$$

При неограниченном увеличении k поток Эрланга приближается к регулярному потоку.

Показательное распределение и распределение Эрланга широко используются в теории массового обслуживания также в качестве законов распределения случайной величины времени обслуживания одной заявки $T_{об}$. В случае показательного закона для времени $T_{об}$ его характеристики записываются в виде

$$\begin{aligned} g(t) &= \begin{cases} \mu e^{-\mu t} & t \geq 0; \\ 0, & t < 0; \end{cases} \\ G(t) &= P[T_{об} < t] = 1 - e^{-\mu t}; \\ m_{T_{об}} &= \frac{1}{\mu}; \quad D_{T_{об}} = \frac{1}{\mu^2}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где μ — параметр распределения времени обслуживания, т. е. величина, обратная среднему времени обслуживания одной заявки.

В процессе функционирования состояния СМО изменяются скачком. Изменение состояния может быть вызвано приходом новой заявки, освобождением канала в результате обслуживания заявки, уходом заявки из очереди и т. п. Число возможных состояний системы считается конечным, или счетным, обозначим множество таких состояний $\mathcal{X} = \{x_i, i = 0, 1, 2, 3, \dots\}$. В любой момент времени t система может находиться только в одном из этих состояний $x_i \in \mathcal{X}$. Вероятность того, что в момент времени t система находится в состоянии x_i , обозначим $p_i(t)$. Для любого момента времени t должно выполняться условие нормировки

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} p_i(t) = 1, \quad (4.18)$$

где $\mathcal{I}$ — множество номеров состояний системы.

Случайные процессы, протекающие в СМО, обычно представляют собой процессы с непрерывным временем, что связано со случайностью потока заявок. Изменения состояний системы могут быть представлены ориентированным графом $\mathcal{G}$ изменения состояний. Вершины графа соответствуют возможным состояниям, а дуги — переходам из одного состояния в другое за малый промежуток времени dt .

В качестве примера на рис. 4.24 приведен граф $\mathcal{G}$, отображающий изменение состояний в системе обслуживания с тремя каналами. Система может находиться в четырех состояниях: x_0 — все каналы свободны; x_1 — один канал занят; x_2 — два занято и x_3 — все три канала заняты. Если система в момент времени t находилась в состоянии x_0 , то за малое время dt она может перейти в состояние x_1 при поступлении заявки (дуга d_{01}) или остаться в состоянии x_0 (дуга d_{00}), если заявок не поступало, и т. д.

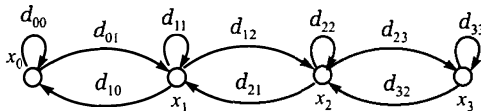


Рис. 4.24. Граф G системы с четырьмя состояниями

Если входящий поток заявок пуассоновский и время обслуживания имеет показательное распределение, то для анализа функционирования СМО применяют аппарат марковских случайных процессов.

Процесс называется марковским или процессом без последствия, если для каждого момента времени t_0 вероятность $P(t)$ любого состояния x системы в будущем, т. е. в момент времени $t > t_0$, зависит только от состояния системы $x(t_0)$ в настоящий момент t_0 и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние.

Марковский процесс в СМО со счетным множеством состояний и непрерывным временем можно описать с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений, где неизвестными функциями являются вероятности p_i состояний x_i , $i = 0, 1, 2$,

В зависимости от схемы обслуживания выделяют два типа СМО: системы с отказами и системы с ожиданием. В системах с отказами заявка, поступившая в момент времени, когда все каналы обслуживания заняты, немедленно получает отказ, покидает систему, и в дальнейшем процессе обслуживания эта заявка не участвует. В системах с ожиданием заявка, заставшая все каналы занятыми, становится в очередь и ожидает, пока не освободится какой-нибудь канал, т. е. заявка систему не покидает.

Рассмотрим n -канальную СМО с отказами, ее возможные состояния: x_0 — свободны все n каналов, x_1 — занят один канал, x_n — заняты все n каналов. Пусть поток заявок простейший с плотностью λ и случайное время обслуживания имеет показательное распределение с параметром μ (см. (4.16) и (4.17)). Учитывая, что параметр λ имеет смысл плотности потока заявок или интенсивности поступления заявок, параметр μ можно считать плотностью потока освобождений занятого канала или интенсивностью обслуживания. Так как потоки заявок и освобождений простейшие, то процесс в такой СМО марковский и система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t); \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda p_0(t) - (\lambda + \mu) p_1(t) + 2\mu p_2(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_i(t)}{dt} &= \lambda p_{i-1}(t) - (\lambda + i\mu)p_i(t) - (i+1)\mu p_{i+1}(t), \quad 1 < i < n; \\ \frac{dp_n(t)}{dt} &= \lambda p_{n-1}(t) - n\mu p_n(t). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Система уравнений (4.19) называется уравнениями Эрланга, обычно она решается при начальных условиях

$$p_0(0) = 1; \quad p_1(0) = \dots = p_n(0) = 0,$$

т. е. считается, что в начальный момент времени ($t_0 = 0$) все каналы свободны.

Систему линейных дифференциальных уравнений (4.19) можно представить в векторно-матричной форме

$$\dot{P} = AP(t),$$

где $\dot{P}$, $P(t)$ — соответствующие $(n+1)$ -векторы-столбцы, т. е.

$$\begin{aligned} \dot{P} &= \left(\frac{dp_0(t)}{dt}, \frac{dp_1(t)}{dt}, \dots, \frac{dp_n(t)}{dt} \right)^T \\ P(t) &= [p_0(t), p_1(t), \dots, p_n(t)]^T; \end{aligned}$$

A — $(n+1) \times (n+1)$ -матрица коэффициентов,

$$A = \begin{pmatrix} -\lambda & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \mu) & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & -n\mu \end{pmatrix}$$

Вероятности $p_i(t)$ характеризуют изменение средней загрузки системы с течением времени. В частности, $p_n(t)$ есть вероятность того, что заявка, пришедшая в момент t , застанет все каналы занятыми, такое состояние может рассматриваться как состояние отказа системы, т. е.

$$P_{\text{отк}}(t) = p_n(t).$$

Величину $q(t) = 1 - p_n(t)$ называют относительной пропускной способностью системы. Она равна отношению среднего числа обслуженных за единицу времени заявок к среднему числу поданных.

Система уравнений (4.19) легко решается при любом числе каналов n . Уравнения (4.19) справедливы и для зависящих от времени $\lambda(t)$, $\mu(t)$, если потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое, остаются пуассоновскими.

При $t \rightarrow \infty$ вероятности $p_i(t)$, $i = \overline{0, n}$, стремятся к своим предельным (стационарным) значениям p_i , $i = \overline{0, n}$. Для определения стационарных значений вероятностей состояний системы решается система линейных алгебраических уравнений

$$AP = 0; \quad P = (p_0, p_1, \dots, p_n)^T \quad (4.20)$$

При этом одно уравнение системы (4.20) заменяется условием нормировки (4.18)

$$\sum_{i=0}^n p_i = 1.$$

Например, для $n = 2$ система алгебраических уравнений принимает вид

$$\begin{aligned} -\lambda p_0 + \mu p_1 &= 0; \\ \lambda p_0 - (\lambda + \mu) p_1 + 2\mu p_2 &= 0; \\ p_0 + p_1 + p_2 &= 1. \end{aligned}$$

Для расчета стационарных вероятностей без решения системы уравнений (4.20) можно использовать формулу Эрланга

$$p_i = \frac{\alpha^i / i!}{\sum_{j=0}^n \alpha^j / j!}, \quad i = \overline{0, n}. \quad (4.21)$$

в которой α называют приведенной плотностью потока заявок. Численно эта плотность равна среднему числу заявок, приходящихся на среднее время обслуживания одной заявки, т. е.

$$\alpha = \lambda / \mu = \lambda m_{\text{тоб}}.$$

Качественная картина изменения вероятностей $p_i(t)$, $i = \overline{0, n}$, до предельных значений p_i , $i = \overline{0, n}$, при $n = 2$ показана на рис. 4.25.

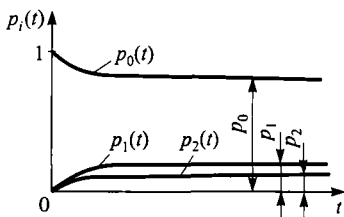


Рис. 4.25. Вероятности состояний $p_i(t)$ и p_i , $i = 0, 1, 2$, СМО с двумя каналами

Используя формулу (4.21) при $i = n$, получаем выражение для расчета вероятностей того, что поступившая заявка найдет все каналы занятыми (вероятность отказа):

$$P_{\text{отк}} = p_n = \frac{\alpha^n / n!}{\sum_{j=0}^n \alpha^j / j!}.$$

Вероятность Q того, что заявка будет обрабатываться системой (она характеризует пропускную способность системы), соответственно равна

$$Q = 1 - P_{\text{отк.}}$$

В случае $i = 0$ вероятность

$$p_0 = \left(\sum_{j=0}^n \frac{\alpha^j}{j!} \right)^{-1}$$

характеризует состояние системы, при котором все каналы свободны.

В качестве характеристик СМО часто используются среднее число занятых каналов $\bar{K}$ и среднее число обслуживаемых заявок B в единицу времени, которые рассчитываются по формулам

$$\bar{K} = \alpha Q; \quad B = \lambda Q.$$

Например, в систему с тремя каналами поступают заявки в среднем через 0,4 часа ($\lambda = 2.5 \text{ ч}^{-1}$). Среднее время обслуживания одной заявки составляет 0,5 ч ($\mu = 2 \text{ ч}^{-1}$).

В предположении, что процесс изменения состояний в системе марковский и заявки, заставшие все каналы занятыми, не обслуживаются (система с отказами), для расчета стационарных вероятностей можно использовать формулу Эрланга (4.21), т. е. для нашего случая

$$p_i = \frac{\alpha^i}{i!} \left(\sum_{j=0}^3 \frac{\alpha^j}{j!} \right)^{-1} \quad i = \overline{0, 3},$$

или

$$p_0 = \left(\sum_{j=0}^3 \frac{\alpha^j}{j!} \right)^{-1} \quad p_1 = \alpha p_0; \quad p_2 = \frac{\alpha^2}{2} p_0; \quad p_3 = \frac{\alpha^3}{6} p_0.$$

В результате расчетов для $\alpha = 1,25$ получаем $p_0 = 0.2979$; $p_1 = 0.37238$; $p_2 = 0.23274$; $p_3 = 0.09697$.

Таким образом, вероятность того, что заявка не будет обслужена, составляет $p_3 \approx 0.097$, а вероятность Q (обслуживания заявки) равна $Q = 1 - p_3 = 0.903$. Среднее число занятых каналов $\bar{K}$ и среднее число обслуживаемых заявок в час B соответственно равны

$$\bar{K} = \alpha Q = 1.129; \quad B = \lambda Q = 2.2575.$$

Формулы Эрланга при простейшем входном потоке могут использоваться при любом законе распределения времени обслуживания. Эти формулы дают также хорошие результаты, если входной поток имеет незначительное последствие.

Кроме рассмотренных систем с отказами широко используются системы с ожиданием. Если в этих системах все каналы заняты, то заявка становится в очередь и ждет, пока не освободится один из каналов. В случаях когда время ожидания в очереди не ограничено, такую систему называют чистой системой с ожиданием. Если ожидание ограничено какими-либо условиями, то систему называют системой смешанного типа. Последний тип систем широко встречается на практике, например системы связи.

Наиболее часто ограничение накладывается на время ожидания заявки в очереди, которое может быть строго определенным или случайным. При этом начатое обслуживание заявки доводится до конца, независимо от того сколько времени продолжалось ожидание. В ряде случаев ограничение накладывается не на время ожидания в очереди, а на общее время пребывания заявки в системе. Встречаются смешанные системы, в которых заявка становится в очередь только в случае, если длина очереди не слишком велика, т. е. число заявок в очереди не превышает допустимого значения.

В системах с ожиданием заявки из очереди вызываются на обслуживание в соответствии с правилами, называемыми дисциплиной очереди. Заявки могут вызываться в порядке очереди или в случайном порядке. Дисциплиной очереди может быть предусмотрено обслуживание с преимуществами (приоритетами), когда некоторые заявки имеют предпочтения перед другими.

В качестве примера рассмотрим модель смешанной СМО с n каналами. На вход поступает простейший поток заявок с плотностью λ , время обслуживания одной заявки $T_{об}$ показательное с параметром $\mu = 1/m_{об}$. Заявка, заставшая все каналы занятыми, становится в очередь, время ожидания ограничено сроком $T_{ож}$. Если до истечения этого срока заявка не поступает на обслуживание, то она покидает систему необслуженной. Время ожидания $T_{ож}$ считается случайным и распределенным по показательному закону:

$$h(t) = \nu e^{-\nu t} \quad t > 0.$$

где ν — параметр, равный обратному значению среднего срока ожидания,

$$\nu = 1/m_{ож}, \quad m_{ож} = M[T_{ож}].$$

Параметр ν можно рассматривать как плотность «потока уходов» заявок, стоящих в очереди. При $\nu \rightarrow \infty$ смешанная система становится системой с отказами, а при $\nu \rightarrow 0$ — чистой системой с ожиданием.

Для составления системы дифференциальных уравнений состояния такой СМО нумеруются с учетом связанных с системой заявок. Заявка называется связанной с системой, если она находится в состоянии обслуживания или ожидает в очереди. При такой нумерации первые $n + 1$ состояния остаются теми же, что в системе с отказами, т. е. x_0 — все каналы свободны (очереди нет); x_1 — занят только один канал (очереди нет); ...; x_n — заняты все n каналов (очереди нет), а следующие состояния соответствуют числу состояний, находящихся в очереди: x_{n+1} — заняты все n каналов и одна заявка стоит в очереди, x_{n+2} — заняты n каналов и две заявки стоят в очереди и т. д.

Так как число заявок, стоящих в очереди, может быть очень большим, то СМО с ожиданием имеет в общем случае бесконечное, хотя и счетное, число состояний, а соответственно, и бесконечное число дифференциальных уравнений для расчета вероятностей $p_0(t), p_1(t), \dots, p_n(t), p_{n+1}(t), p_{n+2}(t), \dots, p_{n+j}(t), \dots$. Эта система дифференциальных уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{dp_0(t)}{dt} &= -\lambda p_0(t) - \mu p_1(t); \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= \lambda p_{i-1}(t) - (\lambda + i\mu)p_i(t) - (i-1)\mu p_{i-1}(t), \quad 1 \leq i \leq n-1; \\ \frac{dp_n(t)}{dt} &= \lambda p_{n-1}(t) - (\lambda + n\mu)p_n(t) - (n\mu - \nu)p_{n+1}(t); \\ \frac{dp_{n+j}(t)}{dt} &= \lambda p_{n+j-1}(t) - (\lambda + n\mu - j\nu)p_{n+j}(t) - \\ &\quad - [n\mu - (j-1)\nu]p_{n+j-1}(t), \quad j \geq 1.\end{aligned}\tag{4.22}$$

Первые n уравнений в системе (4.22) точно совпадают с первыми n уравнениями для СМО с отказами (4.19). При $t \rightarrow \infty$, т. е. в установившемся режиме обслуживания, система алгебраических уравнений для расчета стационарных вероятностей $p_0, p_1, \dots, p_n, p_{n+1}, \dots, p_{n+j}, \dots$ принимает вид

$$-\lambda p_0 - \mu p_1 = 0;$$

$$\lambda p_{i-1} - (\lambda + i\mu)p_i - (i+1)\mu p_{i+1} = 0, \quad 1 \leq i \leq n-1;$$

$$\lambda p_{n-1} - (\lambda + n\mu)p_n + (n\mu + \nu)p_{n-1} = 0;$$

$$\lambda p_{n+j-1} - (\lambda + n\mu + j\nu)p_{n+j} + [n\mu - (j-1)\nu]p_{n-j+1} = 0;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{j=1}^{\infty} p_{n+j} = 1.$$

Стационарные вероятности удобно рассчитывать по следующим конечным формулам:

$$p_i = \frac{\alpha^i}{i!} z^{-1}, \quad i \in [0; n]; \quad (4.23)$$

$$p_{n+j} = \frac{\alpha^n}{n!} \frac{\alpha^j}{j \prod_{s=1}^j (n + s\beta)} z^{-1}, \quad j \in [1; \infty). \quad (4.24)$$

Здесь

$$z = \sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\alpha^j}{j \prod_{s=1}^j (n + s\beta)}; \quad (4.25)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda m_{об}; \quad \beta = \frac{\nu}{\mu} = \nu m_{об}; \quad (4.26)$$

$p_0 = z^{-1}$ (см. (4.23)).

Используя формулы (4.23)–(4.26), можно рассчитать математическое ожидание $m_{оч}$ числа заявок, находящихся в очереди по формуле

$$m_{оч} = \sum_{j=1}^{\infty} j p_{n+j} = z^{-1} \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{j \alpha^j}{j \prod_{s=1}^j (n + s\beta)}, \quad (4.27)$$

а также вероятность $P_{оч}$ наличия очереди

$$P_{оч} = 1 - \sum_{i=0}^n p_i, \quad (4.28)$$

вероятность P_H того, что заявка покинет систему необслуженной,

$$P_H = z^{-1} \frac{\beta \alpha^n}{\alpha n!} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{j \alpha^j}{j \prod_{s=1}^j (n + s\beta)}$$

и пропускную способность Q системы, т. е. вероятность того, что заявка, попавшая в систему, будет обслужена,

$$Q = 1 - P_n.$$

Некоторые трудности использования формул (4.23), (4.24), (4.27), (4.28) вызывает наличие в них бесконечных сумм (см. (4.25)). Однако с ростом j слагаемые в суммах быстро убывают, и для оценки ошибки, вызываемой отбрасыванием всех членов сумм, начиная с r -го, можно использовать формулу

$$\sum_{j=r}^{\infty} \frac{\alpha^j}{\prod_{s=1}^j (n - s\beta)} < \frac{(\alpha/\beta)^r}{r!} e^{\alpha/\beta}$$

Необходимо отметить, что в СМО с ожиданием стационарный режим существует, если выполняется условие $\alpha < n$, т. е. когда среднее число заявок, приходящееся на время обслуживания одной заявки, не выходит за пределы возможностей системы с n каналами. В случае $\alpha \geq n$ число заявок, находящихся в очереди, с увеличением времени t неограниченно возрастает.

Для СМО с $\alpha < n$ в предположении $\beta \rightarrow 0$ для приближенной оценки вероятностей состояний можно воспользоваться следующими формулами:

$$\begin{aligned} p_0 &= \left[\sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)} \right]^{-1} \\ p_i &= \frac{\alpha^i}{i!} p_0, \quad i \in [1; n]; \\ p_{n+j} &= \frac{\alpha^{n+j}}{n!n^j} p_0, \quad j \in [n+1; \infty]. \end{aligned}$$

Среднее число заявок, находящихся в очереди, при $\beta \rightarrow 0$

$$m_{оч} = \frac{\alpha^{n+1}}{nn!(1 - \alpha/n)^2} p_0.$$

В завершение рассмотрим СМО с ограничением ожидания по числу заявок, стоящих в очереди. Пусть заявка, заставшая все каналы занятыми, становится в очередь, если в ней находится менее m заявок, в противном случае заявка в очередь не становится и покидает систему необслуженной. Допущения о простейшем потоке заявок и о показательном распределении времени обслуживания сохраняются. Число состояний такой системы конечно и равно

$n + m + 1$, т.е. x_0 — все каналы свободны; x_i , $i \in [1, n]$, — занято i каналов, очереди нет; x_{n+j} , $j \in [1, m]$, — занято n каналов и j заявок стоит в очереди. Соответствующая система дифференциальных уравнений записывается в виде

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t);$$

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \lambda p_{i-1}(t) - (\lambda + i\mu)p_i(t) + (i+1)\mu p_{i+1}(t), \quad i \in [1; n-1];$$

$$\frac{dp_n(t)}{dt} = \lambda p_{n-1}(t) - (\lambda + n\mu)p_n(t) + n\mu p_{n+1}(t);$$

$$\frac{dp_{n+j}(t)}{dt} = \lambda p_{n+j-1}(t) - (\lambda + n\mu)p_{n+j}(t) + n\mu p_{n+j+1}(t), \quad j \in [1; m-1];$$

$$\frac{dp_{n+m}(t)}{dt} = \lambda p_{n+m-1}(t) - n\mu p_{n+m}(t).$$

Для определения стационарных вероятностей состояний решается система алгебраических уравнений:

$$-\lambda p_0 + \mu p_1 = 0;$$

$$\lambda p_{i-1} - (\lambda + i\mu)p_i + (i+1)\mu p_{i+1} = 0, \quad i \in [1; n-1];$$

$$\lambda p_{n-1} - (\lambda + n\mu)p_n + n\mu p_{n+1} = 0;$$

$$\lambda p_{n+j-1} - (\lambda + n\mu)p_{n+j} + n\mu p_{n+j+1} = 0, \quad j \in [1; m-1];$$

$$\sum_{i=0}^{n+m} p_i = 1.$$

Конечные формулы для расчета стационарных вероятностей имеют вид

$$p_i = \frac{\alpha^i}{i!} z_0^{-1} \quad i \in [0; n];$$

$$p_{n-j} = \frac{\alpha^n}{n!} \left(\frac{\alpha}{n}\right)^j z_0^{-1} \quad j \in [1; m];$$

$$z_0 = \sum_{i=0}^n \frac{\alpha^i}{i!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\alpha}{n}\right)^j$$

Вероятность P_n того, что заявка не будет обслужена, так как в очереди уже стоит m заявок, равна p_{n-m} .

Область применения математических моделей и методов теории массового обслуживания непрерывно расширяется. Многие задачи, связанные с системами радиосвязи, исследования их эффективности и надежности, определяются методами, заимствованными из теории массового обслуживания.

4.8. Модели надежности

Требования к надежности систем радиосвязи постоянно возрастают. В значительной степени это определяется усложнением систем, увеличением числа выполняемых функций, расширением области применения и т. д. Математические модели надежности необходимы при проектировании РЭС для выбора варианта, который будет обеспечивать ее эффективное функционирование в процессе реальной эксплуатации. Кроме того, модели надежности требуются при решении задач диагностики неисправностей, планирования ремонтно-профилактических работ и комплектования запасными частями.

При построении модели надежности системы в первую очередь требуется определить:

- состояния, которые являются отказами системы (отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, т. е. когда не обеспечивается нормальное функционирование при выполнении поставленных задач), факт возникновения отказа устанавливается критериями отказа согласно нормативно-технической документации;
- характер процессов возникновения отказов компонентов исследуемой системы, эти процессы описывают с помощью вероятностных законов и дифференциальных уравнений;
- конфигурацию (структуру) системы, в том числе характер соединения компонентов, правила работы, наличие резервирования, схему обслуживания и т. п.

Важную роль для построения модели надежности играет выделение класса системы по отношению к ремонту и восстановлению. Восстановление — это процесс обнаружения и устранения отказа (повреждения) с целью восстановления его работоспособности (исправности). Объект называется восстанавливаемым, если работоспособность его в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях, и невосстанавливаемым — если не подлежит. Один и тот же объект в зависимости от ситуации может быть восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Например, электронная аппаратура спутника на этапе хранения и

подготовки к старту — восстанавливаемая, а во время полета — невосстанавливаемая.

Ремонт представляет собой комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности объекта и восстановлению ресурса объекта или его элементов. Заметим, что ресурс (технический ресурс) — это наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта (среднего, капитального) до наступления предельного состояния. Под наработкой понимается продолжительность или объем работы объекта. Предельным называется состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению должно быть прекращено из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров за установленные пределы, недопустимого увеличения эксплуатационных расходов или необходимости проведения капитального ремонта. Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (НТД) на систему.

Ремонт объекта может выполняться заменой или восстановлением отдельных элементов и сборочных единиц. Объект называется ремонтируемым, если его работоспособность в случае возникновения отказа или повреждения подлежит восстановлению, проведение ремонта объекта предусматривается в НТД. Объект, исправность и работоспособность которого в случае возникновения отказа (повреждения) не подлежит восстановлению, — неремонтируемый. Таким образом, ремонт предусматривает возможность замены отказавших частей и не увязывается с рассматриваемыми условиями (ситуацией). Классификация объектов по отношению к ремонту и восстановлению приведена на рис. 4.26.

Основным компонентом модели надежности объекта, т. е. технического изделия (системы) определенного целевого назначения, рассматриваемого в период проектирования, является закон распределения случайного времени T работы до отказа. Существует два основных пути определения распределения времени T . Первый состоит в использовании априорных сведений о надежности элементов системы в виде кривых интенсивностей отказов. Второй метод оперирует с эмпирическими данными, полученными в результате проведения и обработки результатов испытаний, а также при наблюдении за работой различных образцов оборудования в процессе эксплуатации систем, в которых применяются аналогичные элементы, работающие в подобных условиях. При таком подходе по полученным экспериментальным данным строят гистограмму

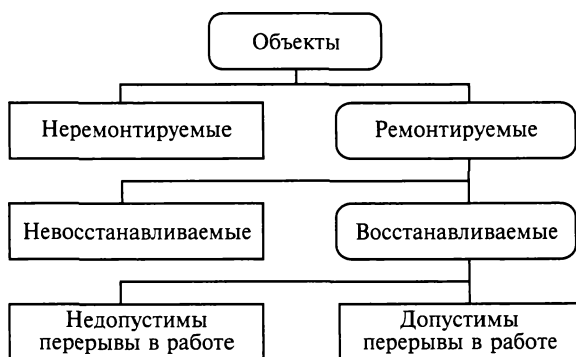


Рис. 4.26. Классификация объектов относительно ремонта и восстановления

для времени T и определяют соответствующую функцию распределения отказов. Наиболее предпочтительна комбинация указанных методов, когда для определения распределения времени T используются достаточные статистические данные и представление о механизме возникновения отказов на основе физико-химических и других соображений.

Знание законов распределения времени работы до отказа и времени ремонта необходимо при расчете показателей надежности (ПН) систем, т. е. технических характеристик, количественно определяющих одно или несколько свойств, составляющих надежность системы, — безотказность (свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки), ремонтпригодность (свойство, заключающееся в приспособлении к предупреждению и обнаружению причины возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания), долговечность (свойство объекта сохранять при установленной системе технического обслуживания и ремонтов работоспособность до наступления предельного состояния, при котором прекращается дальнейшая эксплуатация из-за неустранимых нарушений значений параметров) и сохраняемость.

Неремонтируемые объекты работают до первого отказа, основные показатели безотказности для них и формулы оценки показателей по результатам испытаний приведены в табл. 4.6. Здесь $N(t)$ — число объектов, работоспособных к моменту времени t ; N — число испытываемых объектов; T_i — наработка до отказа i -го объекта. Отдельные показатели надежности имеют размерность. Например, если в качестве наработки рассматривается время, то

Расчет показателей безотказности

Показатель надежности (безотказности)	Формула оценки
Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки $[0; t]$ отказ не возникнет	$\hat{R}(t) = N(t)/N$
Средняя наработка до отказа — математическое ожидание случайной наработки T до первого отказа	$\hat{m}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$
Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента t наработки при условии, что до этого момента отказ не возник	$\hat{\lambda}(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}$

среднюю наработку до отказа m_t измеряют в часах, а интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность распределения времени до отказа $f(t)$ имеют размерность 1/ч. Вероятность безотказной работы $R(t)$ на временном интервале $[0; t]$ и вероятность отказа $Q(t)$ (в зарубежной литературе иногда их называют соответственно функциями надежности и ненадежности) определяются непосредственно по функции распределения $F(t)$ случайного времени наработки до отказа T , т. е.

$$R(t) \triangleq P[T > t] = 1 - F(t), \quad Q(t) \triangleq P[T \leq t] = F(t).$$

Функциональные связи между показателями $R(t)$, $Q(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ и m_t приведены в табл. 4.7. Вероятность безотказной работы в течение интервала $[t_1; t_2]$ определяется по формуле

$$R(t_1, t_2) = \frac{R(t_2)}{R(t_1)} = \exp \left[- \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right]$$

Конкретный вид функций $R(t)$, $\lambda(t)$ определяется законом распределения случайной наработки до отказа T . Во многих случаях на практике функция $\lambda(t)$ имеет вид, показанный на рис. 4.27. Здесь можно выделить три участка: приработки (I), нормальной работы (II) и «старения» (III). Иногда в качестве показателей используют среднюю интенсивность отказов $\bar{\lambda}$ за время, соответствующее техническому ресурсу t_p ,

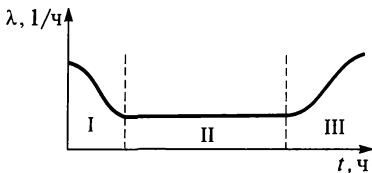


Рис. 4.27. Типичный вид функции интенсивности отказов $\lambda(t)$

Формулы связи между показателями безотказности

Определяемый ПН	Известный показатель надежности			
	$R(t)$	$Q(t)$	$\varphi(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	$R(t)$	$1 - Q(t)$	$\int_t^{\infty} \varphi(x) dx$	$\exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right]$
$Q(t)$	$1 - R(t)$	$Q(t)$	$\int_t^{\infty} \varphi(x) dx$	$1 - \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right]$
$\varphi(t)$	$-\frac{d}{dt} R(t)$	$\frac{d}{dt} Q(t)$	$\varphi(t)$	$\lambda(t) \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right]$
$\lambda(t)$	$-\frac{1}{R(t)} \frac{d}{dt} R(t)$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \frac{d}{dt} Q(t)$	$\frac{\varphi(t)}{\int_t^{\infty} \varphi(x) dx}$	$\lambda(t)$
m_t	$\int_0^{\infty} R(t) dt$	$\int_0^{\infty} [1 - Q(t)] dt$	$\int_0^{\infty} t \varphi(t) dt$	$\int_0^{\infty} \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right] dt$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \lambda(t) dt, \quad (4.29)$$

а также суммарную наработку t_n до начала массовых параметрических отказов, которые характеризуются отклонением значения хотя бы одного рабочего параметра за пределы допуска.

Если система состоит из n элементов и отказ любого из элементов приводит к отказу всей системы, то такое соединение элементов в смысле надежности называется последовательным. Показатели надежности систем по известным характеристикам элементов в предположении, что они соединены последовательно, рассчитываются по следующим формулам.

Вероятность безотказной работы $R(t)$ системы на временном интервале $[0, t]$ равна произведению вероятностей безотказной работы $R_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, элементов, т. е.

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad (4.30)$$

или для отрезка времени $[t_0, t_0 - \tau]$

$$R(t_0, t_0 - \tau) = \prod_{i=1}^n R_i(t_0, t_0 - \tau). \quad (4.31)$$

Интенсивность отказов $\Lambda(t)$ системы равна сумме интенсивностей отказов $\lambda_i(t)$ элементов:

$$\Lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (4.32)$$

Плотность вероятности $f(t)$ времени работы до отказа системы определяется по формуле

$$f(t) = R(t) \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i(t)}{R_i(t)}, \quad (4.33)$$

где $\varphi_i(t)$ — плотность вероятности отказов i -го элемента.

Среднее время m_t работы системы до отказа при сроке службы $t_{с.л}$ рассчитывается следующим образом:

$$m_t = \left(\sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_i \right)^{-1} \quad \bar{\lambda}_i = \frac{1}{t_{с.л}} \int_0^{t_{с.л}} \lambda_i(t) dt.$$

Если для элементов имеет место показательный закон распределения времени работы до отказа, т. е. выполняется условие экспоненциального закона надежности, то формулы (4.30) — (4.33) принимают следующий вид:

$$R(t) = e^{-\Lambda t}; \quad R(t_0, t_0 - \tau) = e^{-\Lambda \tau};$$

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i;$$

$$f(t) = \Lambda e^{-\Lambda t}; \quad m_t = \frac{1}{\Lambda}.$$

Значительная доля отказов систем связана с выходом ее параметров за пределы допуска, т. е. за установленные расчетом или экспериментально границы, при которых объект способен выполнять заданные функции. Задача установления допусков с учетом требований надежности и проверка их обеспечения являются одними из наиболее сложных и ответственных при проектировании систем и анализе метрологических характеристик РЭС.

Конструируемый объект обычно характеризуется рядом параметров, от значений которых зависит его качество функционирования. К таким параметрам относятся характеристики элементов,

модулей, узлов, блоков, системы в целом, например размеры детали, омическое сопротивление резистора, емкость конденсатора, коэффициент усиления усилителя и т. д. Значение параметра зависит от большого числа факторов, поэтому его рассматривают как случайную величину.

Область допустимого изменения параметра называется допусковой областью, обозначим ее S_d . Для n -мерного вектора параметров $y = (y_1, \dots, y_n)$ область S_d является n -мерным параллелепипедом. Условие $y \in S_d$, т. е. что значение y принадлежит допусковой области, проверяется выполнением соотношений

$$y_{i,a} < y_i < y_{i,b}, \quad i = \overline{1, n},$$

где $y_{i,a}, y_{i,b}$ — граничные значения для составляющей y_i .

Выход вектора y из области S_d рассматривается как отказ объекта. Наряду с областью S_d может вводиться область работоспособного состояния S_p такая, что

$$S_d \subset S_p. \quad (4.34)$$

Из соотношения (4.34) следует, что применение области S_d вместо S_p при вычислении показателей надежности дает некоторую избыточность получаемых результатов.

Допуски делятся на две основные группы: двусторонние и односторонние (рис. 4.28). В одномерном случае область S_d определяется следующими характеристиками: поле допуска 2δ , нижняя y_a и верхняя y_b границы поля допуска, середина поля допуска y_c , номинальное значение параметра y_n и смещение γ_c значения y_c относительно математического ожидания m_y . Эти характеристики связаны соотношениями

$$\delta = (y_b - y_a)/2; \quad y_c = y_a + (y_b - y_a)/2; \quad \Delta_c = y_c - y_n; \quad \gamma_c = m_y - y_c.$$

При анализе системы могут решаться прямая и две обратные задачи, которые связаны с сопоставлением распределения параметра y и характеристик поля допуска.

В случае прямой задачи задаются закон распределения параметра y , например в виде плотности вероятности $\varphi(y)$, и поле допуска, характеризуемое параметрами y_a, y_b, y_c . Требуется определить вероятность выхода параметра из допусковой области, т. е. $P[y \notin S_d] = P_{\text{вых}}$.

При первой обратной задаче задаются плотность $\varphi(y)$ и допустимая вероятность $P_{\text{вых д}}$. Требуется определить характеристики поля допуска такие, чтобы для них выполнялось условие

$$P_{\text{вых}} \leq P_{\text{вых д}}. \quad (4.35)$$

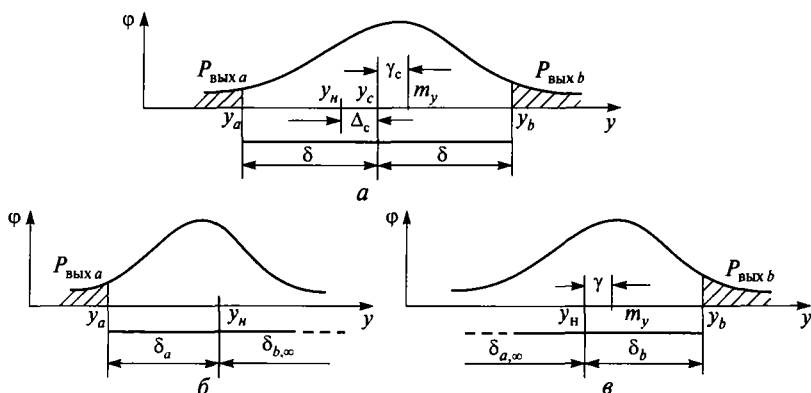


Рис. 4.28. Допуски:
а — двусторонний; б, в — односторонние

Во второй обратной задаче по известным характеристикам поля допуска и допустимой вероятности $P_{\text{вых д}}$ надо определить характеристики распределения y , при которых будет выполняться условие (4.35).

В основе решения этих задач лежат следующие формулы расчета вероятности $P_{\text{вых}}$, соответствующие трем случаям, приведенным на рис. 4.28:

$$\begin{aligned} P_{\text{вых}} &= P_{\text{вых } ab} = P_{\text{вых } a} + P_{\text{вых } b} = \\ &= 1 - \int_{y_a}^{y_b} \varphi(y) dy = 1 - \int_{y_n + \Delta_c - \delta}^{y_n + \Delta_c} \varphi(y) dy; \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вых } a} = 1 - \int_{y_n - \delta_a}^{\infty} \varphi(y) dy; \quad (4.37)$$

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вых } b} = 1 - \int_{-\infty}^{y_n + \delta_b} \varphi(y) dy. \quad (4.38)$$

Исследования показывают, что в большинстве случаев распределение значения параметра y по полю допуска для фиксированного момента времени близко к нормальному. При нормальном законе распределения y формулы (4.36)–(4.38) для расчета $P_{\text{вых}}$ принимают следующий вид:

$$P_{\text{вых } ab} = 1 - \left[\Phi \left(\frac{y_b - m_y}{\sigma_y} \right) - \Phi \left(\frac{y_a - m_y}{\sigma_y} \right) \right]$$

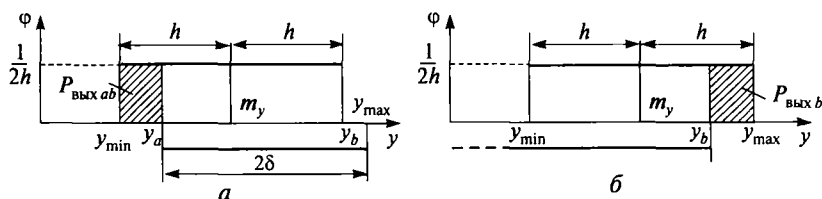


Рис. 4.29. Равномерное распределение параметра и поля допуска:
 а — двусторонний допуск; б — односторонний допуск

$$P_{\text{вых } a} = \Phi\left(\frac{y_a - m_y}{\sigma_y}\right) \quad P_{\text{вых } b} = 1 - \Phi\left(\frac{y_b - m_y}{\sigma_y}\right),$$

где m_y, σ_y — математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение случайной величины y ; $\Phi(z)$ — функция распределения нормированного закона Гаусса ($m = 0, \sigma = 1$),

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-x^2/2} dx.$$

В ряде случаев закон распределения y принимается равномерным, т. е.

$$\varphi(y) = \begin{cases} 1/2h, & y \in [m_y - h, m_y + h]; \\ 0, & y \in [y_{\min} - h, m_y + h]; \end{cases} \quad (4.39)$$

$$m_y = (y_{\max} + y_{\min})/2, \quad \sigma_y = h/\sqrt{3},$$

где h — максимальное отклонение y от математического ожидания m_y ; $y_{\max}, y_{\min}$ — минимальное и максимальные значения y соответственно.

Вероятности $P_{\text{вых}}$ при распределении (4.39) рассчитываются по формулам (4.90)–(4.92) с учетом границ изменения параметра. Например, при $y_{\min} < y_a$ и $y_{\max} < y_b$ (рис. 4.29, а) формула (4.36) для двустороннего допуска принимает вид

$$P_{\text{вых } ab} = 1 - P[y \in [y_a; m_y + h]] = 1 - \int_{y_a}^{m_y + h} \frac{1}{2h} dy = \frac{y_a + h - m_y}{2h}.$$

В случае одностороннего допуска с верхней конечной границей и $y_b < y_{\max}$ (рис. 4.29, б) на основе (4.92) получаем

$$P_{\text{вых } b} = 1 - P[y > y_b] = 1 - \int_{y_b}^{m_y + h} \frac{1}{2h} dy = \frac{m_y + h - y_b}{2h}.$$

Во многих случаях на практике законы распределения параметров отличаются от нормального или равномерного и обычно асимметричны. В этих случаях рассчитываются координаты середины и границы поля рассеивания параметра на основе известных распределений влияющих на него факторов, и затем решаются другие задачи.

При проектировании РЭС часто решается следующая задача аналитического определения погрешности. Задаются вектор $x = (x_1, \dots, x_n)$ входных (первоначальных) и вектор $y = (y_1, \dots, y_m)$ выходных конструкторских параметров. Связь между x и y описывается системой уравнений $y_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$, $i = \overline{1, m}$.

Требуется для заданных ошибок входов определить погрешности для выходных параметров.

Для одномерного случая (со скалярными входом и выходом)

$$y = f(x), \quad (4.40)$$

в предположении непрерывности функции (4.40) абсолютные Δx , Δy и относительные δx , δy погрешности в первом приближении связаны соотношениями

$$\Delta y \approx k \Delta x; \quad k = f'(x) = \frac{d}{dx} f(x);$$

$$\delta_y \approx k_\delta \delta x; \quad k_\delta = f'(x) \frac{x}{f(x)}; \quad \delta_x = \frac{\Delta x}{x}; \quad \delta_y = \frac{\Delta y}{y}.$$

где k, k_δ — коэффициенты влияния соответственно абсолютной и относительной ошибок первичного конструкторского параметра на ошибку выхода. Эти коэффициенты определяются по производной $f'(x)$ для конкретного значения x , например m_x , или экспериментально для измеренных значений (x_v, y_v) , (x_μ, y_μ) по формулам

$$\hat{k} = \frac{y_v - y_\mu}{x_v - x_\mu}; \quad \hat{k}_\delta = \hat{k} \frac{\bar{x}}{\bar{y}}; \quad \bar{x} = \frac{x_v - x_\mu}{2}; \quad \bar{y} = \frac{y_v - y_\mu}{2}.$$

В предположении, что функция n аргументов

$$y = f(x_1, \dots, x_n) \quad (4.41)$$

непрерывна и среди случайных погрешностей входов нет доминирующих, ошибки Δy и δy приближенно определяются с использованием соотношений

$$\Delta y \approx \sum_{i=1}^n k_i \Delta x_i, \quad k_i = f_{x_i}(x_1, \dots, x_n) = \frac{\partial}{\partial x_i} f(x_1, \dots, x_n);$$

$$\delta y \approx \sum_{i=1}^n k_{\delta i} \delta x_i, \quad k_{\delta i} = f_{x_i}(x_1, \dots, x_n) \frac{x_i}{f(x_1, \dots, x_n)} = k_i \frac{m_{x_i}}{m_y} f(x_1, \dots, x_n).$$

где $\Delta x_i, \delta x_i$ — погрешности i -го входного конструкторского параметра x_i ; $k_i, k_{\delta i}$ — коэффициенты влияния соответствующих погрешностей x_i на выходной параметр y ; m_y, m_x — математические ожидания y и x .

Отклонения $\beta_{x_i}, i = \overline{1, n}$, первичных параметров конструкции x_i от номинальных значений удобно выразить через систематические Δ_i и случайные β_i составляющие в виде

$$\beta_{x_i} = \Delta_i \pm \beta_i. \quad (4.42)$$

Систематическая ошибка Δ_i определяется алгебраическим суммированием составляющих, обусловливаемых воздействием различных факторов — температуры, давления и т. д. Если число факторов N и систематическая ошибка, вызываемая j -м фактором на параметр x_i , равна Δ_{ij} , то

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^N \Delta_{ij}. \quad (4.43)$$

Случайные составляющие складываются по правилу дисперсий, т. е.

$$\beta_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N \beta_{ij}^2}. \quad (4.44)$$

где β_{ij} — случайная составляющая ошибки, вызываемая j -м фактором.

Отклонение выходного параметра конструкции с учетом (4.41) — (4.44) определяется по формуле

$$\beta_y = \sum_{i=1}^n k_i \Delta_i \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (k_{\delta i} v_i \beta_i)^2},$$

где v_i — коэффициент, характеризующий отклонение распределения случайной составляющей ошибки x_i от нормального.

Экстремальные отклонения $\Delta \tilde{y} = y - m_y$ по абсолютным отклонениям $\Delta \tilde{x}_i = x_i - m_x, i = \overline{1, n}$, при $\frac{\partial}{\partial x_i} f(x_1, \dots, x_n) > 0, i = \overline{1, n_1}$, и $\frac{\partial}{\partial x_i} f(x_1, \dots, x_n) < 0, i = \overline{(n_1 + 1), n}$, рассчитываются по формулам

$$\Delta \tilde{y}_{\max} = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta \tilde{x}_i^{\max} - \sum_{i=n_1+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta \tilde{x}_i^{\min};$$

Плотности распределения функций случайных аргументов

Функция $y = f(x); f(x, z)$	Плотность распределения $\varphi_y(y)$
$y = a + bx$	$\varphi_y(y) = \left \frac{1}{b} \right \varphi_x \left(\frac{y-a}{b} \right)$
$y = \frac{1}{x}$	$\varphi_y(y) = \frac{1}{y^2} \varphi_x \left(\frac{1}{y} \right)$
$y = e^x$	$\varphi_y(y) = \left \frac{1}{y} \right \varphi_x(\ln y)$
$y = \ln x$	$\varphi_y(y) = e^y \varphi_x(e^y)$
$y = x^2$	$\varphi_y(y) = \frac{1}{2\sqrt{y}} [\varphi_x(\sqrt{y})] + \varphi_x(-\sqrt{y})$
$y = x + z$	$\varphi_y(y) = \int \varphi_x(v) \varphi_z(y-v) dv = \int \varphi_x(y-v) \varphi_z(v) dv$
$y = xz$	$\varphi_y(y) = \int \left \frac{1}{v} \right \varphi_x(v) \varphi_z \left(\frac{y}{v} \right) dv = \int \left \frac{1}{v} \right \varphi_x \left(\frac{y}{v} \right) \varphi_z(v) dv$
$y = \frac{x}{z}$	$\varphi_y(y) = \int v \varphi_x(v) \varphi_z(y-v) dv = \int \left \frac{v}{y^2} \right \varphi_x(v) \varphi_z \left(\frac{v}{y} \right) dv$

$$\Delta \tilde{y}_{\min} = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta \tilde{x}_i^{\min} + \sum_{i=n_1+1}^{n_1} \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta \tilde{x}_i^{\max}$$

В ряде случаев требуется найти закон распределения выходного конструкторского параметра по известным распределениям входных параметров. Для одномерного объекта (4.40) в предположении, что обратная зависимость $x = f^{-1}(y) = g(y)$ однозначна, плотность распределения $\varphi_y(y)$ случайной величины y по известной плотности распределения $\varphi_x(x)$ случайной величины x определяется по формуле

$$\varphi_y(y) = \varphi_x(g(y)) \left| \frac{d}{dy} g(y) \right|$$

Математическое ожидание и дисперсия y соответственно равны

$$m_y = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi_x(x) dx, \quad D_y = \sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [f(x) - m_y]^2 \varphi_x(x) dx.$$

В табл. 4.8 представлены плотности распределения $\varphi_y(y)$ для некоторых распространенных функций $y = f(x)$ и $y = f(x, z)$.

При большом числе случайных аргументов аналитическое определение плотности $\varphi_y(y)$ в общем случае достаточно громоздко,

поэтому обычно ограничиваются основными моментами распределения выхода y . Математическое ожидание и дисперсия выходного параметра y как функции n случайных независимых аргументов $(x_1, \dots, x_n)$ определяются по следующим формулам:

$$m_y = f(m_{x_1}, \dots, m_{x_n}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} D_{x_i};$$

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 D_{x_i} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i} \mu_{3x_i},$$

где производные $\partial f / \partial x$ берутся в точках m_{x_i} , $i = \overline{1, n}$; μ_{3x_i} — третий центральный момент x_i , $i = \overline{1, n}$.

В случаях когда входные величины x_i , $i = \overline{1, n}$, коррелированы, в формулах для m_y , D_y добавляются слагаемые с корреляционными моментами, например:

$$m_y = f(m_{x_1}, \dots, m_{x_n}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} D_{x_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i \partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_i} R_{i,j}.$$

где $R_{i,j}$ — корреляционный момент между x_i и x_j ,

$$R_{i,j} = M[(x_i - m_{x_i})(x_j - m_{x_j})].$$

Если в модели (4.41) n велико и среди входных переменных x_i , $i = \overline{1, n}$, нет резко выделяющихся по влиянию на выходной параметр y , то имеет место распределение, близкое к нормальному.

Для ремонтируемых объектов важным показателем надежности является параметр потока отказов $\omega(t)$. Для ординарных потоков без последствия применительно к ремонтируемым невосстанавливаемым системам параметр потока отказов (рис. 4.30, а) совпадает с интенсивностью потока и представляет собой отношение среднего числа отказов за произвольную малую его наработку к значению этой наработки, т. е.

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t, t + \Delta t)]}{\Delta t},$$

где $r(t, t + \Delta t)$ — число отказов за интервал $(t, t + \Delta t)$; $M[X]$ — математическое ожидание случайной величины X .

Среднее значение параметра потока отказов $\bar{\omega}$ определяется по формуле, аналогичной формуле (4.29). Если при $t \rightarrow \infty$ плотность вероятности $\varphi(t) \rightarrow 0$, то существует установившееся значение параметра потока отказов

$$\omega = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = 1/\bar{m}_t.$$

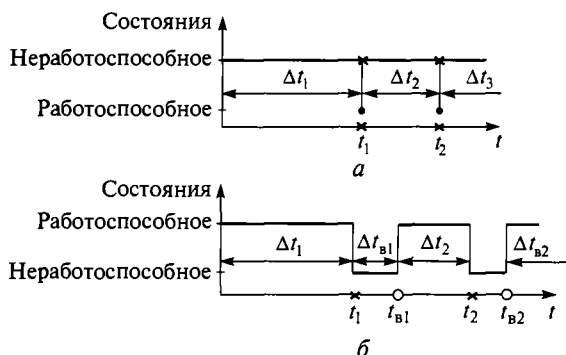


Рис. 4.30. Поток отказов (а) и реализация случайного процесса эксплуатации восстанавливаемого объекта (б)

В случае экспоненциального распределения наработки между отказами с параметром λ имеет место

$$\omega(t) = \lambda, \quad R(t, t - \tau) = R(\tau) = e^{-\lambda\tau} \quad \tilde{m}_t = \frac{1}{\lambda}.$$

где $R(t, t - \tau)$ — вероятность безотказной работы на интервале $[t; t - \tau]$; $\tilde{m}_t$ — средняя наработка между отказами.

Для ремонтируемых восстанавливаемых (обслуживаемых) объектов при их использовании в течение заданного времени работы $[t_1, t_k]$ допускаются отказы и вызванные ими кратковременные перерывы в работе. В процессе эксплуатации такого объекта чередуются случайные периоды времени безотказной работы $T^{(i)}$ и времени восстановления (ремонта) $T_{в}^{(i)}$ (рис. 4.30, б), т. е. имеет место альтернирующий процесс функционирования объекта.

Надежность объектов данного класса характеризуется рядом комплексных (коэффициенты готовности, оперативной готовности, технического использования, характеризующих безотказность и ремонтпригодность) и единичных ($m_t, R(t, t - \tau)$, характеризующих безотказность, или среднее время восстановления, характеризующее ремонтпригодность) показателей.

Нестационарный коэффициент, или функция готовности, $K_r(t)$ есть вероятность того, что в момент времени t объект находится в состоянии работоспособности (при известных начальных условиях в момент $t = 0$). На основе проведения испытаний с N объектами функция готовности $K_r(t)$ оценивается по формуле $\hat{K}_r(t) = N(t)/N$, где $N(t)$ — число объектов, находящихся в момент времени t в состоянии работоспособности. Стационарный коэффициент готовности K_r — это вероятность нахождения объекта в работоспособном

состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов простоя, он равен предельному значению $K_r(t)$, т. е.

$$K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t) = \frac{\tilde{m}_t}{\tilde{m}_t + m_b},$$

где $\tilde{m}_t$ — средняя наработка между отказами (наработка на отказ); m_b — среднее время восстановления объекта.

Для ремонтируемых систем, состоящих из n узлов, в предположении, что отказавший узел ремонтируется независимо от состояний работоспособности других узлов, коэффициент готовности $K_r(t)$ рассчитывается по формуле

$$K_r(t) = \prod_{i=1}^n K_{ri}(t).$$

где $K_{ri}(t)$ — коэффициент готовности i -го узла.

С показателями $K_r(t)$ и K_r жестко связаны функция $K_n(t)$ и коэффициент K_n простоя (рис. 4.31, а):

$$K_n(t) = 1 - K_r(t). \quad K_n = 1 - K_r.$$

Нестационарный коэффициент оперативной готовности $K_{or}(t, t - \tau)$ есть вероятность того, что объект окажется работоспособным в момент t и начиная с этого момента проработает безотказно в течение заданного времени τ , он оценивается по формуле

$$\hat{K}_{or}(t, t - \tau) = N(t, t - \tau)/N,$$

где $N(t, t - \tau)$ — число объектов, работоспособных в момент времени t и проработавших безотказно до момента времени $t - \tau$.

Стационарный коэффициент оперативной готовности, или просто коэффициент оперативной готовности, $K_{or}(\tau)$ определяется как вероятность безотказной работы объекта в течение заданного интервала времени τ , начиная с произвольного «достаточно удаленного» момента времени, т. е.

$$K_{or}(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{or}(t, t - \tau) \quad \text{или} \quad K_{or}(\tau) = K_r R(\tau).$$

Предполагается, что вероятность безотказной работы в течение времени τ не зависит от момента начала работы. Вид функции $K_{or}(\tau)$ показан на рис. 4.31, б.

Для учета всех простоев объекта, в том числе и не связанных с отказами, используется коэффициент технического использования $K_{ти}$ — отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пре-

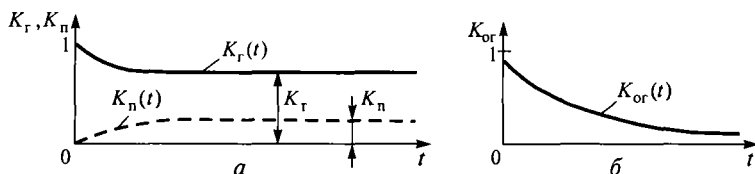


Рис. 4.31. Показатели надежности:
а — $K_r(t)$, K_r , $K_n(t)$, K_n ; б — $K_{ор}(t)$

бывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации, т. е.

$$K_{ти} = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{рем} + t_{обсл}}.$$

где $t_{раб}$ — суммарное время нахождения объекта в работоспособном состоянии; $t_{рем}$ — суммарное время ремонта; $t_{обсл}$ — суммарное время профилактического обслуживания.

Показатели ремонтпригодности восстанавливаемых объектов представляют собой характеристики случайной величины θ — длительности восстановления, она включает время ремонта и время на поиск неисправности. Широко используются следующие показатели ремонтпригодности:

- вероятность восстановления за временной интервал $[0, t]$

$$P_B(t) = P[0 \leq t] = F_B(t);$$

- среднее время восстановления

$$m_B = M[\theta] = \int_0^{\infty} t \varphi_B(t) dt.$$

Здесь $F_B(t)$, $\varphi_B(t)$ — функция и плотность распределения времени θ .

Если время θ имеет показательное распределение с параметром μ , т. е. $\varphi_B(t) = \mu \exp(-\mu t)$, то

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad m_B = 1/\mu.$$

Стационарный коэффициент готовности при показательных распределениях времени работы между отказами T и времени восстановления θ с параметрами соответственно λ и μ рассчитывается по формуле

$$K_r = \frac{\mu}{\mu + \lambda}.$$

Для повышения надежности ремонтируемых восстанавливаемых объектов, перерывы в работе которых не допускаются вследствие тяжелых последствий отказов, вводится резервирование (избыточность). Отказавший элемент может ремонтироваться во время выполнения задания. Для таких объектов в основном используются те же показатели надежности, что и для ремонтируемых невосстанавливаемых объектов.

В общем случае различают пять видов резервирования: структурное (аппаратное), временное, нагрузочное, функциональное и информационное. Наиболее часто используются структурное и временное резервирования.

Под структурным резервированием понимается метод повышения надежности системы, предусматривающий использование избыточных структурных элементов. Классификация способов (вариантов) реализации структурного резервирования приведена в табл. 4.9.

Элемент (узел), минимально необходимый для выполнения системой заданных функций, называется основным или рабочим; элементы, обеспечивающие работоспособность системы в случае отказа основного элемента, — резервными. На структурной схеме расчета надежности резервные элементы размещаются параллельно основному. Резервные элементы могут иметь соединение с основным элементом без переключателя и с переключателем (рис. 4.32).

Для невосстанавливаемой системы вероятность $R_{i(m)}(t)$ безотказной работы i -го узла на интервале времени $[0, t]$ при m -кратном нагруженном резерве (без переключателей) определяется по формуле

$$R_{i(m)}(t) = 1 - \prod_{j=0}^{m-1} [1 - R_{ij}(t)],$$

где $R_{0j}(t)$, $R_{ij}(t)$, $j = \overline{1, m}$, — вероятности безотказной работы соответственно основного и j -го резервного элементов.

В данном случае отказ i -го узла наступает, когда выйдут из строя все $m - 1$ элементов. Если основной и резервные элементы, работающие в одном режиме, одинаковы, то

$$R_{i(m)}(t) = 1 - [1 - R_{ij}(t)]^{m-1}$$

Средняя наработка до отказа i -го резервируемого узла

$$T_{1i(m)} = \int_0^{\infty} R_{i(m)}(t) dt.$$

Таблица 4.9

Классификация способов (вариантов) реализации структурного резервирования

Признак классификации	Способ резервирования	Определение
Способ включения резерва	Постоянное резервирование	Резервные элементы участвуют в функционировании наравне с основным
	Резервирование замещением	Функции основного элемента передаются резервными элементами после его отказа
Схема включения резерва	Общее резервирование	Предусматривается резерв объекта в целом
	Раздельное резервирование	Предусматривается резерв отдельных элементов или их групп
Состояние резерва	Ненагруженный резерв	Резервные элементы практически не несут нагрузок
	Облегченный резерв	Резервные элементы находятся в менее нагруженном режиме, чем основной
	Нагруженный резерв	Резервные элементы работают в том же режиме, что и основной
Однородность резервирования	Однородное резервирование	Имеется один вид резервирования по соответствующему признаку классификации
	Смешанное резервирование	В объекте совмещаются различные виды резервирования
Кратность резервирования	Однократное резервирование	Кратность резервирования равна единице (дублирование)
	Многократное резервирование	Кратность резервирования выражается числом более единицы

Если отключение и подключение элементов при резервировании выполняются с помощью переключателей P_j (рис. 4.32, б), то

$$R_{i(m)}(t) = 1 - \prod_{j=0}^m [1 - R_{nj}(t)R_{ij}(t)],$$

где $R_{nj}(t)$ — вероятность безотказной работы j -го переключателя.

При экспоненциальном распределении времени работы основного и m резервных элементов с параметром λ для вероятности $R_{i(m)}(t)$ и среднего времени до отказа имеют место соотношения

$$R_{i(m)}(t) \geq 1 - (\lambda t)^{m-1};$$

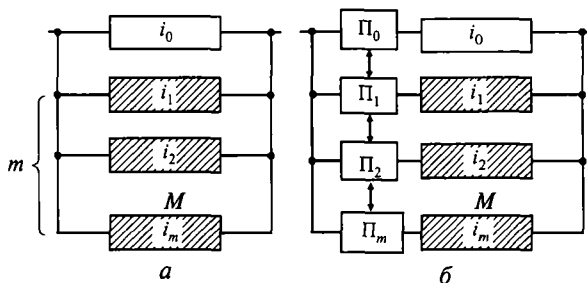


Рис. 4.32. Параллельное соединение элементов в структурной схеме надежности:

a — нагруженный резерв; *б* — ненагруженный резерв с переключателями $\Pi_0, \Pi_1, \dots, \Pi_m$

$$m_{ti(m)} = \frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{2} - \frac{1}{3} - \dots - \frac{1}{m-1} \right)$$

Недостатком нагруженного резерва являются одновременная работа всех $m+1$ элементов и, следовательно, их повышенный износ. В случаях, когда допустимы перерывы в работе системы, необходимые для замены основного элемента резервным, более экономичными являются облегченный и ненагруженный виды резерва, т. е. резервы замещением.

При ненагруженном резерве без восстановления средняя наработка до отказа группы равна сумме средних наработок всех элементов, т. е.

$$T_{li(m)} = \sum_{j=0}^m m_{lij}.$$

В случае экспоненциального распределения времени работы элементов с параметром λ_i вероятность $R_{i(m)}(t)$ при ненагруженном резерве определяется по формуле

$$R_{i(m)}(t) = e^{-\lambda_i t} \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda_i t)^j}{j!}.$$

При резерве замещением может потребоваться использование переключающих устройств (см. рис. 4.32, б).

Для восстанавливаемых систем, когда в процессе функционирования могут восстанавливаться основные и резервные элементы, при построении модели надежности необходимо учитывать число k рабочих элементов в группе, которая резервируется, состав резервных элементов и показатель обслуживания r , т. е. сколько элементов может одновременно восстанавливаться. Схема такой системы

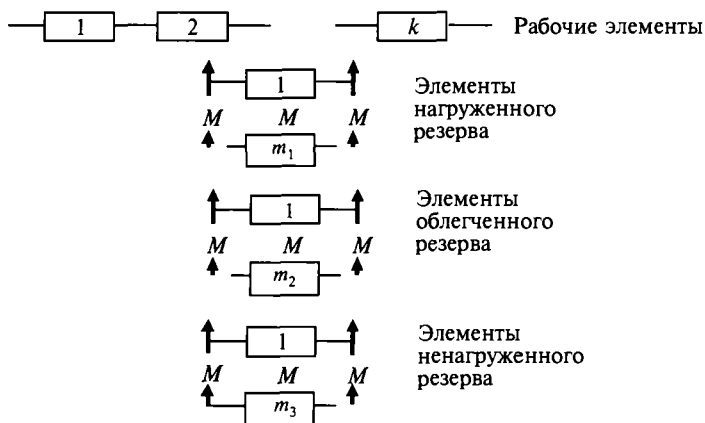


Рис. 4.33. Структурная схема надежности системы $\langle k, m_1, m_2, m_3, r \rangle$

представлена на рис. 4.33, а сокращенно ее модель обозначается кортежем $\langle k, m_1, m_2, m_3, r \rangle$, где m_1, m_2, m_3 — числа резервных элементов соответственно в нагруженном, облегченном (характеризуется показателем $0 < v < 1$) и ненагруженном состояниях.

Данная система с $m = m_1 + m_2 + m_3$ резервными элементами работает следующим образом. Если при функционировании отказывает один из k рабочих элементов, то он замещается резервным элементом, находящимся в нагруженном состоянии. Отказавший элемент поступает на восстановление, место восстанавливаемого элемента из числа m_1 занимает элемент из группы m_2 , а группа m_2 пополняется из m_3 . Данное состояние системы обозначается x_1 , т. е. имеется один отказавший элемент. Из состояния x_1 система может вернуться в состояние x_0 , если отказавший элемент будет восстановлен (он пополнит группу m_3), или перейти в состояние x_2 , если откажет еще один элемент, и т. д. Отказывать могут не только рабочие элементы, но и элементы из групп m_1 и m_2 . Отказ системы $\langle k, m_1, m_2, m_3, r \rangle$ наступает при достижении состояния x_{m-1} , т. е. когда в состоянии отказа будут находиться $m_1 + m_2 + m_3 + 1$ элементов.

Если время работы элементов до отказа и время восстановления показательные с параметрами λ и μ соответственно, то для решения задач моделирования кортеж $\langle k, m_1, m_2, m_3, r \rangle$ дополняется кортежем интенсивностей отказов и восстановления $\langle \lambda, \lambda, v\lambda, 0, \mu \rangle$. Для расчета вероятности безотказной работы $R(t)$ системы, представленной на рис. 4.33, составляется ориентированный граф G_n изменения состояний системы с поглощающим состоянием x_{m+1} (рис. 4.34, а). По графу G_n в предположении, что процесс измене-

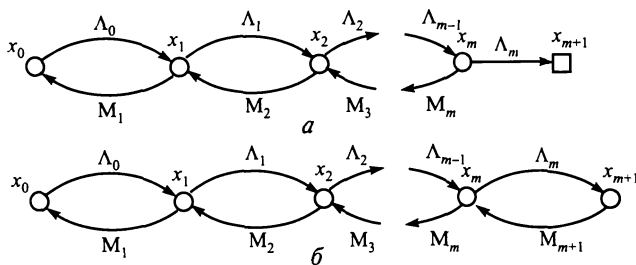


Рис. 4.34. Граф $\mathcal{G}_n$ изменения состояний резервированной системы:
 а — с поглощающим состоянием x_{m+1} ; б — граф $\mathcal{G}_o$ с отражающим состоянием x_{m+1}

ния состояний марковский, записывается система $m+2$ дифференциальных уравнений. Интенсивности дуг Λ_j графа, связанные с отказами элементов, определяются из соотношения

$$\Lambda_j = \begin{cases} k\lambda + m_1\lambda + m_2\nu\lambda, & j = \overline{0, m_3}; \\ k\lambda + m_1\lambda + (m_2 - (j - m_3))\nu\lambda, & j = \overline{m_3 + 1, m_2 + m_3}; \\ k\lambda + (m_1 - (j - m_2 - m_3))\lambda, & j = \overline{m_2 + m_3 + 1, m}; \end{cases}$$

а интенсивности дуг M_j , связанные с восстановлением,

$$M_j = \begin{cases} j\mu, & j \leq r; \\ r\mu, & j > r. \end{cases}$$

Система дифференциальных уравнений для расчета вероятностей состояний $p_j(t)$, $j = \overline{0, m+1}$, в компактной форме может быть записана следующим образом:

$$\frac{dp_j(t)}{dt} = \Lambda_{j-1}p_{j-1}(t) - (\Lambda_j + M_j)p_j(t) + M_{j+1}p_{j+1}(t), \quad j = \overline{0, m+1}, \quad (4.45)$$

с учетом

$$\Lambda_{-1} = \Lambda_{m+1} = M_0 = M_{m+1} = M_{m+2} = 0.$$

На основе решения системы уравнений (4.45) при начальных условиях

$$p_0(t) = 1, \quad p_j(t) = 0, \quad j = \overline{1, m+1},$$

определяются вероятность безотказной работы

$$R_{(m)}(t) = 1 - p_{m+1}(t)$$

и средняя наработка системы между отказами

$$m_t = \int_0^{\infty} R_{(m)}(t) dt.$$

Для определения коэффициента готовности $K_r(t)$ рассматриваемой системы используется граф $\mathcal{G}_o$ с отражающим состоянием x_{m+1} (рис. 4.34, б). Здесь также решается система уравнений (4.45), но при $M_{m-1} \neq 0$, т. е. с учетом $\Lambda_{-1} = \Lambda_{m-1} = M_0 = M_{m-2} = 0$. В результате решения системы уравнений определяются вероятности $p_j(t)$, $j = 0, m+1$, и нестационарный коэффициент готовности

$$K_r(t) = 1 - p_{m+1}(t).$$

Например, объект состоит из двух элементов: рабочего и нагруженного резервного. Пусть законы распределения времени работы элементов между отказами и восстановления показательные с параметрами λ и μ соответственно. При отказе одного из элементов его восстанавливают. Отказ объекта происходит, когда при восстановлении отказавшего элемента выходит из строя и другой элемент. Таким образом, имеют место кортежи $\langle 1, 1, 0, 0, 1 \rangle$ и $\langle \lambda, \lambda, 0, 0, \mu \rangle$. Множество X включает три состояния: x_0 — работоспособны оба элемента, x_1 — один элемент отказал и восстанавливается, x_2 — отказали оба элемента, это состояние отказа объекта.

На рис. 4.35 показаны графы переходов с поглощающим $\mathcal{G}_n$ и отражающим $\mathcal{G}_o$ состояниями x_2 . С помощью первого графа определяются вероятности безотказной работы объекта, с помощью второго — функция и коэффициент готовности.

Графу (рис. 4.35, а) соответствует следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \dot{p}_0 \\ \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\lambda & \mu & 0 \\ 2\lambda & -\mu - \lambda & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{pmatrix}$$

$$\dot{p}_i \triangleq \frac{d}{dt} p_i(t), \quad i = 0, 1, 2, \quad p_i(t) \triangleq p(x_i, t),$$

где $p(x_i, t)$ — вероятность состояния x_i в момент времени t .

В результате решения уравнения при начальных условиях $p_0(0) = 1$, $p_1(0) = p_2(0) = 0$ определяется вероятность безотказной работы

$$R(t) = p_0(t) + p_1(t) = 1 - p_2(t).$$

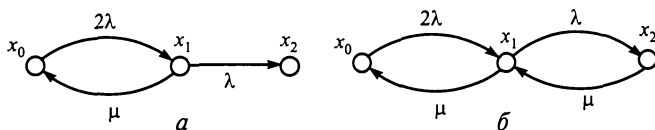


Рис. 4.35. Графы переходов с поглощающим (а) и отражающим (б) состояниями x_2 системы $\langle 1, 1, 0, 0, 1 \rangle$

Стационарные вероятности состояний $p_j = \lim_{t \rightarrow \infty} p_j(t)$, $j = \overline{0, m-1}$, могут быть определены по графу $\mathcal{G}_0$ методом графов. В этом методе используется понятие остовного входящего дерева (остова) $\bar{\mathcal{G}}_{i_c}$ со стоком в вершине i_c . Остов $\bar{\mathcal{G}}_{i_c}$ содержит все вершины графа $\mathcal{G}(X, D)$, не имеет контуров, и для любой вершины $j \neq i_c$ существует единственный путь из j в i_c .

В общем случае граф $\mathcal{G}(X, D)$ для произвольной вершины i имеет α_i различных остовов, которые обозначим $\mathcal{G}_{i,j}$, $j = \overline{1, \alpha_i}$. Интенсивность (вес) $v(\mathcal{G}_{i,j})$ остова $\mathcal{G}_{i,j}$ равна произведению интенсивностей $v(d)$ всех его дуг, а интенсивность β_i вершины i графа $\mathcal{G}$ равна сумме интенсивностей всех различных остовов со стоком в вершине i . Таким образом,

$$v(\mathcal{G}_{i,j}) = \prod_{d \in D_{i,j}} v(d), \quad j = \overline{1, \alpha_i}; \quad \beta_i = \sum_{j=1}^{\alpha_i} v(\mathcal{G}_{i,j}), \quad i = \overline{0, v},$$

где $D_{i,j}$ — множество дуг j -го остова со стоком в i -й вершине.

Стационарные вероятности p_j методом графов определяют по формуле

$$p_i = \beta_i \left(\sum_{j=1}^v \beta_j \right)^{-1} \quad i = \overline{0, v}.$$

Если для всех вершин $\alpha_i = 1$, т.е. граф $\mathcal{G}$ — одноостовный, то

$$\beta_i = v(\mathcal{G}_{i,1}), \quad i = \overline{0, v}.$$

Одноостовный граф называют линейчатым, если вершина $i \in [1, 2, \dots, v-1]$ смежна только с вершинами $i-1$ и $i+1$, а вершины 0 и v смежны с вершинами x_1 и x_{k-1} соответственно.

В нашем случае граф $\mathcal{G}_0$ является линейчатым. Для него

$$\begin{aligned} \beta_{x_0} &= \prod_{j=1}^{m-1} M_j; & \beta_{x_1} &= \Lambda_0 \prod_{j=2}^{m+1} M_j, \dots; \\ \beta_{x_m} &= M_{m-1} \prod_{j=0}^{m-1} \Lambda_j; & \beta_{x_{m+1}} &= \prod_{j=0}^m \Lambda_j \end{aligned}$$

и, следовательно,

$$p_i = \beta_{x_i} \left(\sum_{j=0}^{m+1} \beta_{x_j} \right)^{-1} \quad i = \overline{0, m+1},$$

при этом стационарный коэффициент готовности $K_r = 1 - p_{m-1}$.

Многие радиосистемы рассматриваются как сложные, состоящие из многих объектов (частей). Отказы отдельных частей, как



Рис. 4.36. Изменение состояний сложной системы во времени

правило, не приводят к полному отказу всей системы, а лишь снижают эффективность ее функционирования. В качестве сложной системы можно рассматривать многоканальные системы связи, радиотехнические комплексы, фазированные антенные решетки и т. д.

При расчете надежности сложных систем необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, показатели надежности системы часто являются промежуточными, необходимыми для расчета ее эффективности и безопасности. Во-вторых, показатели надежности отражают специфику изменения состояния системы, вызываемого отказами входящих в нее элементов. На рис. 4.36 показан пример траектории изменения состояний работоспособности сложной системы, здесь H_i — подмножество состояний с i -ми отказавшими элементами.

Среднюю эффективность функционирования сложной системы можно определить по формуле

$$E = \sum_{i=0}^s e_i p_i,$$

где $s + 1$ — число состояний системы; e_i — эффективность системы в состоянии H_i ; p_i — стационарная вероятность состояния H_i .

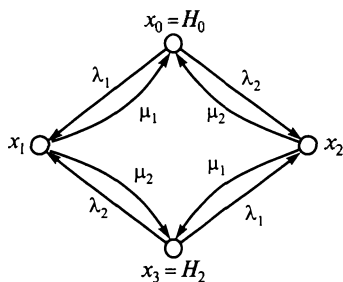
Если сложная система состоит из v одинаковых элементов, то в качестве показателя ее надежности можно рассматривать среднюю долю нормально функционирующих элементов, т. е.

$$\delta = \frac{1}{v} \sum_{i=0}^v (v - i) p_i.$$

Моделирование надежности сложной системы значительно упрощается, если при декомпозиции ее на элементы выполняются следующие условия: отказы элементов: события независимые, каждый элемент имеет два состояния — нормальной работы и отказа. Пусть время работы и время ремонта элементов подчиняются экспоненциальным распределениям. Тогда исходными данными для расчета будут параметры отказов элементов λ_j , $j = 1, 2, \dots, v$,

интенсивности восстановления элементов μ_j , $j = 1, 2, \dots, v$, и число ремонтников (ремонтных бригад) r .

Для расчета вероятностей состояний сложной системы составляется граф переходов $\mathcal{G}$. Например, система состоит из двух объектов с интенсивностями соответственно λ_1 , μ_1 и λ_2 , μ_2 , обслуживание неограниченное ($r = 2$). Для данной системы возможны следующие состояния: $H_0 = x_0$ —



оба объекта исправны; x_1 — неработоспособен первый объект; x_2 — неработоспособен второй объект; $x_3 = H_2$ — неработоспособны оба объекта. Из состояния x_0 система может перейти в состояние x_1 с интенсивностью λ_1 и в состояние x_2 с интенсивностью λ_2 . Из состояния x_1 с интенсивностью λ_2 система может перейти в состояние x_3 и с интенсивностью μ_1 вернуться в состояние x_0 и т.д. По графу переходов сложной системы (рис. 4.37) составляют квадратную матрицу переходных вероятностей $P = \|\pi_{ij}\|$.

Элемент π_{ij} матрицы представляет собой вероятность перехода системы из состояния x_i в состояние x_j за малый промежуток времени dt . Для графа переходов, представленного на рис. 4.37, матрица P имеет следующий вид:

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 - (\lambda_1 + \lambda_2)dt & \lambda_1 dt & \lambda_2 dt & 0 \\ \mu_1 dt & 1 - (\lambda_2 + \mu_1)dt & 0 & \lambda_2 dt \\ \mu_2 dt & 0 & 1 - (\lambda_1 + \mu_2)dt & \lambda_1 dt \\ 0 & \mu_2 dt & \lambda_2 dt & 1 - (\mu_1 + \mu_2)dt \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Сумма элементов каждой строки матрицы P равняется 1, т.е. матрица является стохастической. По столбцам матрицы P записывают систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{P}_0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0(t) + \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t); \\ \dot{P}_1 = \lambda_1 p_0(t) - (\lambda_2 + \mu_1)p_1(t) + \mu_2 p_3(t); \\ \dot{P}_2 = \lambda_2 p_0(t) - (\lambda_1 + \mu_2)p_2(t) + \mu_1 p_3(t); \\ \dot{P}_3 = \lambda_2 p_1(t) + \lambda_1 p_2(t) - (\mu_1 + \mu_2)p_3(t). \end{cases} \quad (4.46)$$

Заметим, что элементы π_{ij} матрицы (без dt и 1) служат коэффициентами перед вероятностями $p_i(t)$ в правых частях уравнений.

Решением системы дифференциальных уравнений (4.46) являются нестационарные вероятности состояний $p_i(t)$, $i = \overline{0, 3}$.

Вектор стационарных вероятностей $p = (p_i, i = \overline{0, 3})$ определяют, решая систему алгебраических линейных уравнений, получаемых из условий $\dot{p}_i = 0$, $i = \overline{0, 3}$, и $\sum_i p_i = 1$. В нашем случае эта система уравнений (последнее уравнение заменено уравнением нормировки) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 + \mu_1 p_1 - \mu_2 p_2 &= 0; \\ \lambda_1 p_0 - (\lambda_2 + \mu_1)p_1 - \mu_2 p_2 &= 0; \\ \lambda_2 p_0 - (\lambda_1 + \mu_2)p_2 - \mu_1 p_1 &= 0; \\ p_0 + p_1 + p_2 + p_3 &= 1. \end{aligned}$$

При значительном числе элементов системы определение вероятностей $p_i(t)$ и p_i связано с громоздкими вычислениями. Для отдельных частных случаев можно использовать конечные формулы. Например, в случае $r = 1$, разных значений интенсивностей отказов λ_i , $i = \overline{1, n}$, и одинаковых интенсивностей восстановления $\mu_1 = \dots = \mu_n = \mu$ формулы для определения стационарных вероятностей имеют вид

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{1}{\sum_{m=0}^n m! \sum_{\substack{i < j < \dots < n \\ m}} \rho_i \rho_j \dots \rho_n}, \quad \rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu}; \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ p_l &= \frac{l}{p_0} \sum_{\substack{i < j < \dots < k \\ l}} \underbrace{\rho_i \rho_j \dots \rho_k}_l, \quad l = 1, 2, \dots, n, \end{aligned}$$

где p_l — сумма вероятностей состояний, характеризуемых числом l отказавших элементов.

С ростом числа объектов трудности моделирования надежности сложных систем быстро возрастают вследствие большого числа возможных состояний N . Так, например, для системы из n объектов число состояний, отличающихся номерами отказавших элементов,

$$N = \sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

и при $n = 20$ составляет более миллиона.

Если учитывать очередность отказавших элементов, то

$$N = \sum_{i=0}^n \frac{n!}{(n-i)!},$$

т.е. при $n = 20$ $N > 10^{18}$. Оперировать такими массивами чисел при инженерных расчетах чрезвычайно трудоемко даже при использовании современных вычислительных машин. В этих случаях вычисляют нижние и верхние граничные значения показателей надежности. Основные формулы для расчета граничных значений имеют следующий вид.

Для систем, у которых λ_i разные, μ — одинаковые, $1 < r < n$, нижние граничные значения вероятностей рассчитываются по формулам

$$p_0^{\bar{\lambda}} = \left(\sum_{i=0}^n b_i \right)^{-1} \quad (4.47)$$

$$P_i^{\bar{\lambda}} = \begin{cases} \frac{n-i-1}{i} \frac{\bar{\lambda}}{\mu} P_{i-1}^{\bar{\lambda}}, & i \leq r; \\ \frac{n-i-1}{i} \frac{\bar{\lambda}}{\mu} P_{i-1}^{\bar{\lambda}}, & i > r; \end{cases} \quad (4.48)$$

$$\delta^{\bar{\lambda}} = \left(n \sum_{i=0}^n b_i \right)^{-1} \sum_{i=0}^n (n-i) b_i; \quad (4.49)$$

$$b_0 = 1, \quad b_i = \begin{cases} \frac{n-i-1}{i} \frac{\bar{\lambda}}{\mu} b_{i-1}, & i \leq r; \\ \frac{n-i-1}{i} \frac{\bar{\lambda}}{\mu} b_{i-1}, & i > r; \end{cases} \quad \bar{\lambda} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (4.50)$$

а верхние границы оцениваются по этим же формулам при использовании вместо $\bar{\lambda}$ значения $\lambda_n = \min_j \{\lambda_j, j = \overline{1, n}\}$.

Применительно к системам с разными интенсивностями восстановления элементов для нижних границ в формулах (4.47)–(4.50) используются $\bar{\lambda}$ и $\mu_n = \min_j \{\mu_j, j = \overline{1, n}\}$, а для верхних — λ_n и $\mu_n = \max_j \{\mu_j, j = \overline{1, n}\}$.

4.9. Информационные технологии для решения задач моделирования

Наиболее широко ИТ применяются для решения задач моделирования на системном уровне. В частности, для оперативной разработки имитационных агрегативных моделей и их реали-

зации в виде программных модулей разработаны специализированные системы имитационного моделирования, например АИС и САПАС [2].

Программные продукты GASP и SIMSCRIPT, основанные на событийном подходе, используются для имитационного моделирования объектов, функционирование которых можно представить в виде выполнения упорядоченной во времени последовательности событий или действий.

В системах CSL и SMPL имитационное моделирование реализуется с использованием подхода сканирования активностей, который позволяет более полно исследовать динамические режимы объектов.

Наглядное отображение структур проектируемых устройств и физических процессов в них обеспечивается системами моделирования СПАМ, АСРОL, DISLIN, PLSIN, SOL. В этих системах используется процессно-ориентированный подход, в соответствии с которым создается модель системы в виде совокупностей описаний процессов и связей между ними. Структура модели позволяет без существенных затрат вносить дополнительные модули для отражения изменений в физической системе.

Программные продукты SIMULA, GPSS, Q-GERT широко используются для имитационного моделирования систем, процессы в которых описываются моделями теории массового обслуживания. В них могут реализовываться различные законы распределения случайных величин, характеризующие потоки заявок (транзактов).

Перечислим ряд других программных продуктов, которые используются для моделирования различных систем.

DYNAST — программное обеспечение для расчета переходных процессов, символического и частотного анализа линеаризованных систем, описываемых системами дифференциальных и алгебраических уравнений, а также структурными и блок-схемами.

Программа MBTU «Моделирование в технических устройствах» является отечественной разработкой с классическим интерфейсом блочного моделирования. Исследование моделей возможно как во временной, так и в частотной области.

Другой распространенной отечественной системой является АСОНИКА — автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры. Система предназначена для комплексного анализа и обеспечения стойкости РЭС к тепловым и механическим воздействиям, расчета показателей надежности и автоматизации документооборота при выполнении проектных работ.

Система включает ряд подсистем: АСОНИКА-Т (анализ и обеспечение тепловых характеристик), АСОНИКА-М (анализ на механические воздействия), АСОНИКА-Б (анализ показателей безотказности) и др.

Система SamSim предназначена для моделирования линейных и нелинейных цепей, построения временных и частотных характеристик, фазовых портретов и годографов. Программа удобна для студентов, так как позволяет визуализировать процессы в любой точке модели.

Программный продукт SIMPLORER Simulation Center используется для моделирования и анализа систем, описанных элементами электрических, структурных и блок-схем, а также представляемых в виде графа конечного автомата.

Моделирующий комплекс VTB (Virtual Test Bed) предназначен для визуальной (3D) симуляции технических систем из областей электромеханики, энергетики и др. Модели могут описываться на языках ACSL, Modelica, Siber, SPICE, Simulink.

Графическая среда AnyLogic создана для моделирования сложных дискретно-непрерывных (гибридных) систем, а также нескольких движущихся объектов, которые могут исчезать и появляться, «видеть» друг друга и взаимодействовать.

Пакет программ DuMoLa позволяет моделировать динамические режимы электронных, энергетических, механических, гидравлических систем. Пакет имеет блочное представление с открытыми интерфейсами для интеграции и поддержкой языка Modelica. Универсальный объектно-ориентированный язык Modelica моделирования физических систем поддерживается также пакетами MathModelica (Mathematica), ALLAN, 20-sim, SMILE/M.

Программа EASY5 используется для блочного моделирования и анализа динамических систем, содержащих электрические и цифровые подсистемы, а также гидравлические, пневматические, механические, тепловые элементы.

Программный продукт Model Vision Studium предназначен для визуального интерактивного моделирования динамических режимов структурно-сложных гибридных систем с применением карт поведения и объектно-ориентированного языка описаний.

Комплекс программ КОПРАС используется для решения задач анализа и синтеза автоматических систем. Он имеет большой набор решающих, функциональных элементов и сервисных функций. Модели динамики описываются структурными схемами.

Пакет PDELab предназначен для решения систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, он обес-

печивает компьютерное моделирование в технике, физике, химии, биологии и медицине.

Программный продукт MMANA предназначен для решения широкого класса задач моделирования антенн. Программа позволяет создавать и редактировать описание антенны, рассчитывать диаграммы направленности антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях, сравнивать результаты моделирования нескольких разных антенн, оптимизировать параметры антенны, строить разнообразные графики (зависимости от частоты входного сопротивления, коэффициента усиления, отношения излучений вперед/назад и др.). Расчеты выполняются методом многомерных матриц (моментов). Библиотека содержит информацию о 200 антеннах. Программа русифицирована и поставляется бесплатно.

При решении многих задач анализа и синтеза радиосистем могут использоваться различные программные средства, предназначенные для математических вычислений в технических приложениях, к ним относятся MATLAB, Matcad, Excel, Maple и др.

Система MATLAB (MATrix LABoratory — матричная лаборатория, фирма MathWorks, Inc) создана «как язык программирования высокого уровня для технических вычислений». Система имеет открытую архитектуру, современные версии поставляются вместе с пакетом расширения Simulink. Наиболее полно функциональные возможности системы проявляются в рамках комплекса «MATLAB + Simulink + пакеты расширения». Число пакетов расширения насчитывает несколько десятков. В системе реализован принцип визуально-ориентированного программирования, уравнения состояний, описывающие динамические системы, формируются автоматически, имеются виртуальные средства регистрации и визуализации результатов моделирования. Функции системы MATLAB позволяют в интерактивном режиме выполнять сложные математические вычисления, разрабатывать алгоритмы, проводить вычислительный эксперимент и имитационное моделирование, анализировать данные и визуализировать результаты.

Основным объектом системы MATLAB является массив, для которого не требуется явно указывать размерность. Это позволяет решать многие вычислительные задачи, связанные с векторно-матричными уравнениями, существенно сокращая время, которое понадобилось бы для программирования на языках типа C или FORTRAN. Система MATLAB реализована как операционная среда и язык программирования. На языке MATLAB пользователем могут быть написаны программы для многократного применения, которые представляют собой коллекции М-файлов.

Фирма-разработчик MATLAB поддерживает связи с вузами, создаются образовательные версии, цены на которые имеют значительные скидки. Например, студенческая версия Student Edition of MATLAB практически не отличается от коммерческой версии, предназначена для учебного процесса и имеет невысокую цену. Для проектирования радиосистем наиболее полезными являются пакеты комплекса «MATLAB + Simulink + пакеты расширения»: System Identification Toolbox, Frequency Domain Identification, Control System Toolbox, Nonlinear Control Design, Robust Control Toolbox и др.

Полные сведения о перечисленных программах и их возможностях можно получить в Интернете.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к математическим моделям, используемым при проектировании РЭС?
2. Каковы основные этапы построения математических моделей?
3. По каким признакам классифицируются математические модели?
4. Приведите примеры различных видов моделей по отдельным признакам классификации.
5. Какие объекты входят в модель динамической системы?
6. Что характеризует вектор фазовых координат системы?
7. Приведите примеры процессов в РЭС, которые описываются математическими моделями на микроуровне.
8. Какие математические соотношения используются в моделях на микроуровне?
9. Для решения каких задач используются математические модели на микроуровне?
10. Каковы различия между математическими моделями на микроуровне и макроуровне?
11. Какие виды уравнений используются в математических моделях на макроуровне?
12. Для решения каких задач при проектировании РЭС используются математические модели на макроуровне?
13. Какие типы сигналов используются в дискретных системах?
14. Какие модели используются для описания динамических процессов в дискретных системах?
15. Какие виды графов вы знаете?
16. Какие формы записи используются при задании графов математическим выражением?
17. Для решения каких задач используются графовые модели?
18. Что представляют собой математические модели на системном уровне?
19. Для решения каких задач применяются математические модели на системном уровне?

20. По каким признакам различаются системы массового обслуживания?

21. Что представляет собой потоки заявок?

22. Какие основные свойства рассматривают при моделировании потоков событий?

23. Какие модели используются для описания потоков событий?

24. Какими свойствами обладает простейший поток событий?

25. Какие показатели характеризуют функционирование системы массового обслуживания?

26. По каким признакам характеризуется объект при анализе надежности?

27. Какие показатели используются для количественной оценки надежности проектируемой РЭС?

28. Какие распределения случайных величин широко используются при определении вероятностей выхода параметров за пределы допуска?

29. Как формулируются прямая и обратная задачи, связанные с допусками, при анализе системы?

30. Как определяются коэффициенты влияния отклонений входных параметров от номинальных значений на значения погрешностей выходных?

31. Какие модели используются для определения показателей надежности восстанавливаемых систем?

32. Каковы особенности моделирования сложных систем при анализе их надежности?

33. Какие информационные технологии используются для решения задач моделирования РЭС?

Методы, используемые при проектировании электронных средств, и модели, рассмотренные в четвертой главе, составляют математическое обеспечение САПР. Как и математические модели, методы решения задач проектирования характеризуются большим разнообразием. Для решения одной и той же задачи обычно могут использоваться разные методы. Многие из них основаны на сложном математическом аппарате. Качество разрабатываемых РЭС во многом зависит от того, насколько персонал информационных служб владеет современными методами решения задач проектирования конкурентоспособных изделий.

Учитывая исключительно большое число методов, применяемых для широкого круга проектных задач, и ограниченный объем учебного пособия, об отдельных методах приводятся лишь краткие сведения. Основное внимание в данной главе уделяется методам, которые не содержатся в распространенных пакетах прикладных программ, а также методам решения наиболее характерных и трудоемких задач автоматизированного проектирования РЭС.

5.1. Состав и принципы систем автоматизированного проектирования

Важными направлениями развития современных радиосистем являются расширение их функциональных возможностей, усложнение структуры, применение новых методов обработки сигналов, использование компьютерной техники для управления работой системы, рост числа объектов информационного взаимодействия, необходимость адаптации к быстроменяющейся обстановке, возможность функционирования в условиях воздействия различных помех и др. Проектам, связанным с разработкой новых РЭС, присущи уникальность и неповторяемость, необходимость поиска новых решений для большого числа разнообразных задач.

Как уже отмечались в подразд. 2.1, по степени новизны проектируемого РЭС выделяют задачи частичной модернизации (в ос-

новном это изменение параметров прототипа), существенной модернизации (изменение структуры и параметров) и создания новой системы (с использованием новых принципов действия). В последующем при постановке задач и описании методов их решения будут рассматриваться задачи существенной модернизации и создания новых РЭС. В зависимости от степени сложности и численности участвующего персонала различают простые, средней сложности, сложные и очень сложные задачи (проекты, программы). Простые задачи решаются небольшой группой разработчиков, а к решению очень сложных задач, например к созданию новых радиотехнических комплектов связи, привлекаются коллективы нескольких научно-исследовательских организаций, проектных институтов и производственных предприятий [10].

Применительно к этапам проектирования РЭС можно выделить четыре группы задач: системотехнического, схемотехнического, конструкторско-технологического проектирования и испытания РЭС (табл. 5.1).

В процессе решения системотехнических задач определяются цели проектирования, выполняется краткое технико-экономическое обоснование, формулируются задачи проектирования сначала на качественном уровне, и затем на основе количественных данных разрабатывается план выполняемых работ. Во многих случаях план включает выполнение научно-исследовательских работ с решением задач структурной оптимизации и др. Основные особенности задач этой группы: высокая степень ответственности за получение правильных результатов, большая неопределенность используемых данных, недостаточность разработанных методик и математических методов решения таких задач. В связи с этим при решении системотехнических задач широкое применение находят ИТ управления рисками, поддержки принятия решений, управления проектами и др.

При проектировании важно помнить, что ошибки, допущенные на начальных этапах проектирования и обнаруженные на последующих этапах, требуют на порядок больше затрат по сравнению с затратами на их своевременное устранение на соответствующем этапе (правило «десятикратных затрат»).

Для решения задач схемотехнического проектирования разработано большое число математических методов, которые используются в математическом обеспечении современных САПР. Результаты решения схемотехнических задач служат исходными данными для конструкторско-технологического проектирования, а также для разработки испытательной аппаратуры.

Распределение задач по основным этапам проектирования

Этап проектирования	Состав группы задач
Системотехническое проектирование	Инициация проекта. Выбор и формулировка цели проектирования. Планирование проектных работ. Разработка концепции. Обоснование исходных данных. Определение принципов действия и структуры системы. Структурная оптимизация
Схемотехническое проектирование	Аппаратурный синтез. Параметрическая оптимизация. Исследование чувствительности
Конструкторско-технологическое проектирование	Конструирование модулей, устройств. Компоновка, размещение, трассировка. Оптимизация конструкций по векторному критерию. Разработка технологий изготовления элементов и системы в целом. Выбор технологического оборудования. Разработка технической документации, ИЭТР и др.
Испытания РЭС	Разработка испытательной аппаратуры. Планирование испытаний, обработка их результатов, оценка эффективности

Решение задач конструкторско-технологического проектирования во многом регламентировано существующими нормативно-техническими документами. Вместе с тем широко используются методы оптимизации, позволяющие вырабатывать оптимальные проектные решения как по конструктивно-технологическим, так и экономическим показателям.

При автоматизированном решении задач конструкторского проектирования важное место занимают задачи компоновки (объединения модулей низшего уровня структурной иерархии элементов конструкции в модули более высокого уровня), размещения (оптимального расположения элементов в монтажном пространстве) и трассировки (определения линий, соединяющих эквипотенциальные контакты компонентов проектируемых устройств). Учитывая важность и сложность этих задач, они будут подробно рассмотрены в следующих подразделах.

Все группы задач тесно взаимосвязаны, и во многих случаях при решении задач одной группы приходится возвращаться к решению предшествующих задач. Например, при выполнении конструкторско-технологического проектирования может возникнуть необходимость пересмотра решений схемотехнических задач и даже принципа действия РЭС, т. е. в схеме процесса проектирования имеют место обратные связи и отдельные итерации могут выполняться многократно (рис. 5.1, а).

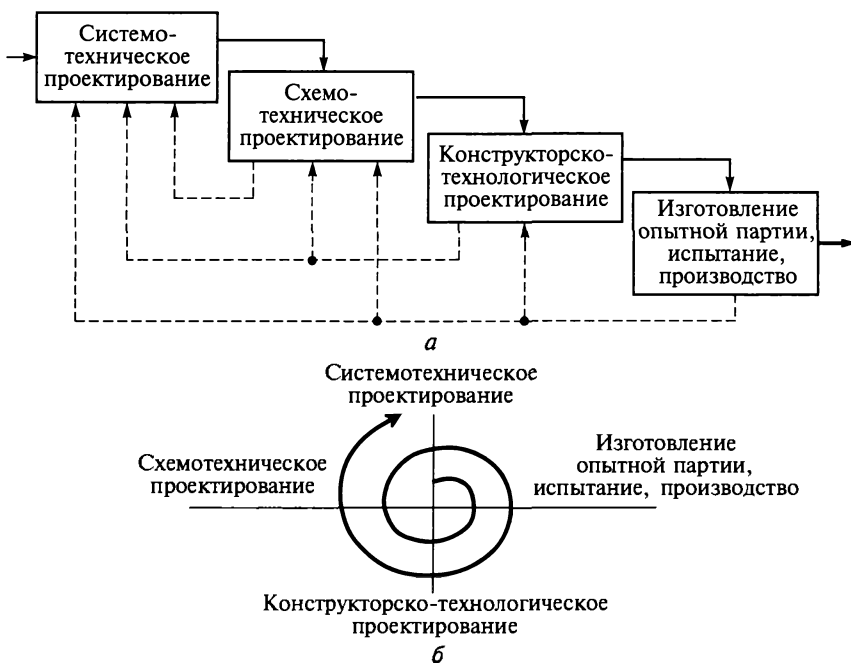


Рис. 5.1. Модели выполнения проектов по созданию новых РЭС:
а — каскадная; б — спиральная

Во многих случаях задачи проектирования РЭС и технологической подготовки производства формулируются как оптимизационные. При этом общая задача проектирования декомпозируется на ряд частных задач. Постановка задачи оптимизации включает несколько этапов, основными из них являются следующие:

- выделение (описание) объекта и формулировка цели проектирования;
- построение математической модели объекта, которая характеризует связь варьируемых конструктивных параметров с показателями эффективного достижения намеченных целей;
- задание ограничений на изменение варьируемых параметров, а также на значения других переменных и параметров, т. е. формирование области поиска возможных решений;
- строгая математическая постановка задачи, содержащая модель объекта, критерий оптимальности, варьируемые переменные (параметры), возможные ограничения и другие особенности задачи.

Задачи оптимизации классифицируются по разным признакам. В зависимости от вида критерия оптимальности различают

задачи со скалярным критерием и задачи с векторным критерием. По виду математической модели выделяют задачи линейного и нелинейного программирования, с непрерывным или целочисленным изменением варьируемых параметров. В зависимости от степени определенности исходных данных (параметров модели, внешних воздействий и т. п.) различают детерминированные и стохастические задачи, задачи в условиях неопределенности.

При создании новых РЭС и используемых в них информационных технологий (программных продуктов) наибольшее распространение получили два вида моделей выполнения проектов: каскадная («водопад») и спиральная (рис. 5.1, а, б). Для каскадной модели пунктиром показаны обратные связи, т. е. возможные коррекции по результатам принятия решения после окончания очередного этапа [24]. Спиральная модель предполагает итерационный процесс выполнения проекта. Каждая итерация представляет собой определенный цикл разработки, приводящий к созданию действующего образца проектируемого объекта или версии программного обеспечения.

В условиях обостряющейся конкурентной борьбы на рынке электронных средств роль оперативного принятия обоснованных решений постоянно возрастает. Руководству предприятий электронного профиля приходится принимать исключительно ответственные решения по разработке стратегии развития предприятия, созданию благоприятного конкурентного положения, выбору новых видов продукции для производства, увеличению доли рынка и т. д. Принятие обоснованного решения в основном определяется тремя факторами: 1) правильной постановкой задачи исследования, т. е. определением модели рассматриваемой задачи; 2) выбором наиболее эффективного метода (или группы методов) решения задачи; 3) использованием компьютерных технологий для оперативной обработки данных в процессе решения и представления результатов.

В табл. 5.2 приведены методы, наиболее часто используемые на разных этапах проектирования и в различных условиях, связанных с достаточностью информации для принятия проектных решений. Распределение методов в таблице условно, один и тот же метод может применяться на разных этапах и в разных условиях.

С позиций системного подхода выделяют задачи системного анализа и системного синтеза. В результате решения задач системного синтеза разрабатывается, например, структура проектируемой системы, которая удовлетворяет требованиям технического задания.

Таблица 5.2

Методы решения проектных задач

Укрупненные этапы жизненного цикла проекта	Условия принятия проектных решений		
	Полная неопределенность	Частичная неопределенность	Определенность
Системотехническое проектирование	Методы экспертных оценок, ранговой корреляции и др.	Байесовские методы, теория игр, методы Шортлифа — Бьюкенена, анализа иерархий, нечеткой логики и др.	Методы математического программирования: линейное, нелинейное, квадратичное, целочисленное и др.
Схемотехническое проектирование	—	Эвристические методы, морфологические таблицы	То же
Конструкторское проектирование	—	Эвристические методы (последовательные, итерационные и др.)	Поисковые методы, динамическое программирование, генетические алгоритмы и др.
Технологическое проектирование	—	Робастное проектирование	То же
Макетирование, испытания	—	Планирование эксперимента, проверка статистических гипотез	

Задачи анализа в основном заключаются в определении свойств системы при конкретной структуре и значениях параметров системы. Для каждого этапа проектирования характерны свои задачи анализа и синтеза. В большинстве случаев они решаются как оптимизационные и тесно взаимосвязаны, так как для решения одних задач в качестве исходных данных используются результаты решения других. Например, в результате анализа свойств и характеристик прототипа решается задача структурного синтеза проектируемого объекта, а полученные варианты структуры анализируются с целью выбора наиболее предпочтительной.

В общем случае математическая формулировка оптимизационной задачи проектирования РЭС может быть записана следующим образом:

$$Q(L, U) \rightarrow \min_{U \in S}.$$

где Q — экстримизируемый функционал; L — условия функционирования;

рования объекта; U — вектор (массив) варьируемых переменных (параметров); S — область значений U , при которых они удовлетворяют требуемым ограничениям,

$$S \quad \begin{cases} g_i(L, U) = 0, & i = \overline{1, l}; \\ h_j(L, U) \leq 0, & j = \overline{1, k}. \end{cases}$$

Эти ограничения в форме равенств и неравенств связаны с необходимостью удовлетворения различных требований, предъявляемых к проектируемому РЭС.

В процессе проектирования определяются варианты структуры W системы и вектора ее параметров $C = (c_1, \dots, c_n)$, включающего параметры элементов электрических схем, характеристики модулей и т. п., таким образом,

$$U = \langle W, C \rangle.$$

Оптимальные структура W^* и вектор параметров C^* РЭС находятся в результате решения оптимизационной задачи

$$\langle W^*, C^* \rangle = \arg \underset{\substack{W \in S_W \\ C \in S_C}}{\text{extr}} Q(L, W, C),$$

где S_W, S_C — множества допустимых структур и параметров.

На различных этапах проектирования задача оптимизация формулируется с учетом вида критерия Q , состава варьируемых переменных и других особенностей исходных данных.

5.2. Задачи системотехнического проектирования

Задачи системотехнического проектирования (см. табл. 5.1) имеют следующие особенности:

- цена ошибки от неправильного принятого решения очень высока и в большинстве случаев связана со значительными материальными и временными затратами;
- многие задачи носят уникальный характер, и для их решения отсутствуют математические модели;
- в задачах должно учитываться множество ограничений и частных показателей, т. е. задачи являются сложными в математическом отношении;
- для решения многих задач отсутствуют достоверные данные, т. е. приходится принимать решение в условиях неопределенности;

- большинство задач требуют оперативного решения, так как отводимое на них время жестко ограничено;
- для решения многих задач необходим обширный справочный материал (базы данных);
- во многих случаях для принятия правильного решения могут быть использованы только квалификация, опыт и интуиция специалиста (эксперта).

К перечисленным особенностям следует добавить ряд обстоятельств, которые вызывают дополнительные трудности в получении обоснованных решений:

- отсутствие достоверных данных для построения математических моделей, необходимых при решении задач оптимизации;
- высокая стоимость и длительные сроки проведения экспериментальных исследований для получения достоверных данных;
- субъективизм в выборе критериев, весовых коэффициентов, оценки стоимостных затрат и т. д.;
- высокая размерность многих решаемых задач.

Кроме того, обычно проектирование РЭС выполняется значительным числом групп специалистов разного профиля. В этом случае возникают проблемы конструирования всей системы из готовых «черных ящиков», синтеза системы с требуемыми показателями качества с учетом технических характеристик подсистем и др.

При решении задач системотехнического проектирования в условиях рыночной экономики необходимо учитывать усиливающуюся нестабильность внешней среды. Это проявляется в том, что события становятся все более непривычными и неузнаваемыми; повышаются темпы изменений, которые значительно превосходят скорость ответной реакции предприятий; возрастают частоты появления неожиданных событий, внезапных изменений, их непредсказуемость.

В этих условиях для принятия проектных решений возрастает роль качественных методов (методы экспертных оценок, «Дельфи» и т. п.), а также методов принятия решений в условиях неопределенности или частичной неопределенности (см. табл. 5.2).

Успех решения задач системотехнического проектирования в значительной степени зависит от того, насколько четко и правильно они сформулированы, какой (или какие) выбран метод для их решения и насколько грамотно интерпретируются результаты решения.

В зависимости от важности принимаемых решений для деятельности предприятия, тяжести последствий от ошибочных решений выделяют три группы решений [12]:

- 1) стратегические решения, относящиеся к долгосрочным проектам и принимаемые руководством верхнего уровня;
- 2) тактические решения по среднесрочным проектам, они, как правило, принимаются руководителями среднего уровня;
- 3) оперативные решения по краткосрочным проектным задачам. Эти решения могут относиться к различным этапам выполнения проекта и принимаются руководителями разного уровня.

Рассмотрим простейшие постановки задач принятия проектных решений.

Пусть задано множество альтернативных вариантов решения

$$\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (5.1)$$

и сформулирован критерий Q , на основе которого мы должны принять решение о наилучшем варианте $v^* \in \mathcal{V}$. Данную задачу будем называть задачей выбора оптимального варианта (ВОВ).

Если из множества (5.1) необходимо по критерию Q выделить подмножество вариантов $\mathcal{V}_0 \subset \mathcal{V}$ таких, что каждый вариант $v_j^0 \in \mathcal{V}$ предпочтительнее вариантов $v_v \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{V}_0$, то данную задачу назовем задачей выбора предпочтительных вариантов (ВПВ).

Сформулированные задачи ВОВ и ВПВ можно записать в виде

$$v^* = \arg \underset{v}{\text{opt}} \{Q(v), v \in \mathcal{V}\}; \quad (5.2)$$

$$\forall v_j^0 \in \mathcal{V}_0; \quad \forall v_v \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{V}_0 \quad v_j^0 \succ_Q v_v, \quad (5.3)$$

здесь $\succ_Q$ — знак предпочтения по критерию Q .

По степени определенности и полноты исходных данных можно выделить три класса задач ВОВ, ВПВ и других, решаемых при схемотехническом проектировании.

К первому классу относятся задачи, для которых рассматриваются лишь множество альтернативных вариантов и критерий в виде словесной формулировки целевой функции (Ц), — это задачи принятия решений в условиях полной неопределенности или задачи качественного характера.

Второй класс задач характеризуется заданием количественных данных (часто приближенных) о значениях критерия в различных ситуациях, а в ряде случаев и вероятностях этих ситуаций, — это задачи принятия решений в условиях частичной неопределенности (или просто неопределенности).

Для задач третьего класса задаются математические модели, позволяющие рассчитывать значения критерия и другие характеристики, необходимые для принятия решения, это класс задач математического программирования.

Задачи первого класса обычно возникают, когда решение требуется принять оперативно и в новой области или когда для сбора экспериментальных (статистических) данных и разработки математической модели нет времени (или средств). Источниками информации здесь в основном являются интуиция и опыт специалистов (консультантов, экспертов). Поэтому для решения задач этого класса широкое распространение получили методы экспертных оценок и другие родственные им методы.

Для задач второго класса известно большое число методов, как классических с хорошо разработанной теорией, так и эвристических (см. табл. 5.2).

При реализации вариантов $v \in V$ могут возникнуть различные ситуации s , множество k ситуаций обозначим

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}.$$

Например, для технических проектов, подаваемых на конкурс, такими ситуациями могут быть следующие: несоответствие технических характеристик изделий, получаемых на практике и ожидаемых по проекту; уменьшение потребительского спроса; увеличение себестоимости по сравнению с запланированной и т. д. Изменение ситуаций может носить как нейтральный характер («игра с природой»), так и противодействующий (конфликтный) характер.

На момент решения задач (5.2) или (5.3) неизвестно, какая из ситуаций $s \in S$ будет иметь место в действительности. Значения критерия Q для различных ситуаций будут различными, т. е. для двух вариантов v_i и v_j надо сопоставлять множества $\{Q(v_i; s), s \in S\}$ и $\{Q(v_j; s), s \in S\}$.

Если множество ситуаций S применительно к задачам (5.2), (5.3) четко определено для всех вариантов, то задачи будем называть соответственно задачами ВОВ и ВПВ в условиях неопределенности, обусловленной возможными ситуациями S , или сокращенно ВОВ на S и ВПВ на S .

Математически данные задачи записываются следующим образом:

$$v^* = \arg \underset{v}{\text{opt}} \{Q(v, S), v \in V\}; \quad (5.4)$$

$$\forall v_j^0 \in V_0, \quad \forall v_v \in V \setminus V_0: v_j^0 \succ_{Q(V,S)} v_v, \quad (5.5)$$

где $Q(V, S)$ — значение критерия Q для варианта v с учетом возможных ситуаций $s \in S$.

Если в задачах (5.4), (5.5) известны вероятности ситуаций $p_v(s)$, $s \in S$, $v \in V$, то они называются соответственно задачами ВОВ и ВПВ на множестве вероятных ситуаций или сокращенно ВОВ на $P(S)$ и ВПВ на $P(S)$. Здесь

$$P(S) = \{p_v(s), s \in S, v \in V\}.$$

Большое значение при выборе метода решения задач ВОВ и ВПВ имеет характер критерия Q . Можно выделить четыре основных случая задания критерия:

1) критерий представляет собой скалярную величину, которую обозначим q , например это может быть один из показателей эффективности;

2) критерий Q является вектором с k компонентами, т. е.

$$Q = (q_1, q_2, \dots, q_k). \quad (5.6)$$

в общем случае критерий Q для разных проектов может содержать разные компоненты;

3) вместо количественного показателя в качестве критерия рассматривается словесно сформулированная цель, на основе которой принимается решение, такое словесное описание критерия обозначим Π ;

4) в качестве критерия задаются статистические данные, характеризующие эффективность вариантов, обозначим эти данные для варианта v_i массивом

$$X(v_i) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}), \quad v_i \in V.$$

Принятие решения применительно к любой из приведенных задач является заключительным, восьмым этапом следующего процесса:

- 1) возникновение и конкретизация проблемы;
- 2) идентификация модели задачи;
- 3) формирование множества альтернативных вариантов, выбор критерия, введение возможных ситуаций;
- 4) математическая постановка задачи;
- 5) наполнение задачи конкретными числовыми данными;
- 6) выбор метода решения;

7) численное решение задачи и анализ полученных результатов;

8) принятие решения по проблеме.

Наиболее эффективно использование компьютерных технологий на этапах 2, 5, 6, 7.

В принятии оптимальных решений (выборе оптимального варианта) обычно принимают участие три группы лиц, различающихся по их роли в процессе решения проблемы.

1. Лицо, принимающее решение (ЛПР), или группа ЛПР. Это лицо формулирует цель (критерий оптимальности), ограничения, окончательно устанавливает вариант для реализации (принимает итоговое решение).

2. Группа экспертов — специалистов по конкретной проблеме или экспертная комиссия (ЭК). Они определяют альтернативные варианты, критерии, выявляют относительную важность, значимость альтернатив, ранжируют или сравнивают варианты и т. д.

3. Группа консультантов по математическим методам принятия решений или рабочая группа. Они организуют работу экспертов и ЛПР, разрабатывают процедуру работы, обрабатывают и анализируют информацию от экспертов.

В качестве модели задачи принятия решения применительно к выбору вариантов будем использовать кортеж

$$K = \langle W, F, N, U \rangle \quad (5.7)$$

со следующими компонентами: W — вид задачи по числу выделяемых вариантов — ВОВ или ВПВ, т. е. это может быть v^* или $\mathcal{V}_0$; F — функционал, который определяет характер задания критерия, это может быть q или Q , или $\mathcal{C}$, или X ; N — вид неопределенности, связанной с возможными ситуациями, $N = S$, если задается множество ситуаций, или $N = P(S)$, если для ситуаций заданы вероятности, или $N = 1$, если ситуации не определены; U — участники принятия решения, т. е. ЭК + ЛПР, или ЛПР, или ЭК.

Например, модель

$$\langle v^*, q, P(S), \text{ЛПР} \rangle$$

определяет задачу ВОВ при скалярном критерии q с заданием возможных ситуаций и их вероятностей, решаемую ЛПР.

Число возможных моделей задач принятия решений определяется мощностью множества $\mathcal{K}$, которое представляет собой декартово произведение четырех множеств, т. е.

$$\mathcal{K} = \mathcal{W} \times \mathcal{F} \times \mathcal{N} \times \mathcal{U},$$

где $\mathcal{W} = \{v^*; \mathcal{V}_0\}$, $\mathcal{F} = \{q, Q, \mathbb{C}, X\}$; $\mathcal{N} = \{S, P(S), 1\}$; $\mathcal{U} = \{\text{ЭК} + \text{ЛПР}; \text{ЛПР}, \text{ЭК}\}$.

Исходные данные задачи $K \in \mathcal{K}$ представляют собой массив реквизитов

$$R = \{n, (n_0), \text{extr}, M_q, (M_Q), (M_x), n_s, (M_p), U\}, \quad (5.8)$$

где n — число альтернативных вариантов; n_0 — число предпочтительных вариантов (мощность $\mathcal{V}_0$); extr — характер задачи на минимум или максимум; M_q (M_Q) — матрицы значений критериев; M_x — массивы статистических данных; n_s — число ситуаций; M_p — матрица вероятностей ситуаций; U — кто принимает решение (ЛПР, ЭК, ЭК+ЛПР). В круглые скобки в (5.8) заключены компоненты R , которые для некоторых задач не требуются. В некоторых случаях вместо матриц M_q , M_Q , M_p могут задаваться интервальные значения.

На основе модели задачи (5.7) и массива реквизитов (5.8) создают компьютерные технологии, обеспечивающие оперативное решение задач принятия проектных решений. Вместе с тем модель (5.7) не следует рассматривать как окончательную. В нее могут быть введены новые элементы с целью учета следующих частных особенностей задачи:

- число альтернативных вариантов n к началу решения задачи может быть неизвестно, и множество $\mathcal{V}$ формируется в ходе решения задачи, это обстоятельство нетрудно учесть расширением множества $\mathcal{W}$ видов задач;
- во многих случаях вследствие недостоверности исходных данных значения M_q , P_s и другие задаются интервалами, это можно учесть, если ввести дополнительные параметры в множествах $\mathcal{F}$ и $\mathcal{N}$;
- решение задачи выбора оптимального варианта может быть совмещено с проверкой выполнения некоторых ограничений, в том числе при различных условиях эксплуатации, когда сначала требуется определить допустимые варианты решения.

В общем случае множество $\mathcal{V}$ наряду с вариантами проектных решений может включать варианты решений организационного характера, например сбора дополнительной информации, разработки макета, моделирование и т. п. Большое значение для принятия обоснованного решения имеет выбор метода, который наиболее соответствует рассматриваемой задаче. В ряде случаев целесообразно решать задачу различными методами и по их результатам принимать окончательные решения.

5.3. Методы принятия решений в условиях полной неопределенности

Понятие «полная неопределенность» условно, точнее под этим понимается высокая степень неопределенности. Такая неопределенность характерна для формирования концепции проекта, когда исходных данных для принятия обоснованного решения недостаточно, имеющиеся сведения недостоверны, возможные риски в полной мере не исследованы, на результаты могут влиять действия конкурентов и т.д. Аналогичная неопределенность может иметь место при сравнении инвестиционных проектов, когда критерии сопоставления вариантов (текущая стоимость, период окупаемости, внутренняя ставка доходности, прогнозируемая прибыль и т.д.) четко не сформулированы.

Как уже отмечалось, при решении задач ВОВ и ВПВ в условиях полной неопределенности широко применяются методы экспертных оценок, в частности, с использованием ранжирования вариантов или парных сравнений. Существенную роль здесь играет вид критерия для сравнения альтернативных вариантов. Возможны два случая: 1) критерий задается в форме словесной формулировки цели проекта или в виде скалярной величины, этот случай будем называть принятием решения при скалярном критерии; 2) критерий представляет собой векторную величину. Методы экспертных оценок и другие родственные им методы объединяет то, что основой для решений экспертов в большей степени служит качественная информация. Вместе с тем для обработки мнений экспертов применяются такие математические методы, как корреляционный анализ, проверка статистических гипотез, многокритериальная оптимизация и др.

Методом ранжирования вариантов при скалярном критерии q , а также в случае словесной формулировки цели (Π) оперативно решается широкий круг задач ВОВ и ВПВ в условиях полной неопределенности, в частности задачи с моделями (5.7)

$$\langle v^*, q, 1, \text{ЭК} \rangle, \quad \langle v^*, \Pi, 1, \text{ЭК} \rangle, \quad \langle v^*, X, 1, \text{ЭК} \rangle; \\ \langle \mathcal{V}_0, q, 1, \text{ЭК} \rangle, \quad \langle \mathcal{V}_0, \Pi, 1, \text{ЭК} \rangle, \quad \langle \mathcal{V}_0, X, 1, \text{ЭК} \rangle \text{ и др.}$$

Ранжирование часто применяется, когда значения критерия для вариантов нельзя непосредственно измерить или рассчитать.

Пусть имеется группа из m экспертов ($m \geq 2$) и множество вариантов решения $\mathcal{V} = \{v_i, i = 1, \dots, n\}$. Сформулирована целевая функция принятия решения в виде критерия q или цели Π . В результате сопоставления вариантов по критерию q на основе накоп-

ленного опыта и профессиональных знаний j -й эксперт определяет начальный вектор y_j рангов вариантов в виде

$$y_j = \{y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,n}\},$$

где $y_{j,i}$ — ранг варианта v_i решения, при этом $y_{j,h} < y_{j,t}$, если вариант v_h предпочтительнее варианта v_t по критерию q . Допускается равенство рангов $y_{j,h} = y_{j,t}$, а также неприсвоение ранга $y_{j,i}$ (знак минус) для варианта v_i , который j -й эксперт считает неперспективным.

Векторы y_j , $j = 1, \dots, m$, образуют $m \times n$ -матрицу рангов

$$Y = \|y_{j,i}\|_{m \times n}, \quad y_{j,i} \in \{1, 2, \dots, n; (-)\}. \quad (5.9)$$

Требуется по значениям компонентов матрицы Y определить:

- 1) оптимальный вариант v^* или сформировать подмножество предпочтительных вариантов $\mathcal{V}_o$, содержащее оптимальное решение;
- 2) суммарные рейтинги вариантов;
- 3) степень согласованности мнений экспертов (коэффициент конкордации и его значимость).

Поскольку эксперт может не указать ранг или присвоить одинаковые ранги некоторым вариантам, необходимо привести матрицу Y (5.9) к виду, удобному для дальнейшей обработки. Для этого каждый вектор y_j , $j = \overline{1, m}$, преобразуется в вектор

$$x_j = \{x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,n}\},$$

для которого должно выполняться условие нормировки

$$\sum_{i=1}^n x_{j,i} = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (5.10)$$

При таком «правильном» ранжировании число рангов должно быть равно числу ранжируемых вариантов решения, а их сумма — сумме чисел натурального ряда.

Пусть, например, ранги $y_{j,i}$, проставленные j -м экспертом и занесенные в исходную матрицу рангов Y для $n = 6$, равны $(2, 1, 1, -, -, -)$, т. е. не удовлетворяют условию (5.10), после нормирования они имеют вид $x_j = (3; 1, 5; 1, 5; 5; 5; 5)$, т. е. выполняется условие

$$\sum_{i=1}^6 x_{j,i} = \frac{6 \cdot 7}{2} = 21.$$

В этом примере последовательность рангов y_j преобразуется в нормированный ряд x_j следующим образом. Эксперт поставил второй v_2 и третий v_3 варианты на первое место (две единицы в

ряду y_j). В нормированном ряду два лучших варианта в сумме должны давать $1 + 2 = 3$. Поэтому этим вариантам присваиваются одинаковые значения $x_{j,2} = x_{j,3} = 3/2 = 1,5$. На третье место эксперт поставил 1-й вариант, поэтому $x_{j,1} = 3$. Остальные варианты эксперт считает одинаково неперспективными, они должны стоять на 4, 5 и 6-м местах, поэтому $x_{j,4} = x_{j,5} = x_{j,6} = (4 + 5 + 6)/3 = 5$.

Степень согласованности мнений m экспертов ($m \geq 2$) при ранжировании вариантов оценивается с помощью коэффициента конкордации W_k (при $m = 2$ используются также коэффициенты ранговой корреляции по Спирмену или Кендаллу). Если все эксперты одинаково проранжировали варианты, т.е. их мнения полностью совпадают, то $W_k = 1$, если связи между рангами x_j , $j = 1, \dots, m$, нет, т.е. мнения экспертов сильно расходятся, то значение W_k близко к нулю. Таким образом, значения коэффициента W_k принадлежат интервалу $[0; 1]$.

В случае, когда компетентность экспертов не учитывается, коэффициент конкордации рассчитывается по формулам

$$W_k = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m x_{j,i} - \frac{m(n+1)}{2} \right]^2}{\frac{1}{12} m^2 n (n^2 - 1) - m \sum_{j=1}^m T_j}; \quad (5.11)$$

$$T_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m t_{j,i} (t_{j,i}^2 - 1), \quad j = 1, \dots, m,$$

где $t_{j,i}$ — число повторений рангов $x_{j,i}$ в j -м ряду.

Если компетентность экспертов учитывается введением весовых коэффициентов c_j , $j = 1, \dots, m$, то коэффициент W_k рассчитывается следующим образом:

$$W_k = \frac{12 \sum_{i=1}^n d_i^2}{\left[m^2 n (n^2 - 1) - 12 m \sum_{j=1}^m T_j \right] \left[\sum_{j=1}^m \frac{c_j}{m} \right]^2}; \quad (5.12)$$

$$d_j = \sum_{i=1}^m c_j x_{j,i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_j x_{j,i}.$$

Веса c_j могут определяться различными путями, например на основе учета квалификации, образования, стажа работы по специ-

альности и т. д. Для определения c_j можно использовать тесты или методы ранжирования другой группой экспертов.

Достоверность предположения о согласованности мнений экспертов проверяется методами проверки статистических гипотез. Для проверки гипотезы о значимости коэффициента конкордации W_k (5.11) или (5.12), т. е. что W_k существенно больше 0, может использоваться Z -критерий Фишера и критерий хи-квадрат Пирсона (или χ^2). В первом случае в качестве критической статистики используется величина

$$\hat{z} = \frac{1}{2} \ln \frac{(n+1)W_k}{1-W_k}, \quad (5.13)$$

имеющая Z -распределение с числами степеней свободы

$$v_1 = n - 1 \quad \text{и} \quad v_2 = (m - 1)v_1, \quad (5.14)$$

где n, m — число вариантов и экспертов соответственно.

Во втором случае рассматривается величина

$$\hat{\chi}^2 = m(n-1)W_k, \quad (5.15)$$

подчиняющаяся распределению Пирсона с

$$v = n - 1 \quad (5.16)$$

степенями свободы.

Значимость коэффициента конкордации W_k проверяется в следующем порядке.

1. Выбирается статический критерий (Фишера или Пирсона). При $n \geq 7$ рекомендуется использовать критерий Пирсона.

2. По формуле (5.13) или (5.15) рассчитывается оценка критической статистики ($\hat{z}$ или $\hat{\chi}^2$).

3. Задается уровень значимости 100α , %, рассчитываются числа (или число) степеней свободы v по формулам (5.14) или (5.16) и по соответствующей таблице определяется табличное значение критерия. Например, для критерия Пирсона по значениям $v = n - 1$ и 100α , %, определяется $\chi^2_T(v, \alpha)$. При экспертных оценках рекомендуется брать $\alpha = 0,01$; $0,025$ или $0,05$ (соответственно уровни значимости 1; 2,5 или 5 %).

4. Принимается решение: если $\hat{\chi}^2 \geq \chi^2_T(v, \alpha)$, то нулевая гипотеза отвергается и коэффициент конкордации W_k значим при соответствующем значении 100α %; если $\hat{\chi}^2 < \chi^2_T(v, \alpha)$, имеет место нулевая гипотеза и W_k незначим.

Для облегчения принятия решения по результатам высказываний экспертов рассчитываются результирующий (суммарный) и

средний ранг каждого варианта:

$$x_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^m x_{j,i} \quad \text{и} \quad \bar{x}_i = \frac{1}{m} x_{\Sigma i}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Для случая значимого коэффициента W_k оцениваются окончательные рейтинги вариантов R_i по формуле

$$R_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{x_{j,i}}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Качество проектируемых радиоэлектронных средств и их частей обычно оценивается большим числом показателей, относящихся к различным свойствам — целевому назначению, помехозащищенности, пропускной способности, надежности и т. д. Комплекс показателей качества может включать как количественные величины определенной размерности или безразмерные (относительные), так и качественные, например оценивающие дизайн, представляемые в баллах. При сравнении вариантов проектных решений комплекс частных показателей качества записывается в виде векторного критерия Q (5.6). В критерий Q рекомендуется включать минимальное число наиболее важных частных критериев q_i , $i = 1, \dots, k$; отобранные показатели q_i должны иметь ясный смысл и характеризовать конкретные свойства; вектор Q должен с достаточной точностью характеризовать качество проектируемого узла или системы.

Компоненты вектора Q по отношению предпочтительности их значений для проектируемых РЭС могут быть двух видов: монотонно убывающие (масса, стоимость и т. п.) и монотонно возрастающие (пропускная способность, вероятность безотказной работы и т. д.). В дальнейшем будем полагать, что все частные критерии q_i принимают положительные значения ($q_i > 0$), являются монотонно убывающими (чем меньше q_i , тем лучше), в идеальном случае $q_i \rightarrow 0$.

В общем случае многокритериальность в задачах принятия проектных решений может рассматриваться в следующих аспектах:

1) непосредственно как векторный критерий Q с k частными показателями;

2) как результаты работы отдельных экспертов по скалярному критерию q , т. е. пусть $r_{j,i}$, $j = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$, — нормированные ранги, выставленные m экспертами n вариантам, тогда для

варианта v_i можно рассматривать m -вектор показателей

$$Q_{\alpha}(v_i) = [r_{1,i}, r_{2,i}, \dots, r_{m,i}];$$

3) как результаты оценок вариантов различными методами при скалярном критерии q , в этом случае

$$Q_M(v_i) = [q_1(v_i), q_2(v_i), \dots, q_{\mu}(v_i)].$$

где $q_j(v_i)$, $j = 1, \dots, \mu$, — значения показателей варианта v_i , полученные различными методами; μ — число используемых методов;

4) как результат сравнения значений скалярного критерия $q(i, s)$ на множестве ситуаций S .

Во всех рассмотренных случаях оптимальный вариант v^* обычно определяется на основе компромисса между частными показателями.

Наибольшее развитие получили алгоритмы решения многокритериальных задач, использующие следующие методы: оптимизации по Парето; свертки векторного критерия в скалярный; выделения наиболее важного частного показателя в качестве основного и наложение ограничений на остальные показатели.

Многокритериальные задачи принятия проектного решения с использованием метода оптимизации по Парето обычно решаются в два этапа. На первом этапе формируется подмножество $\mathcal{V}^n$ Парето-оптимальных вариантов. На втором этапе применяется один из способов сведения векторного критерия Q в скалярный q , после чего используются методы для скалярных критериев.

Для задач ВПВ (5.3) второй этап зависит от соотношения между мощностями множеств $\mathcal{V}^n$ (получается в результате первого этапа) и $\mathcal{V}_0$ (задается условиями задачи). Если $|\mathcal{V}^n| = |\mathcal{V}_0|$, то второго этапа не требуется и $\mathcal{V}_0 = \mathcal{V}^n$. Если $|\mathcal{V}^n| > |\mathcal{V}_0|$, то выполняются работы второго этапа с вариантами $v \in \mathcal{V}^n$. Если же $|\mathcal{V}^n| < |\mathcal{V}_0|$, то расчеты начинаются с первого этапа для элементов $v \in \mathcal{V} \setminus \mathcal{V}^n$ с целью выделения подмножества вариантов $\mathcal{V}'_0$, для которого имеет место $|\mathcal{V}'_0| = |\mathcal{V}_0| - |\mathcal{V}^n|$.

Рассмотрим формирование подмножества Парето-оптимальных вариантов $\mathcal{V}^n$ на примере работы одного эксперта при ранжировании вариантов отдельно по всем частным критериям q_j , $j = 1, \dots, k$ (5.6), в результате такого ранжирования получается матрица рангов

$$R = \|r_{j,i}\|_{k \times n},$$

где $r_{j,i}$ — ранг i -го варианта по j -му показателю.

Так как чем меньше ранг, тем вариант лучше, то из двух вариантов v_i и v_v , ранги которых заданы столбцами матрицы R

$$\begin{pmatrix} r_{1,i} \\ r_{2,i} \\ \vdots \\ r_{k,i} \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \begin{pmatrix} r_{1,v} \\ r_{2,v} \\ \vdots \\ r_{k,v} \end{pmatrix}$$

вариант v_i считается предпочтительнее ($v_i \succ v_v$), если для всех $j = 1, \dots, k$ выполняется условие: $r_{j,i}$ меньше или равно $r_{j,v}$, причем хотя бы по одному частному критерию q_k должно выполняться строгое неравенство $r_{k,i} < r_{k,v}$.

В случае, когда по отдельным частным критериям предпочтительнее вариант v_i , а по другим — v_v , варианты v_i и v_v считаются равными или эквивалентными относительно векторного критерия Q , эквивалентность вариантов обозначается $v_i \sim v_v$.

Вариант v_i^* считается оптимальным, если он предпочтительнее по отношению к остальным $n - 1$ вариантам, и оптимальным по Парето, если для него нет предпочтительных вариантов. Если имеется несколько вариантов, для которых нет предпочтительных, то эти варианты образуют подмножество вариантов $\mathcal{V}^n$, оптимальных по Парето ($\mathcal{V}^n \subseteq \mathcal{V}$). Алгоритм формирования подмножества $\mathcal{V}^n$ следующий.

1. Сопоставляются варианты v_1 и v_2 . Если $v_1 \sim v_2$, то переходят к сравнению v_1 с v_3 .

2а. Если $v_1 \succ v_2$, то вариант v_2 исключается из дальнейшего рассмотрения и вариант v_1 попарно сопоставляется с остальными вариантами $v_3, \dots, v_n$. Все варианты v_i , для которых имеет место $v_i \prec v_1$, исключаются из дальнейшего анализа. В результате сравнений варианта v_1 с другими вариантами v_i , $i = 2, \dots, n$, первый вариант либо включается в подмножество $\mathcal{V}^n$, либо выбывает, если имеется вариант $v_i \succ v_1$. Если же имеет место $v_1 \succ v_i$, $i = 2, \dots, n$, то v_1 является оптимальным вариантом v^* .

2б. Если $v_2 \succ v_1$, то из рассмотрения исключается v_1 и выполняется попарное сравнение второго варианта (если $v_2 \sim v_1$ или $v_2 \succ v_1$) с оставшимися v_i , $i = 3, \dots, n$, по указанному в п. 2а алгоритму и т. д.

3. Выбираются оставшиеся после выбывания варианты, и для них выполняется аналогичная процедура формирования подмножества $\mathcal{V}^n$.

В задачах на максимум, когда q_j играют роль «эффективностей», вариант v_i предпочтительнее v_v ($v_i \succ v_v$), если для всех

$j = \overline{1, m}$ выполняется условие $q_{j,i} \geq q_{j,v}$, причем хотя бы по одному частному k -му критерию $q_{k,i} > q_{k,v}$.

При формировании $\mathcal{V}^n$ все частные показатели должны быть ориентированы или только на максимум (эффективность), или только на минимум (затраты, ранги и т.д.).

Для свертывания векторного критерия Q на втором этапе решения многокритериальных задач обычно используются аддитивный и мультипликативный способы.

При аддитивном способе свертывание выполняется сложением значений частных показателей с соответствующими весами. Так как обычно частные критерии имеют различную физическую природу и, соответственно, различную размерность, при образовании обобщенного критерия оперируют не с «натуральными» критериями, а с их нормированными значениями. Частные показатели нормируются делением «натурального» критерия на некоторую нормирующую величину, измеряемую в тех же единицах, что и сам критерий.

Обычно применяется три подхода к выбору нормирующего делителя. В соответствии с первым подходом в качестве нормирующего делителя принимаются некоторые директивные значения параметров. Второй подход предполагает выбор в качестве нормирующих делителей максимальных значений критериев, достигаемых в соответствующих областях. При третьем подходе в качестве нормирующих делителей выбирают разность между максимальным и минимальным значениями критерия. Выбор подхода к формированию безразмерной формы частных критериев в значительной степени носит субъективный характер и должен быть обоснован в каждом конкретном случае. Аддитивный критерий для варианта v_i рассчитывается по формуле

$$q_a(v_i) = \sum_{v=1}^k c_v \frac{q_v(v_i)}{q_v^{(0)}(v_i)},$$

где c_v — весовой коэффициент v -го частного критерия; $q_v^{(0)}(v_i)$ — v -й нормирующий делитель.

Введение весовых коэффициентов c_v должно учитывать различную значимость частных показателей при формировании аддитивного критерия. Определение весовых коэффициентов часто встречает серьезные трудности и обычно сводится к использованию формальных процедур или к применению экспертных оценок. Аддитивный критерий имеет ряд недостатков, главный из них состоит в том, что критерий q_a не вытекает из объективной роли

частных показателей и выступает как формальный математический прием, придающий задаче удобный для решения вид. Другой недостаток заключается в том, что возможна взаимная компенсация частных критериев. Это значит, что значительное уменьшение одного из критериев вплоть до нулевого значения может быть компенсировано возрастанием другого критерия. Для ослабления этого недостатка вводят ограничения на минимальные значения частных критериев и их весовых коэффициентов.

Мультипликативный способ предполагает перемножение частных критериев, т. е.

$$q_M(v_i) = \prod_{v=1}^k q_v(v_i).$$

В случае неравноценности частных показателей вводятся весовые коэффициенты c_v и мультипликативный критерий принимает вид

$$q_M(v_i) = \prod_{v=1}^m c_v q_v(v_i).$$

Достоинством мультипликативного критерия является то, что при его использовании не требуется нормировка частных показателей, а к его недостаткам можно отнести то, что этот критерий компенсирует недостаточную величину одного частного показателя избыточной величиной другого и имеет тенденцию сглаживать уровни частных критериев за счет неравнозначных первоначальных значений критериев.

В общем случае задача свертывания векторного критерия Q в скалярный q_a или q_M является сложной и не имеет однозначного решения.

При рассмотрении вариантов сложных проектов наиболее трудоемкая процедура ранжирования n альтернатив может заменяться многократным применением более простой процедуры сравнения двух вариантов между собой, т. е. применением метода экспертных оценок, основанного на парных сравнениях. Достоинства этого метода особенно проявляются при векторных критериях оптимальности Q большой размерности и большом числе вариантов n .

Пусть сравниваются два варианта v_p, v_h из множества $\mathcal{V}$ и вариант v_p по заданным критериям предпочтительнее варианта v_h . Это будем обозначать $v_p \succ v_h$. В ходе экспертизы каждый эксперт заполняет таблицу с результатами парных сравнений, которые об-

разуют $n \times n$ -матрицу

$$Z = \|z_{h,p}\|_{n \times n},$$

где

$$z_{h,p} = \begin{cases} 1, & \text{если } v_h \text{ предпочтительнее } v_p \ (v_h \succ v_p); \\ 0, & \text{если } v_p \succ v_h; \\ -, & \text{если } h = p. \end{cases}$$

Для j -го эксперта матрицу Z будем обозначать Z_j . Общий вид матрицы Z_j , характеризующей результаты парных сравнений, представлен в виде

$$\begin{matrix} & v_1 & v_2 & & v_p & & v_n \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ \\ v_h \\ v_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} - & z_{1,2;j} & z_{1,p;j} & z_{1,n;j} \\ z_{2,1;j} & - & z_{2,p;j} & z_{2,n;j} \\ & & & \\ z_{h,1;j} & z_{h,2;j} & z_{h,p;j} & z_{h,n;j} \\ z_{n,1;j} & z_{n,2;j} & z_{n,p;j} & - \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (5.17)$$

В качестве примера рассмотрим матрицу Z_j для $n = 4$:

$$Z_j = \begin{pmatrix} - & 1 & 0 & 1 \\ 0 & - & 0 & 1 \\ 1 & 1 & - & 0 \\ 0 & 0 & 1 & - \end{pmatrix}$$

Элементы этой матрицы означают, что эксперт при сравнении вариантов v_1 и v_2 отдал предпочтение первому варианту ($v_1 \succ v_2$), поэтому $z_{1,2} = 1$; при сравнении v_1 с v_3 — третьему ($v_1 \prec v_3$), поэтому $z_{1,3} = 0$; при сравнении v_1 с v_4 — первому, поэтому $z_{1,4} = 1$ и т. д.

Матрица Z_j обладает следующими свойствами:

- 1) по главной диагонали стоят знаки «минус»;
- 2) если элемент $z_{h,p} = 1$, то $z_{p,h} = 0$;
- 3) число парных сравнений вариантов равно числу сочетаний из n по 2

$$C_n^2 = n(n-1)/2,$$

поэтому матрица Z содержит C_n^2 единиц и C_n^2 нулей.

При сравнении вариантов v_h и v_p по векторному критерию необходимо учитывать число показателей, по которым v_h превосходит v_p , и важность частных показателей.

В результате работы m экспертов заполняется m матриц Z_j , $j = 1, 2, \dots, m$, парных сравнений. Обработка результатов экспертизы начинается с объединения этих матриц в одну обобщенную $(n \times n)$ -матрицу

$$\Gamma = \|g_{h,p}\|_{n \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & & v_p & & v_n & \Sigma_1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ \\ \\ v_n \\ \Sigma_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} - & g_{1,2} & & g_{1,p} & & g_{1,n} & H_1 \\ g_{2,1} & - & & g_{2,p} & & g_{2,n} & H_2 \\ & & & & & & \\ g_{h,1} & g_{h,2} & & g_{h,p} & & g_{h,n} & H_h \\ & & & & & & \\ g_{n,1} & g_{n,2} & & g_{n,p} & & - & H_n \\ P_1 & P_2 & & P_p & & P_n & \Sigma_3 \end{pmatrix} \end{matrix}, \quad (5.18)$$

элементы которой получаются суммированием соответствующих значений матриц Z_j , т. е.

$$g_{h,p} = \sum_{j=1}^m z_{h,p;j}.$$

Дополнительно матрица Γ содержит столбец Σ_1 и строку Σ_2 . Элементы $H_1, \dots, H_n$ столбца Σ_1 равны суммам элементов строк матрицы Γ , т. е.

$$H_h = \sum_{p=1}^n g_{h,p},$$

а элементы $P_1, \dots, P_n$ строки Σ_2 равны суммам элементов столбцов матрицы Γ , т. е.

$$P_p = \sum_{h=1}^n g_{h,p}.$$

Матрица Γ должна удовлетворять следующим свойствам.

1. Сумма элементов матрицы Γ

$$\Sigma_3 = \sum_{h=1}^n \sum_{p=1}^n g_{h,p} = m C_n^2 = \frac{mn(n-1)}{2}.$$

2. При полном согласии мнений экспертов в C_n^2 ячейках $g_{h,p} = m$, в остальных $g_{h,p} = 0$.

3. При минимальном согласии каждый элемент матрицы Γ содержит $g = m/2$, если m — четное, и $g = (m+1)/2$ или $g = (m-1)/2$, если m — нечетное.

4. Сумма элементов i -го столбца и i -й строки постоянна для всех i :

$$\sum_{h=1}^n g(h, i) + \sum_{p=1}^n g(i, p) = \text{const}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

или

$$H_1 + P_1 = H_2 + P_2 = \dots = H_n + P_n.$$

5. Суммы элементов векторов $\Sigma_1 = (H_1, \dots, H_n)$ и $\Sigma_2 = (P_1, \dots, P_n)$ равны:

$$\sum_{h=1}^n H_h = \sum_{p=1}^n P_p = \Sigma_3.$$

С помощью матриц (5.17) и (5.18) вычисляются средняя частота предпочтения каждого варианта каждым экспертом и средний ранг факторов, полученных от всех экспертов.

При последующей обработке матрица Γ преобразуется в матрицу, где варианты располагаются в порядке убывания значений H_h . При равенстве значений H_h на первое место ставится вариант v_h , в строке матрицы Γ которого содержится $g_{\max}$ и нет нулей, на второе место — вариант с $g_{\max}$ и нулями, на третье — вариант без $g_{\max}$ и т. д.

Согласованность мнений экспертов при парных сравнениях оценивается с помощью коэффициента согласия W_n , который рассчитывается по формулам

$$W_n = \frac{4S}{m(m-1)n(n-1)}; \quad S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{g(i,j)}^2,$$

где

$$C_{g(i,j)}^2 = \begin{cases} 0, & \text{если } g(i, j) < 2; \\ 1, & \text{если } g(i, j) = 2; \\ g(g-1)/2, & \text{если } g(i, j) > 2. \end{cases}$$

Коэффициент W_n может находиться в пределах от $W_{n \min}$ (при минимальном согласии экспертов) до 1 (полное согласие), т. е. $W_n \in [W_{n \min}; 1]$. Значение $W_{n \min}$ рассчитывается из соотношения

$$W_{n \min} = \begin{cases} \frac{m-1}{2m}, & \text{если } m \text{ нечетное;} \\ \frac{m-2}{2(m-1)}, & \text{если } m \text{ четное.} \end{cases}$$

Значимость коэффициента W_n , т. е. существенно ли он отличается от $W_{n \min}$, при больших m и n оценивается с использованием

критерия хи-квадрат. Для этого рассчитываются оценка критерия по результатам экспертизы

$$\hat{\chi}^2 = \frac{4}{m-2} \left(S - \frac{1}{2} C_n^2 C_m^2 \frac{m-3}{m-2} \right)$$

и число степеней свободы

$$v = C_n^2 \frac{m(m-1)}{(m-2)^2}.$$

Значение $\hat{\chi}^2$ сравнивается с табличным $\chi^2(v, \alpha)$. Если $\hat{\chi}^2 \geq \chi^2(v, \alpha)$, то гипотеза о значимости W_n (согласованности мнений экспертов) принимается, в противном случае ($\hat{\chi}^2 < \chi^2(v, \alpha)$) отвергается.

В общем случае методика проведения экспертизы для решения задач принятия проектных решений включает следующие этапы:

- 1) формирование множества альтернативных вариантов $V = \{v_1, \dots, v_n\}$;
- 2) определение задания для экспертизы, т. е. что требуется получить v^* , V_o или ранги r ;
- 3) задание целевой функции;
- 4) формирование экспертной группы;
- 5) выбор метода проведения экспертизы;
- 6) работа группы экспертов;
- 7) математическая обработка результатов экспертизы;
- 8) принятие решения по результатам экспертизы;
- 9) выделение вариантов для окончательного принятия решения;
- 10) формирование множества ситуаций;
- 11) определение показателей эффективности вариантов в различных ситуациях;
- 12) расчет оптимального варианта методами принятия решений в условиях неопределенности.

5.4. Методы принятия решений в условиях частичной неопределенности

На начальных этапах проектирования используются различные методы принятия решений в условиях неопределенности. Принимаемое решение часто зависит от того, какой метод применялся для выработки решения, вместе с тем во многих случаях далеко не очевидно, какой метод следует применять в той или иной ситуации.

Если вероятности возможных ситуаций, в которых будут реализовываться результаты проекта, неизвестны и исходными данными для принятия решения служит матрица эффективностей $E = \|e_{ij}\|_{n \times k}$, где e_{ij} — эффективность варианта v_i , $i = \overline{1, n}$, в ситуации s_j , $j = \overline{1, k}$, то используют широко распространенные методы равной вероятности, Гурвица и Шанявского. Эти методы отличаются простотой, их удобно использовать, если допускается риск от неправильно выбранного варианта.

В методе равной вероятности оптимальным считается вариант v^* , для которого среднее значение эффективности по возможным ситуациям максимально, т. е.

$$v^* = \arg \max_{\bar{e}(v_i)} \left\{ \bar{e}(v_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k e_{ij}, \quad i = \overline{1, n} \right\}$$

Таким образом, в качестве критерия оптимальности варианта здесь выступает

$$q_{пв}(v_i) = \bar{e}(v_i).$$

Если вместо матрицы эффективности E задается матрица затрат (потерь) $G = \|g_{ij}\|_{n, k}$, то оптимальным считается вариант, для которого минимален критерий

$$q_{пв}(v_i) = g(v_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k g_{ij}.$$

Задачи с матрицей E называют задачами на максимум, а с матрицей G — на минимум.

В методе Гурвица в задаче на максимум роль критерия $q_r(v_i)$ играет взвешенное значение минимальной и максимальной эффективности варианта, т. е.

$$q_r(v_i) = ce_i^{\min} + (1 - c)e_i^{\max}, \quad c \in (0; 1);$$

$$e_i^{\min} = \min_j \{e_{ij}, j = \overline{1, k}\}; \quad e_i^{\max} = \max_j \{e_{ij}, j = \overline{1, k}\}.$$

где c — весовой коэффициент.

Для оптимального варианта имеет место

$$v^* = \arg \max_i \{q_r(v_i), i = \overline{1, n}\}.$$

Если решается задача на минимум, то

$$v^* = \arg \min_i \{q_r(v_i), i = \overline{1, n}\}; \quad q_r(v_i) = cg_i^{\min} + (1 - c)g_i^{\max};$$

$$g_i^{\min(\max)} = \min(\max)_j \{g_{ij}, j = \overline{1, k}\}.$$

Матрица эффективности и значения критериев

Вариант	Ситуации			Значение критериев		
	s_1	s_2	s_3	$q_{pв}$	$q_{г}$	$q_{ш}$
v_1	8	6	2	$v_1^* = 5,33$	5	3,67
v_2	7	5	3	5	5	4
v_3	6,5	4	4,5	5	$v_3^* = 5,5$	$v_3^* = 4,5$
v_4	7	2	4,5	4,5	4,5	3,25

Метод Шаньявского использует результаты, получаемые методом равной вероятности, с некоторой коррекцией. В задаче на максимум варианты сравниваются по критерию

$$q_{ш}(v_i) = cq_{pв}(v_i) + (1 - c)e_i^{mi}$$

$$v^* = \arg \max_i \{q_{ш}(v_i), i = \overline{1, n}\},$$

в задаче на минимум

$$q_{ш}(v_i) = cq_{pв}(v_i) + (1 - c)g_i^{\max};$$

$$v^* = \arg \min_i \{q_{ш}(v_i), i = \overline{1, n}\}.$$

Критерий $q_{ш}(v_i)$ в отличие от критериев $q_{pв}(v_i)$ и $q_{г}(v_i)$ следует использовать в случаях, когда при выборе оптимального варианта требуется больше осторожности. Вместе с тем все эти методы позволяют получить эффект, если решение по однотипной проблеме принимается часто, т. е. выигрыш будет достигнут в среднем при многократном решении задач.

В качестве примера рассмотрим использование этих методов для матрицы эффективности, представленной слева в табл. 5.3. Справа в этой таблице содержатся рассчитанные значения критериев $q_{pв}$, $q_{г}$ и $q_{ш}$ при $c = 0,5$. Как видно из таблицы, по критерию $q_{pв}$ следует отдать предпочтение варианту v_1 , по критериям $q_{г}$ и $q_{ш}$ — v_3 .

В случае, когда большую роль играют последствия ошибочных решений (альтернативных потерь), применяется метод Сэвиджа. Матрица R последствий ошибочных решений, когда q соответствует эффективности (задача на максимум), строится следующим образом:

1) для каждого столбца матрицы $\|e_{ij}\|_{n \times k}$ находятся максимальные элементы

$$e_{i1}^{\max}, e_{j2}^{\max}, \dots, e_{vk}^{\max}, \quad (5.19)$$

2) из элементов (5.19) вычитаются другие элементы соответствующих столбцов, в результате получаем элементы матрицы R

$$r_{11} = e_{i1}^{\max} - e_{11}; r_{21} = e_{i1}^{\max} - e_{21} \text{ и т. д.}$$

В качестве показателей q_c вариантов v_i рассматриваются максимальные значения в строках матрицы R , предпочтительнее вариант с минимальным значением показателя, т. е.

$$v^* = \arg \min_i \{q_c(v_i), i = \overline{1, n}\}; \quad q_c(v_i) = \max_j \{r_{ij}\}. \quad (5.20)$$

Для данных табл. 5.3 максимальные элементы в столбцах соответственно равны $e_1^{\max} = 8$; $e_2^{\max} = 6$; $e_3^{\max} = 4,5$.

Матрица R последствий ошибочных решений приведена в табл. 5.4. В соответствии с (5.20) оптимальным по методу Сэвиджа является вариант v_2 .

Если рассматриваемая проблема имеет большое значение, цена риска принять неправильное решение исключительно велика, решение реализуется однократно, необходимо учитывать возможные ситуации, вероятности которых неизвестны, при этом значения матрицы эффективности E (или затрат G) достоверны, то обычно применяются методы теории игр. В случае решения задачи на максимум с использованием матрицы E применяется максиминный критерий, означающий, что предпочтение отдается варианту, для которого наименьшее значение $e_{i \min} = \min_j \{e_{ij}\}$ максимальное, т. е.

$$v^* = \arg \max_i \{\min_j \{e_{ij}\}\}. \quad (5.21)$$

Для матрицы эффективностей E , приведенной в табл. 5.3, $e_{1 \min} = 2$, $e_{2 \min} = 3$, $e_{3 \min} = 4$, $e_{4 \min} = 2$. В соответствии с соотношением (5.21) $v^* = v_3$, для этого варианта гарантирован результат с эффективностью не менее 4 при любых возможных ситуациях.

Для задач на минимум с матрицей затрат G используется минимаксный критерий

$$v^* = \arg \min_j \{\max_i \{g_{ij}\}\}.$$

В этом случае в каждой строке находятся максимальные значения затрат $g_{i \max} = \max_j \{g_{ij}\}$ и выбирается вариант v^* с минимальным значением $g_{i \max}$. В предположении, что в табл. 5.3 содержатся зна-

Т а б л и ц а 5.4
Матрица последствий
ошибочных решений

Вариант	Ситуация			q_c
	s_1	s_2	s_3	
v_1	0	0	2,5	2,5
v_2	1	1	1,5	$v_2^* = 1,5$
v_3	1,5	2	0	2
v_4	1	4	0	4

чения матрицы G , то $g_{1\max} = 8$; $g_{2\max} = 7$; $g_{3\max} = 6,5$; $g_{4\max} = 7$ и $v^* = v_3$.

Заметим, что в задачах на максимум может использоваться критерий в виде произведения элементов строк матрицы E :

$$q_{\text{пр}}(v_i) = \prod_{j=1}^k e_{ij}$$

и определяется вариант

$$v^* = \arg \max_i \{q_{\text{пр}}(v_i)\}.$$

Этот критерий целесообразно использовать в случаях, когда необходимо считаться со всеми ситуациями и допускается некоторый риск. Если отдельные элементы матрицы эффективностей $\|e_{ij}\|_{n \times k}$ имеют отрицательные значения, то критерий можно использовать, перейдя от исходной к новой матрице $\|e_{ij} + a\|_{n \times k}$, $a > |\min_{i,j} e_{ij}|$.

В случаях, когда вероятности $p(s_j)$, $j = 1, \dots, k$, ситуаций известны, широкое распространение получил метод Байеса – Лапласа. В задачах на максимум варианты сравниваются по усредненным с учетом вероятностей значениям критерия, т. е.

$$q_{\text{БЛ}}(v_i) = \sum_{j=1}^k e_{ij}p(s_j),$$

и предпочтение отдается варианту

$$v^* = \arg \max_i \{q_{\text{БЛ}}(v_i)\}.$$

В задачах на минимум

$$v^* = \arg \min_i \{q_{\text{БЛ}}(v_i)\}, \quad q_{\text{БЛ}}(v_i) = \sum_{j=1}^k g_{ij}p(s_j).$$

Применение метода Байеса – Лапласа целесообразно при выполнении следующих условий:

- 1) вероятности ситуаций $p(s_j)$, $j = 1, \dots, k$, известны и их можно считать постоянными на период реализации проекта;
- 2) решение по проектированию подобных систем принимается и реализуется часто;
- 3) риск от неправильно принятого решения не приводит к серьезным последствиям.

Например, пусть матрица E в табл. 5.3 дополнена следующими вероятностями ситуаций:

$$p(s_1) = 0,6; \quad p(s_2) = 0,1; \quad p(s_3) = 0,3.$$

тогда

$$q_{БЛ}(v_1) = 6; \quad q_{БЛ}(v_2) = 5,6; \quad q_{БЛ}(v_a) = 5,65; \quad q_{БЛ}(v_b) = 5,75; \quad v^* = v_1.$$

Метод Байеса – Лапласа часто используется в сочетании с другими методами. Например, в методе Ходжа – Лемана критерий определяется в виде взвешенного среднего между оценками, получаемыми методами Байеса – Лапласа и максимина (в задаче на максимум), т. е.

$$q_{x.л}(v_i) = c \sum_{j=1}^k q_{ij}p(s_j) + (1 - c) \min_j \{e_{ij}(v)\}$$

и

$$v^* = \arg \max_i \left\{ c \sum_{j=1}^k e_{ij}p(s_j) - (1 - c) \min_j \{e_{ij}(v)\} \right\}$$

Данный метод применяется в случаях, когда имеются некоторые предположения о вероятностях ситуаций $p(s_j)$, $j = 1, \dots, k$, принятое решение может реализоваться много раз и допускается некоторый риск.

Если рассматриваются значения потерь (затрат) r_{ij} в различных ситуациях и $r_{ij} < 0$, то можно использовать критерий Гермейера. Согласно этому критерию для каждой строки находится наименьшее значение в виде

$$q_{\text{гер}}(v_i) = \min_j \{r_{ij}p(s_j)\}$$

и затем определяется вариант v^* с максимальным значением $q_{\text{гер}}(v_i)$, т. е.

$$v^* = \arg \max_i \{q_{\text{гер}}(v_i)\}.$$

Данный критерий можно использовать, если некоторые r_{ij} положительны. В этом случае подбирают некоторое число $a > 0$ и матрицу $\|r_{ij}\|_{n \times k}$ преобразуют в матрицу $\|r_{ij} - a\|_{n \times k}$, в которой все элементы отрицательны. Метод используется, когда вероятности ситуаций известны приближенно и с ними надо считаться, решение реализуется один (или малое число) раз и допускается некоторый риск.

Достаточно широкое применение для выбора оптимального варианта находят методы, основанные на количественных показателях числовой шкалы предпочтений. Одним из них является метод анализа иерархий, или иерархического анализа АНП (Analytic Hierarchy Process) [31, 38].



Рис. 5.2. Иерархическая структура задачи

Рассмотрим этот метод на примере задачи выбора предприятия — поставщика радиоэлементов. Пусть имеется четыре альтернативных варианта поставщика v_i , $i = \overline{1, 4}$, они оцениваются показателями трех категорий: качество q_k , цена q_u и сервис q_c . Данная задача характеризуется иерархией, схема которой представлена на рис. 5.2.

Для установления предпочтения вводится следующая шкала оценок:

Словесное выражение предпочтений	Оценка в баллах
Отсутствие предпочтений..	1
Умеренное предпочтение..	2—3
Среднее предпочтение..	4—5
Сильное предпочтение..	6—7
Очень сильное предпочтение.	9

Используя эти оценки, заполняется исходная матрица попарного сравнения критериев. Пусть качество несколько (средне) предпочтительнее сервиса, а цена умеренно предпочтительнее сервиса. Эти предпочтения отражены матрицей $A = \|a_{ij}\|_{3 \times 3}$ и представлены в табл. 5.5.

По данным табл. 5.5 вычисляется скорректированная матрица $B = \|b_{ij}\|_{3 \times 3}$ с весовыми коэффициентами c_i (табл. 5.6). Элементы b_{ij} матрицы B рассчитываются по формуле

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^3 a_{ij}},$$

а весовые коэффициенты — по формуле

$$c_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 b_{ij}.$$

В нашем примере весовые коэффициенты для качества, цены и сервиса соответственно равны 0,557; 0,320 и 0,123, т. е. качество оценивается важнее цены примерно в 1,7 раза и в 4,5 раза важнее сервиса.

Т а б л и ц а 5.5

Матрица попарного сравнения критериев A

Критерий	Качество	Цена	Сервис
Качество	$a_{11} = 1$	$a_{12} = 2$	$a_{13} = 4$
Цена	$a_{21} = 1/2$	$a_{22} = 1$	$a_{23} = 3$
Сервис	$a_{31} = 1/4$	$a_{32} = 1/3$	$a_{33} = 1$
Сумма	$\sum a_{i1} = 7/4$	$\sum a_{i2} = 10/3$	$\sum a_{i3} = 8$

Т а б л и ц а 5.6

Скорректированная матрица B

Критерий	Качество	Цена	Сервис	Весовой коэффициент c_i
Качество	4/7	6/10	4/8	0,557
Цена	2/7	3/10	3/8	0,320
Сервис	1/7	1/10	1/8	0,123
		Сумма		1,000

Т а б л и ц а 5.7

Матрица сравнения вариантов по качеству (q_k)

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4
v_1	1	5	6	1/3
v_2	1/5	1	2	1/6
v_3	1/6	1/2	1	1/8
v_4	3	6	8	1
Сумма	131/30	25/2	17	39/24

Т а б л и ц а 5.8

Скорректированная матрица сравнения вариантов по качеству

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4	Весовой коэффициент d_{ki}
v_1	30/131	2/5	6/17	8/39	0,297
v_2	6/131	2/25	2/17	4/39	0,087
v_3	5/131	1/25	1/17	3/39	0,053
v_4	90/131	12/25	8/17	24/39	0,563
			Сумма		1,000

Далее аналогичным образом по каждому критерию выполняется попарное сопоставление вариантов и вычисляются соответствующие весовые коэффициенты. Пусть результаты сравнения вариантов по качеству соответствуют приведенным в табл. 5.7 и 5.8, по цене — в табл. 5.9 и 5.10, по сервису — в табл. 5.11 и 5.12.

С помощью весовых коэффициентов c_i , d_{ki} , d_{ci} , d_{ci} рассчитываются весовые коэффициенты R_i вариантов по формуле

$$R_i = C_1 d_{ki} + C_2 d_{ci} + C_3 d_{ci}, \quad i = \overline{1, 4}.$$

Т а б л и ц а 5.9

Матрица сравнения вариантов по цене (q_c)

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4
v_1	1	1/3	5	8
v_2	3	1	7	9
v_3	1/5	1/7	1	2
v_4	1/8	1/9	1/2	1
Сумма	173/40	100/63	27/2	20

Т а б л и ц а 5.10

Скорректированная матрица сравнения вариантов по цене

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4	Весовой коэффициент d_{ci}
v_1	40/173	21/100	10/27	8/20	0,303
v_2	120/173	63/100	14/27	9/20	0,573
v_3	8/173	9/100	2/27	2/20	0,078
v_4	5/173	7/100	1/27	1/20	0,046
Сумма					1,000

Т а б л и ц а 5.11

Матрица сравнения вариантов по сервису (q_c)

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4
v_1	1	5	4	8
v_2	1/5	1	1/2	4
v_3	1/4	2	1	5
v_4	1/8	1/4	1/5	1
Сумма	63/40	33/4	57/10	18

Т а б л и ц а 5.12

Скорректированная матрица сравнения вариантов по сервису

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4	Весовой коэффициент d_{ci}
v_1	40/63	20/33	40/57	8/18	0,597
v_2	8/63	4/33	5/57	4/18	0,140
v_3	10/63	8/33	10/57	5/18	0,213
v_4	5/63	1/33	2/57	1/18	0,050
Сумма					1,000

Результаты расчетов коэффициентов R_i , являющихся рейтингами поставщиков, приведены в табл. 5.13. Из сопоставления значений R_i видно, что наиболее предпочтительными поставщиками радиоэлементов являются варианты v_1 и v_4 .

Достоинством метода АНР является то, что он наряду с объективными данными (цена, качество и т. п.) может использовать неопределенную и субъективную информацию, применять опыт, проницательность, интуицию экспертов и консультантов.

Т а б л и ц а 5.13

Результаты расчета рейтингов

Вариант	Качество	Цена	Сервис	Весовой коэффициент R_i
v_1	$0,557 \cdot 0,297 + 0,320 \cdot 0,303 + 0,123 \cdot 0,597$			0,336
v_2	$0,557 \cdot 0,087 + 0,320 \cdot 0,573 + 0,123 \cdot 0,140$			0,249
v_3	$0,557 \cdot 0,053 + 0,320 \cdot 0,078 + 0,123 \cdot 0,213$			0,081
v_4	$0,557 \cdot 0,563 + 0,320 \cdot 0,046 + 0,123 \cdot 0,050$			0,334
	Сумма			1,000

Т а б л и ц а 5.14

Рекомендации по применению различных групп методов

Важность проблемы	Вероятности ситуаций $p(s)$	Повторяемость задач	
		однократные	многократные
Высокая	Известны	ЭОПС, ММ, Ш	ЭОПС, ВЛ, Ш
	Неизвестны	ЭОПС, ММ, Ш	ЭОПС, Ш, ММ
Средняя	Известны	ЭОПС, ВЛ, ММ, С	ЭОР, ВЛ, Г
	Неизвестны	ЭОПС, С, ММ, Ш	ЭОР, РВ, Г, Ш
Низкая	Известны	ЭОР, ВЛ, ММ, С	ЭОР, ВЛ, Г
	Неизвестны	ЭОР, Ш, РВ, Г, С	ЭОР, РВ, Г

В зависимости от важности исследуемой проблемы, повторяемости решения задач, наличия информации о вероятностях ситуаций в табл. 5.14 приведены рекомендации по применению различных методов: ЭОПС — экспертные оценки (метод парных сравнений); ЭОР — экспертные оценки (метод ранжирования вариантов); ММ — теория игр (метод максимина или минимакса); ВЛ — метод Байеса — Лапласа; РВ — метод равной вероятности; Г — метод Гурвица; Ш — метод Шаньявского; С — метод Сэвиджа.

Для обработки статистических данных также используется многочисленная группа методов, в частности регрессионный анализ (РА), корреляционный анализ (КА), дисперсионный анализ (ДА), методы диаграмм рассеяния, проверки статистических гипотез (ПСГ) и др. Каждый из этих методов имеет свои разновидности. Например, в РА выделяют линейный и нелинейный РА, одномерный и многомерный РА; ДА подразделяется на однофакторный, двухфакторный, трехфакторный и т.д.

Каждый метод эффективен для решения определенной группы задач. Так, при анализе существенности влияния факторов на выходной показатель при большом числе факторов и значительном изменении Q удобно использовать метод диаграмм рассеяния, если же число факторов невелико и колебания Q незначительны, то эффективнее дисперсионный анализ.

При решении идентификации моделей важное значение имеет точность определения значений входных переменных.

Если ошибками в их определении можно пренебречь, то целесообразно использовать методы РА; если входные переменные рассматриваются как случайные величины, применяют методы КА.

Методы ПСГ используются в различных задачах, связанных с анализом случайных величин (идентификация закона распределения случайной величины, проверка существенности различий между параметрами распределения), построением доверительных интервалов, оценкой степени согласованности мнений экспертов и др.

Во многих случаях на практике в ходе решения задачи проектирования поступает дополнительная информация, которую следует использовать для коррекции получаемых результатов. Для этого целесообразно использовать методы, использующие итерационные процедуры пересчета получаемых решений.

5.5. Методы, позволяющие учитывать дополнительную информацию

Пусть рассматривается задача выбора наиболее целесообразного варианта из множества альтернатив. При этом предварительный анализ на основе имеющейся информации показал, что достаточных оснований для выделения одного из вариантов в качестве оптимального нет. Это может быть связано с несогласованностью мнений экспертов (коэффициент конкордации низок) или с примерно одинаковыми значениями показателей эффективности вариантов при низкой достоверности исходных данных. В этих случаях целесообразно собрать дополнительные сведения и использовать методы, которые позволяют корректировать результаты решения задачи с учетом новой поступающей информации (свидетельств). К таким методам относятся методы байесовского подхода, Шортлифа – Бьюкенена, Демпстера – Шафера и др. Эти методы содержат итерационные процедуры пересчета показателей предпочтительности вариантов проектного решения на основе дополнительных сведений, при этом учитывается их достоверность.

Рассмотрим применение байесовского подхода на примере проведения последовательности экспертиз. Пусть результаты работы группы экспертов показали несогласованность их мнений и среди вариантов $v \in V$ нет выделяющегося «лидера». Будем привлекать дополнительных экспертов и подсчитывать для каждой альтерна-

тивы среднюю апостериорную вероятность того, что этот вариант является предпочтительным. Такую процедуру следует продолжать до тех пор, пока средняя апостериорная вероятность одного из проектов v_a множества $\mathcal{V}$ не будет существенно выше, чем для альтернативных проектов. При соблюдении некоторых условий на возможные исходы последующих экспертиз данный проект v_a считается оптимальным.

Результат работы каждого дополнительно привлекаемого эксперта рассматривается как исход проведенного опыта, и апостериорная вероятность вычисляется по формуле Байеса

$$P(H_i | A_j) = \frac{P(A_j | H_i)P(H_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_j | H_i)P(H_i)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5.22)$$

где H_i — предположение (гипотеза) о том, что вариант v_i является оптимальным; A_j — результат экспертизы (событие) оптимальности варианта v_j ; n — число рассматриваемых вариантов (мощность множества $\mathcal{V}$); $P(H_i)$, $P(H_i | A_j)$ — априорная и апостериорная вероятности гипотезы H_i соответственно; $P(A_j | H_i)$ — вероятность события A_j , если имеет место гипотеза H_i (правдоподобие).

Будем полагать, что событие A_j произошло, если вариант v_j очередной эксперт расположил на 1-е место при $n = 2$ или 3 и на 1-е или 2-е место при $n > 3$. Если произошло противоположное событие $\bar{A}_j$, то апостериорная вероятность $P(H_i | \bar{A}_j)$ рассчитывается по формуле, аналогичной (5.22), т. е.

$$P(H_i | \bar{A}_j) = \frac{P(\bar{A}_j | H_i)P(H_i)}{\sum_{i=1}^n P(\bar{A}_j | H_i)P(H_i)}, \quad (5.23)$$

где $P(H_i | \bar{A}_j)$ — апостериорная вероятность гипотезы H_i при событии $\bar{A}_j$.

По результатам работы очередного k -го эксперта рассчитываются усредненные апостериорные вероятности по формуле

$$\bar{P}_k(H_i | A) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P(H_i^k | \tilde{A}_j), \quad (5.24)$$

$$i, j = \overline{1, n}, \quad A = \{\tilde{A}_j, j = \overline{1, n}\},$$

где $\tilde{A}_j$ — событие, связанное с проверкой гипотезы H_j^k , т. е. того, что k -й эксперт вариант v_j поставит на первые места; для одной части слагаемых суммы имеет место A_j , для другой — $\bar{A}_j$.

Вероятности $P(H_i)$, $P(H_i | A_j)$, $P(H_i | \bar{A}_j)$, $\bar{P}_k(H_i | \mathcal{A})$, естественно, удовлетворяют условию полноты группы событий, т. е.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P(H_i) &= 1, \quad \sum_{i=1}^n P(H_i | A_j) = 1; \\ \sum_{i=1}^n P(H_i | \bar{A}_j) &= 1, \quad \sum_{i=1}^n \bar{P}_k(H_i | \mathcal{A}) = 1; \\ P(A_j | H_i) - P(\bar{A}_j | H_i) &= 1, \quad i, j = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

В качестве оптимального варианта v^* после k -й экспертизы берется тот, для которого вероятность, рассчитанная по формуле (5.24), максимальна и выполняется условие, что некоторое наперед заданное число m последующих экспертиз $\mathcal{A} = \{A_i, i = k + 1, \dots, k + m\}$ не изменит соотношения

$$\bar{P}_{k+m}(H(v^*) | \mathcal{A}) = \max_{v_i \in \mathcal{V}} \{\bar{P}_{k+m}(H(v_i) | \mathcal{A})\}, \quad (5.25)$$

где $H(v^*)$ — гипотеза об оптимальности варианта v^* , $H(v_i) = H_i$.

При использовании байесовского подхода для решения подобных задач важную роль играет формализация правила «остановки» в процессе проведения экспертиз. С одной стороны, своевременное прекращение итераций экономит средства, затрачиваемые на проведение экспертиз. С другой стороны, необходима уверенность, что дальнейшее привлечение экспертов не приведет к кардинальному изменению усредненной апостериорной вероятности и принятию другого варианта для реализации.

Наиболее естественно решение об «остановке» принимать по двум показателям: числу m дополнительных экспертов, высказывания которых могут изменить выбор оптимального варианта, и вероятности P_m того, что результаты высказываний этих экспертов приведут к изменению варианта, т. е. гипотезы, для которой усредненная апостериорная вероятность максимальна.

Показатели m и P_m определяются при следующих допущениях:

- в множестве $\mathcal{V}$ можно выделить два «лидирующих» варианта v_a и v_b ;
- проведена обработка мнений k экспертов, при этом варианту v_a отдавалось предпочтение (исход A) k_a раз ($k_a \leq k$) и варианту v_b (исход B) — k_b раз, $k_b < k_a$, т. е. по результатам k итераций вариант v_a считается предпочтительным (вероятность $\bar{P}_k(H(v_a) | \mathcal{A})$ — максимальна);

- в качестве вероятностей исходов A и B принимаются оценки

$$P_a = \frac{k_a}{k}; \quad P_b = \frac{k_b}{k}, \quad (5.26)$$

причем вероятность $P_a > 0,5$;

- исходы A и B при последующих высказываниях экспертов являются независимыми и совместимыми;
- очередность исходов в m экспертизах не влияет на конечный результат.

При данных допущениях, если выполняются условия

$$\bar{P}_k(H(v_a) | \mathcal{A}) > \bar{P}_k(H(v_b) | \mathcal{A}), \quad k_a > k_b,$$

соотношение

$$\bar{P}_{k-m}(H(v_a) | \mathcal{A}) < \bar{P}_{k-m}(H(v_b) | \mathcal{A}) \quad (5.27)$$

становится возможным при

$$m \geq k_a - k_b - 1. \quad (5.28)$$

Для определения вероятности $P_m(b)$, характеризующей возможность неравенства (5.27), используется комбинация моделей Бернулли для повторяющихся испытаний. Если имеет место $\bar{P}_k(H(v_a) | \mathcal{A}) > \bar{P}_k(H(v_b) | \mathcal{A})$, $k_a > k_b$ и $m \geq 2$, то вероятность выполнения неравенства (5.27) при минимальном значении m определяется по формуле

$$P_m(b) = (1 - P_a)^m P_b^m \quad (5.29)$$

Равенство (5.29) означает, что все m привлекаемых дополнительно экспертов выскажут отрицательно относительно варианта v_a (исходы A) и положительно относительно v_b (исходы B). Формула (5.29) непосредственно следует из распределения вероятностей возможных сложных событий при m испытаниях, в которых события A и B могут принимать по два исхода с разными вероятностями. Такое распределение при использовании моделей Бернулли для событий A и B имеет следующий вид:

$$P_m(b) = \sum_{v=0}^m C_m^v P_a^v (1 - P_a)^{m-v} \sum_{v=0}^m C_m^v P_b^v (1 - P_b)^v \quad (5.30)$$

где $C_m^v = \frac{m!}{v!(m-v)!}$; $C_m^m = 1$; $C_m^0 = 1$. Вероятности P_a, P_b (5.26) необходимо корректировать после каждой итерации.

Т а б л и ц а 5.15

Результаты работы эксперта 1

Вариант (проект)	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
Ранг эксперта 1	1	3	2	3	3	1	3
Событие	A_1	$\bar{A}_2$	A_3	$\bar{A}_4$	$\bar{A}_5$	A_6	$\bar{A}_7$

В качестве численного примера использования байесовского подхода рассмотрим следующую задачу.

Пусть из множества проектов $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_7\}$ предварительной экспертизой выделено подмножество предпочтительных $\mathcal{V}'' = \{v_5, v_7\}$ проектов. Требуется, последовательно привлекая дополнительных экспертов, определить один проект v^* для финансирования, имеющий максимальную усредненную апостериорную вероятность и удовлетворяющий условию (5.27) при $m = 2$. Зададим следующие начальные (априорные) вероятности гипотез:

$$P(H_5^0) = P(H_7^0) = 0,25; \quad P(H_i^0) = 0,1, \quad i = \overline{1, 4; 6}.$$

Пусть событие $A_{(5)}$ заключается в том, что очередной эксперт поставил рассматриваемый проект v_5 на 1-е или 2-е место и

$$P(A_5 | H_5^0) = 0,8, \quad P(A_5 | H_i^0, i \neq 5) = 0,6.$$

Результаты работы очередного эксперта (эксперт 1) приведены в табл. 5.15. Из таблицы видно, что эксперт 1 поставил вариант v_5 на 3-е место, т. е. произошло событие $\bar{A}_5$, противоположное событию A_5 , и $P(\bar{A}_5 | H_5) = 1 - P(A_5 | H_5) = 0,2$.

Апостериорная вероятность гипотезы H_5^1 вычисляется по формуле (5.23):

$$P(H_5^1 | \bar{A}_5) = \frac{P(\bar{A}_5 | H_5)P(H_5^0)}{\sum_{i=1}^7 P(\bar{A}_5 | H_i)P(H_i^0)} \approx 0,143.$$

Верхний индекс 1 в $P(H_5^1 | \bar{A}_5)$ указывает на результат, полученный после высказываний экспертом 1 (результат первой итерации при использовании формулы Байеса).

Апостериорные вероятности для других гипотез соответственно равны

$$P(H_7^1 | \bar{A}_5) = \frac{P(\bar{A}_5 | H_7)P(H_7^0)}{\sum_{i=1}^7 P(\bar{A}_5 | H_i)P(H_i^0)} \approx 0,286;$$

$$P(H_i^1 | \bar{A}_5) = \frac{P(\bar{A}_5 | H_i)P(H_i^0)}{\sum_{i=1}^7 P(\bar{A}_5 | H_i)P(H_i^0)} \approx 0,114, \quad i = 1, 2, 3, 4, 6.$$

Предположим, что событие A_7 характеризует оптимальность варианта v_7 . В нашем случае имеет место $\bar{A}_7$ (см. табл. 5.15), и при правдоподобиях

$$P(A_7 | H_5) = 0,8, \quad P(A_7 | H_i, i \neq 7) = 0,6$$

апостериорные вероятности равны

$$P(H_7 | \bar{A}_7) = \frac{P(\bar{A}_7 | H_7)P(H_7^0)}{\sum_{i=1}^7 P(\bar{A}_7 | H_i)P(H_i^0)} \approx 0,143;$$

$$P(H_5 | \bar{A}_7) \approx 0,286, P(H_i | \bar{A}_7) \approx 0,114, \quad i = 1, 2, 3, 4, 6.$$

В целях большей достоверности результатов следует рассмотреть и другие гипотезы об оптимальности вариантов. Рассмотрим их схематично.

Событие A_1 характеризует оптимальность варианта v_1 , и при $P(A_1 | H_1) = 0,8, P(A_1 | H_i) = 0,6, i \neq 1$,

$$P(H_1^1 | A_1) = \frac{P(A_1 | H_1)P(H_1^0)}{\sum_{i=1}^7 P(A_1 | H_i)P(H_i^0)} \approx 0,129;$$

$$P(H_5^1 | A_1) = P(H_7^1 | A_1) = 0,242;$$

$$P(H_2^1 | A_1) = P(H_3^1 | A_1) = P(H_4^1 | A_1) = P(H_6^1 | A_1) \approx 0,097.$$

Аналогично выполняются расчеты для событий $A_j, j = 2, 3, 4$. Результаты расчетов представлены в табл. 5.16.

Т а б л и ц а 5.16

Вероятности гипотез по результатам работы эксперта 1

Вероятность	Гипотезы						
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7
$P(H_i^0)$	0,100	0,100	0,100	0,100	0,250	0,100	0,250
$P(H_i^1 A_1)$	0,129	0,097	0,097	0,097	0,242	0,097	0,242
$P(H_i^1 \bar{A}_2)$	0,105	0,053	0,105	0,105	0,263	0,105	0,263
$P(H_i^1 A_3)$	0,097	0,097	0,129	0,097	0,242	0,097	0,242
$P(H_i^1 \bar{A}_4)$	0,105	0,105	0,105	0,053	0,263	0,105	0,263
$P(H_i^1 \bar{A}_5)$	0,114	0,114	0,114	0,114	0,143	0,114	0,286
$P(H_i^1 A_6)$	0,097	0,097	0,097	0,097	0,242	0,129	0,242
$P(H_i^1 \bar{A}_7)$	0,114	0,114	0,114	0,114	0,286	0,114	0,143
$\bar{P}_i(H_i A)$	0,109	0,097	0,109	0,097	0,240	0,109	0,240

Результаты работы эксперта 2

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
Ранг эксперта 2	3	3	4	1	1	5	2
Событие	$\bar{A}_1$	$\bar{A}_2$	$\bar{A}_3$	A_4	A_5	$\bar{A}_6$	A_7

В последней строке таблицы приведены усредненные апостериорные вероятности, рассчитанные по формуле

$$\bar{P}_1(H_i | A) = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 P(H_i^1 | A_i), \quad A = \{A_i, \quad i = \overline{1, 7}\}.$$

Сравнение этих вероятностей с априорными вероятностями гипотез $P_0(H_i)$ показывает, что средние апостериорные вероятности изменились незначительно, причем вероятности гипотез об оптимальности v_5 и v_7 уменьшились и возросли вероятности для вариантов v_1, v_3, v_6 . Таким образом, высказываний эксперта на первой итерации оказалось недостаточно для принятия решения.

Результаты работы эксперта 2 (на второй итерации) представлены в табл. 5.17

Используя в качестве априорных вероятностей результаты предыдущего этапа и принятые правдоподобия, для события A_5 (вариант v_5 имеет ранг, равный 1) получаем:

$$P(H_5^2 | A_5) = \frac{P(A_5 | H_5)P(H_5^1 | \bar{A}_5)}{\sum_{i=1}^7 P(A_5 | H_i)P(H_i^1 | \bar{A}_5)} = 0,182;$$

$$P(H_7^2 | A_5) = \frac{P(A_5 | H_7)P(H_7^1 | \bar{A}_5)}{\sum_{i=1}^7 P(A_5 | H_i)P(H_i^1 | \bar{A}_5)} \approx 0,273;$$

$$P(H_i^2 | A_5) \approx 0,109, \quad i = 1, 2, 3, 4, 6.$$

Аналогично рассчитываются апостериорные вероятности для событий A_j , $j = 1, 2, 3, 4, 6, 7$. Результаты расчетов по высказываниям эксперта 2 представлены в табл. 5.18. Из таблицы видно, что вероятности $\bar{P}_2(H_i | A)$ близки к априорным, поэтому требуется привлечение еще одного эксперта.

Результаты высказываний эксперта 3 приведены в табл. 5.19. При расчете апостериорных вероятностей здесь в качестве априорных используются значения $P_2(H_i) = P(H_i^2 | A_j)$, взятые из табл. 5.18.

Т а б л и ц а 5.18

Вероятности гипотез по результатам работы эксперта 2

Вероятность	Гипотезы						
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7
$P(H_i^2 \bar{A}_1)$	0,069	0,104	0,104	0,104	0,259	0,104	0,259
$P(H_i^2 \bar{A}_2)$	0,108	0,027	0,108	0,108	0,270	0,108	0,270
$P(H_i^2 \bar{A}_3)$	0,104	0,104	0,069	0,104	0,259	0,104	0,259
$P(H_i^2 A_4)$	0,103	0,103	0,103	0,069	0,258	0,103	0,258
$P(H_i^2 A_5)$	0,109	0,109	0,109	0,109	0,182	0,109	0,273
$P(H_i^2 \bar{A}_6)$	0,104	0,104	0,104	0,104	0,259	0,069	0,259
$P(H_i^2 A_7)$	0,109	0,109	0,109	0,109	0,273	0,109	0,182
$\sum_i P(H_i^2 A_j)$	0,706	0,660	0,706	0,706	1,760	0,706	1,760
$\bar{P}_2(H_i A)$	0,101	0,094	0,101	0,101	0,251	0,101	0,251

Т а б л и ц а 5.19

Результаты работы эксперта 3

Вариант	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
Ранг эксперта 3	5	2	3	4	1	4	3
Событие	$\bar{A}_1$	A_2	$\bar{A}_3$	$\bar{A}_4$	A_5	$\bar{A}_6$	$\bar{A}_7$

Т а б л и ц а 5.20

Вероятности гипотез по результатам работы эксперта 3

Вероятность	Гипотезы						
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7
$P(H_i^3 \bar{A}_1)$	0,360	0,108	0,108	0,108	0,268	0,108	0,268
$P(H_i^3 A_2)$	0,107	0,036	0,107	0,107	0,268	0,107	0,268
$P(H_i^3 \bar{A}_3)$	0,108	0,108	0,036	0,108	0,268	0,108	0,268
$P(H_i^3 \bar{A}_4)$	0,107	0,107	0,107	0,036	0,267	0,107	0,267
$P(H_i^3 A_5)$	0,103	0,103	0,103	0,103	0,229	0,103	0,257
$P(H_i^3 \bar{A}_6)$	0,108	0,108	0,108	0,108	0,268	0,036	0,268
$P(H_i^3 \bar{A}_7)$	0,120	0,120	0,120	0,120	0,300	0,120	0,100
$\bar{P}_3(H_i A)$	0,098	0,099	0,099	0,099	0,267	0,098	0,242

Рассчитанные значения апостериорных вероятностей и усредненные вероятности приведены в табл. 5.20.

Таким образом, после высказываний эксперта 3 максимальное значение средней вероятности соответствует гипотезе H_5 ($\bar{P}_3(H_5 | A) = 0,267$), и в качестве оптимального варианта следует принять v_5 .

Рассматривая в качестве v_a вариант v_5 и в качестве v_b вариант v_6 , при $k = 3$, $k_a = 2$, $k_b = 1$ на основе формулы (5.28) получаем $m \geq 2$, а согласно (5.25) $P_a = 2/3$, $P_b = 1/3$. Для этих значений

неравенство

$$\overline{P}_{3+2}(H(v_5) \mid \mathcal{A}) > \overline{P}_{3+2}(H(v_7) \mid \mathcal{A})$$

выполняется с вероятностью

$$P_2(a) = 1 - P_2(b) - P_2(a, b),$$

при $m \geq (k_a - k_b) + 1$, где $P_2(a, b)$ — вероятность того, что при $m = 2$ средние апостериорные вероятности для вариантов v_a и v_b примерно сравниваются.

Задаемся $P_m = 0,05$, т. е. $P_2 = 0,61$. Используя формулы (5.29), (5.30), получаем

$$P_2(b) = (1 - P_a)^2 P_b^2 \approx 0,012;$$

$$P_2(a, b) = 2P_a(1 - P_a)P_b^2 \approx 0,049;$$

$$P_2(a) = 1 - P_m \approx 0,94,$$

т. е. дополнительное привлечение двух экспертов с вероятностью 0,94 не изменит «лидерства» проекта v_5 , поэтому его можно считать оптимальным и больше экспертов не привлекать.

При обработке табл. 5.18, 5.20, 5.22 обычным способом коэффициент конкордации имеет очень низкое значение (0,094) и, естественно, мнения экспертов о всех вариантах считаются не согласованными (оценка критерия хи-квадрат 1,69, а табличное 12,59). Вместе с тем байесовский подход позволяет сделать достаточно надежные выводы о предпочтительном варианте, а именно:

- использование метода экспертных оценок совместно с байесовским подходом позволяет формализовать задачу определения числа привлекаемых экспертов;
- расчет средних апостериорных вероятностей дает возможность принимать обоснованные решения относительно группы предпочтительных вариантов, когда мнения экспертов относительно всего множества вариантов считаются несогласованными;
- расчет апостериорных вероятностей на каждой итерации и прогнозирование вероятностей $P_m(b)$ позволяют исключить из рассмотрения заведомо неперспективные варианты;
- предложенный алгоритм удобен для оперативного принятия решений при работе с экспертами в режиме удаленного доступа (через Интернет), когда ответы экспертов поступают не одновременно.

В общем случае использование формулы Байеса требует знаний априорных и условных вероятностей, для оценки которых

необходимы статистические данные. При этом встречаются следующие трудности: большие трудозатраты для получения представительной выборки, особенно в случае многомерных распределений; необходимость принятия решений в условиях редко повторяющихся ситуаций, наблюдение за которыми требует длительного времени; изменение характера распределений и взаимосвязи между данными и ситуациями со временем, особенно для экономических показателей развивающихся предприятий и др.

Существуют методы, которые в определенной степени позволяют избежать перечисленных трудностей. Например, стендфордская теория фактора уверенности или модель (метод) Шортлифа — Бьюкенена (МШБ) позволяет делать оперативные выводы на основе неполных знаний. Для этого вместо сбора представительной выборки составляется система продукционных правил, собираются и обрабатываются мнения экспертов, которые затем интерпретируются в вероятностном смысле [17, 28]. Преимущество МШБ по сравнению с системой условных вероятностей, применяемых при байесовском подходе, заключается в следующем:

- имеется возможность использования фундаментальных знаний и теоретических закономерностей;
- возможно применение опытных данных при рассмотрении объектов, имеющих разные классы проблемных ситуаций и для которых нет достаточного статистического материала;
- легкость модификации алгоритма решения задачи, так как продукционные правила жестко не связаны одно с другим и нет необходимости строить заранее структурированное дерево решений;
- изменение правил и добавление новых не требуют анализа сложных взаимосвязей с другими частями системы исходных данных и промежуточных результатов;
- облегчается поиск потенциальных конфликтов и несовместимостей в базе знаний;
- используются простые механизмы объяснений вычислительного процесса.

Важную роль в МШБ играют понятия меры уверенности и меры неуверенности. Так, равенство $MB[h, x] = \alpha$ означает, что мера (measure) уверенности или доверия (believe) MB в некоторой гипотезе h , основанная на свидетельстве x , есть α . Гипотеза h может заключаться в предпочтительности одного из альтернативных вариантов v проектного решения. Равенство $MD[h, x] = \beta$ означает, что мера неуверенности или недоверия (distrust) MD гипотезы h , основанная на свидетельстве x , есть β .

Значения MB и MD, как и для вероятности, всегда должны находиться в интервале $[0, 1]$. Свидетельства могут быть не только наблюдаемыми, но и гипотезами. Например, $MB[h_1, h_2]$ есть мера увеличения уверенности в гипотезе h_1 при условии, что гипотеза h_2 является истинной.

Одно и то же свидетельство x не может выступать одновременно как в пользу, так и против гипотезы h , т.е.

если $MB[h, x] > 0$, то $MD[h, x] = 0$;

если $MD[h, x] > 0$, то $MB[h, x] = 0$.

Если гипотеза h не зависит от свидетельства x , т.е. условная вероятность $P(h | x)$ равна априорной вероятности $P(h)$, то

$$MB[h, x] = MD[h, x].$$

Значения MB и MD определяются с использованием соотношений

$$MB[h, x] = \begin{cases} 1, & \text{если } p(h) = 1; \\ \frac{\max\{p(h | x), p(h)\} - p(h)}{1 - p(h)}, & \text{если } p(h) < 1; \end{cases}$$

$$MD[h, x] = \begin{cases} 1, & \text{если } p(h) = 0; \\ \frac{\min\{p(h | x), p(h)\} - p(h)}{-p(h)}, & \text{если } p(h) > 0, \end{cases}$$

где $p(h)$ — априорная вероятность гипотезы h ; $p(h | x)$ — условная вероятность h при свидетельстве x .

Вероятность $p(h)$ отражает уверенность эксперта в истинности гипотезы h в любой момент времени, а $1 - p(h)$ — оценка неуверенности эксперта в истинности h . Если $p(h | x) > p(h)$, то x увеличивает уверенность эксперта в h . Если $p(h | x) < p(h)$, то x уменьшает уверенность в h (и увеличивает неуверенность в истинности h).

Для расчета MB и MD допускается использование упрощенных формул

$$MB[h, x] = \frac{p(h | x) - p(h)}{p(h)}, \quad \text{если } p(h | x) > p(h); \quad (5.31)$$

$$MD[h, x] = \frac{p(h) - p(h | x)}{p(h)}, \quad \text{если } p(h | x) < p(h). \quad (5.32)$$

Наряду с MB и MD в МШВ используется также коэффициент, или фактор, уверенности CF (certainty factor), вычисляемый по формуле

$$CF[h, x] = MB[h, x] - MD[h, x]. \quad CF[h, x] \in [-1; 1], \quad (5.33)$$

при этом

$$CF[h, x] + CF[\bar{h}, x] \neq 1, \quad (5.34)$$

где $\bar{h}$ — отрицание h .

К основным свойствам мер MB и MD относятся следующие:

1) если h — достоверная гипотеза, то

$$p(h | x) = 1, \quad MB[h, x] = 1, \quad MD[h, x] = 0; \quad CF[h, x] = 1; \quad (5.35)$$

2) если достоверна $\bar{h}$ (отрицание h), то

$$p(\bar{h} | x) = 1, \quad MB[h, x] = 0, \quad MD[h, x] = 1; \quad CF[h, x] = -1; \quad (5.36)$$

3) в случае недостатка свидетельств

$$MB[h, x] = 0, \quad MD[h, x] = 0, \quad CF[h, x] = 0, \quad (5.37)$$

т.е. здесь свидетельство x не подтверждает гипотезу h и не отвергает ее.

В случае упорядоченного наблюдения двух свидетельств сначала x_1 и затем x_2 значения MB и MD рассчитываются по формулам

$$MB[h, x_1 \wedge x_2] = \quad (5.38)$$

$$= \begin{cases} 0, & \text{если } MD[h, x_1 \wedge x_2] = 1; \\ MB[h, x_1] + MB[h, x_2](1 - MB[h, x_1]), & \text{если } MD[h, x_1 \wedge x_2] \neq 1; \end{cases}$$

$$MD[h, x_1 \wedge x_2] = \quad (5.39)$$

$$= \begin{cases} 0, & \text{если } MB[h, x_1 \wedge x_2] = 1; \\ MD[h, x_1] + MD[h, x_2](1 - MD[h, x_1]), & \text{если } MB[h, x_1 \wedge x_2] \neq 1; \end{cases}$$

$$CF[h, x] = \frac{p(h | x) - p(h)}{1 - p(h)}. \quad (5.40)$$

В случае двух гипотез h_1, h_2 для расчетов можно использовать приближенные формулы:

$$MB[h_1 \wedge h_2, x] \approx \min\{MB[h_1, x], MB[h_2, x]\}; \quad (5.41)$$

$$MD[h_1 \vee h_2, x] \approx \min\{MD[h_1, x], MD[h_2, x]\}; \quad (5.42)$$

$$MB[h_1 \vee h_2, x] \approx \max\{MB[h_1, x], MB[h_2, x]\}; \quad (5.43)$$

$$MD[h_1 \wedge h_2, x] \approx \max\{MD[h_1, x], MD[h_2, x]\}. \quad (5.44)$$

Метод Шортлифа — Бьюкенена, с одной стороны, позволяет оперативно принять решение при минимуме информации, с другой стороны, он не гарантирует от ошибочных решений. Основными источниками ошибок являются субъективность назначения исходных условных вероятностей $p(v_j | x_i)$ и формулировки продукционных правил.

Рассмотрим применение соотношений метода МШБ на следующем примере. Пусть сопоставляются два альтернативных варианта инвестирования проектов: v_1 — модернизация выпускаемого изделия, v_2 — разработка нового изделия.

Для принятия решения учитываются следующие основные факторы: x_1 — ожидаемое повышение показателей безотказности, x_2 — ожидаемое увеличение срока службы, x_3 — требуемый объем финансовых вложений, x_4 — требуемый объем трудозатрат, x_5 — ожидаемое снижение материалоемкости и энергоемкости, x_6 — ожидаемые сроки завершения работ.

Сформулированы следующие процедурные правила.

П1: «Если v_j обеспечивает x_1 и x_2 , то вариант v_j будет принят».

П2: «Если v_j выполняются условия для x_3 или x_4 , то вариант v_j будет принят».

П3: «Если v_j обеспечивает x_5 и x_6 , то вариант v_j будет принят».

Усредненные доли уверенности $\tilde{p}(v_j | x_i)$ принятия варианта v_j на основании данных x_i , полученных от экспертов, и результаты расчета $MB[v_j, x_i]$, $MD[v_j, x_i]$, $CF[v_j, x_i]$ для априорной вероятности $p(v_j) = 0,5$ представлены в табл. 5.21. При расчете $MB[v_j, x_i]$, $MD[v_j, x_i]$, $CF[v_j, x_i]$ использованы соотношения (5.31)–(5.33).

В табл. 5.22 приведены результаты расчета показателей MB , MD , CF для сложных гипотез, соответствующих сформулированным правилам с использованием соотношений (5.31)–(5.44).

Т а б л и ц а 5.21

Сопоставление вариантов на основании отдельных факторов

x_i	Вариант v_1			
	$\tilde{p}(v_1 x_i)$	$MB[v_1, x_i]$	$MD[v_1, x_i]$	$CF[v_1, x_i]$
x_1	0,3	0	0,4	-0,4
x_2	0,4	0	0,2	-0,2
x_3	0,6	0,2	0	0,2
x_4	0,6	0,2	0	0,2
x_5	0,4	0	0,2	-0,2
x_6	0,6	0,2	0	0,2
x_i	Вариант v_2			
	$\tilde{p}(v_2 x_i)$	$MB[v_2, x_i]$	$MD[v_2, x_i]$	$CF[v_2, x_i]$
x_1	0,8	0,6	0	0,6
x_2	0,9	0,8	0	0,8
x_3	0,5	0	0	0
x_4	0,6	0,2	0	0,2
x_5	0,6	0,2	0	0,2
x_6	0,6	0,2	0	0,2

Т а б л и ц а 5.22

Сопоставление вариантов по сложным гипотезам

Правило	v_1			v_2		
	MB	MD	CF	MB	MD	CF
П1 ($x_1 \wedge x_2 \sim y_1$)	0	0,4	-0,4	0,6	0	0,6
П2 ($x_3 \vee x_4 \sim y_2$)	0,2	0	0,2	0,2	0	0,2
П3 ($x_5 \wedge x_6 \sim y_3$)	0	0,2	-0,2	0,2	0	0,2

Т а б л и ц а 5.23

Окончательные результаты сравнения вариантов

Сложные гипотезы	v_1			v_2		
	MB	MD	CF	MB	MD	CF
$[v_j; y_1, y_2]$	0,2	0,4	-0,2	0,76	0	0,76
$[v_j; y_1, y_2, y_3]$	0,2	0,52	-0,32	0,808	0	0,808

Последовательная интеграция значений MB и MD по всем трем продукционным правилам выполняется с помощью формул

$$MB[v_j; y_1, y_2] = MB[v_j; y_1] + MB[v_j; y_2](1 - MB[v_j; y_1]);$$

$$MD[v_j; y_1, y_2] = MD[v_j; y_1] + MD[v_j; y_2](1 - MD[v_j; y_1]);$$

$$MB[v_j; y_1, y_2, y_3] = MB[v_j; y_1, y_2] + MB[v_j; y_3](1 - MB[v_j; y_1, y_2]);$$

$$MD[v_j; y_1, y_2, y_3] = MD[v_j; y_1, y_2] + MD[v_j; y_3](1 - MD[v_j; y_1, y_2]).$$

Итоговые результаты вычислений представлены в табл. 5.23.

Таким образом, при использовании значений $\hat{p}(v_j | x_i)$ предпочтительнее вариант решения $v_2 = \hat{v}^*$, так как

$$MB[v_2; y_1, y_2, y_3] = 0,808 > MB[v_1; y_1, y_2, y_3] = 0,2;$$

$$CF[v_2; y_1, y_2, y_3] = 0,808 > CF[v_1; y_1, y_2, y_3] = -0,32.$$

Вероятности $p(v_j | x_i)$ определяются на основе высказываний экспертов, поэтому в общем случае в результате экспертизы имеет место массив вероятностей

$$P(v_j | x_i) = \{p_1(v_j | x_i), p_2(v_j | x_i), \dots, p_l(v_j | x_i)\},$$

где $p_v(v_j | x_i)$ — доля уверенности принятия варианта v_j на основании данных x_i v -го эксперта; l — число экспертов.

Массив $P(v_j | x_i)$ характеризуется размахом $R(v_j | x_i) = P_{\max}(v_j | x_i) - P_{\min}(v_j | x_i)$, где $P_{\max(\min)}(v_j | x_i)$ — максимальное (минимальное) значение доли уверенности в группе экспертов. В зависимости от значения $R(v_j | x_i)$ можно выделить два случая: плотный и разреженный массивы.

Массив $P(v_j | x_i)$ называется плотным, если $R(v_j | x_i)$ не превышает допустимое значение $r_{\text{доп}}$, и разреженным (неплотным), если $R(v_j | x_i) > r_{\text{доп}}$.

Неплотный массив $P_{\text{нп}}(v_j | x_i)$ называется равномерным, если наибольшая разность между проранжированными (соседними) $p^p(v_j | x_i)$ не превышает $r'_{\text{доп}} \approx r_{\text{доп}}$, и неравномерным, если эта разность превышает $r'_{\text{доп}}$.

В качестве центра массива $P(v_j | x_i)$ при небольшом l целесообразно использовать медианное значение $\tilde{p}(v_j | x_i)$. Предпочтительный вариант решения, полученный при использовании $\tilde{p}(v_j | x_i)$ по алгоритмам МШВ, обозначим $\tilde{v}^*$.

Вариант решения $\tilde{v}^*$ называется абсолютно надежным относительно исходных массивов $\{P(v_j | x_i), j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}\}$, если он сохраняется для всех возможных комбинаций $p_v(v_j | x_i), j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}, v = \overline{1, l}$. Число таких комбинаций имеет порядок l^{mn} , вычисления при подобном числе комбинаций практически невозможны. Для сокращения вычислений можно воспользоваться следующим положением.

Если массивы $P(v_j | x_i)$ заменить интервальными значениями $[p_n(v_j | x_i), p_v(v_j | x_i)]$ и вариант $\tilde{v}^*$ сохраняется для всех возможных комбинаций границ интервалов, то вариант $\tilde{v}^*$ абсолютно надежен. Число возможных комбинаций в данном случае сокращается до 2^{mn} .

Для варианта $\tilde{v}^* = v_\mu$ всегда можно выделить вектор граничных значений $[p_{\text{гр}}(v_j | x_i), i = \overline{1, n}]$, который соответствует минимальной интегральной мере уверенности, а для альтернативных вариантов $v_j \neq \tilde{v}_\mu^*$ можно выделить векторы $\{p_{\text{гр}}(v_j | x_i), i = \overline{1, n}, j \in [1, \dots, m \setminus \mu]\}$, которые соответствуют максимальным интегральным мерам уверенности. Если вариант $\tilde{v}^* = v_\mu$ для выделенных векторов сохраняется как предпочтительный, то он характеризуется как абсолютно надежный.

Если требования абсолютной надежности не выполняются, то показатель надежности $\mathcal{N}$ оценивается с помощью вычислительных экспериментов следующим образом. Последовательно для всех $x_i, i = 1, 2, \dots, n$, с использованием $p_{\text{гр}}(v_j | x_i)$ и $p_{\text{гр}}(v_j \neq x_i)$ рассчитываются интегрированные значения мер МВ $P_{\text{гр}}^i$ и МД $P_{\text{гр}}^i$. По результатам расчетов определяется число $n(\tilde{v}^*)$, при котором вариант $\tilde{v}^*$ сохраняется предпочтительным, и показатель надежности $\mathcal{N}_1 = n(\tilde{v}^*)/n$.

В случае необходимости (например, $\mathcal{N}_1 = 1$ и требуется продолжить анализ) проводятся вычислительные эксперименты для всех пар свидетельств x_i, x_k и подсчитывается показатель

$\mathcal{N}_2 = n_2(\tilde{v}^*)/n_2$, где n_2 равно числу сочетаний из n по 2. Аналогично могут подсчитываться $\mathcal{N}_3$ и т.д.

Исследуем надежность полученного решения на основе интервальных значений $[p_n, p_b]$ из табл. 5.24. Для расчета $\tilde{p}(v_j | x_i)$ используем значения $p_{\text{ГР}}(\tilde{v}^* = v_2 | x_i)$ и $p_{\text{ГР}}(v_1 | x_i)$, результаты вычислений приведены в табл. 5.25–5.27.

Так как $\text{MB}[v_2; y_1, y_2, y_3] > \text{MB}[v_1; y_1, y_2, y_3]$, т.е. мера уверенности варианта v_2 превышает меру уверенности v_1 даже при использовании граничных наиболее благоприятных значений условных вероятностей свидетельств, то вариант v_2 является предпочтительным с коэффициентом надежности $\mathcal{N} = 1$, учитывающим высказывания всех экспертов.

Т а б л и ц а 5.24

Массивы условных вероятностей и интервалы их значений

Свидетельство x_i	Вариант решения v_1				
	$p_1(v_1 x_i)$	$p_2(v_1 x_i)$	$p_3(v_1 x_i)$	$\tilde{p}(v_1 x_i)$	$[p_n, p_b]$
x_1	0,3	0,5	0,2	0,3	[0,2;0,5]
x_2	0,5	0,4	0,3	0,3	[0,3;0,5]
x_3	0,6	0,7	0,4	0,6	[0,4;0,7]
x_4	0,6	0,7	0,6	0,6	[0,6;0,7]
x_5	0,4	0,6	0,3	0,4	[0,3;0,6]
x_6	0,4	0,6	0,7	0,6	[0,4;0,7]
Свидетельство x_i	Вариант решения v_2				
	$p_1(v_2 x_i)$	$p_2(v_2 x_i)$	$p_3(v_2 x_i)$	$\tilde{p}(v_2 x_i)$	$[p_n, p_b]$
x_1	0,85	0,8	0,8	0,8	[0,8;0,85]
x_2	0,9	0,8	0,9	0,9	[0,8;0,9]
x_3	0,4	0,5	0,5	0,5	[0,4;0,5]
x_4	0,6	0,6	0,55	0,6	[0,55;0,6]
x_5	0,6	0,7	0,6	0,6	[0,6;0,7]
x_6	0,5	0,6	0,6	0,5	[0,5;0,6]

Т а б л и ц а 5.25

Сопоставление вариантов на основании отдельных факторов

x_i	v_1				v_2			
	$p_{\text{ГР}}(v_1 x_i)$	MB	MD	CF	$p_{\text{ГР}}(v_2 x_i)$	MB	MD	CF
x_1	0,5	0	0	0	0,8	0,6	0	0,6
x_2	0,5	0	0	0	0,8	0,6	0	0,6
x_3	0,7	0,4	0	0,4	0,4	0	0,2	-0,2
x_4	0,7	0,4	0	0,4	0,55	0,1	0	0,1
x_5	0,6	0,2	0	0,2	0,6	0,2	0	0,2
x_6	0,7	0,4	0	0,4	0,5	0	0	0

Т а б л и ц а 5.26

Сопоставление вариантов на основании отдельных факторов

Правило	v_1			v_2		
	MB	MD	CF	MB	MD	CF
П1 ($x_1 \wedge x_2 \sim y_1$)	0	0	0	0,6	0	0,6
П2 ($x_3 \vee x_4 \sim y_2$)	0,4	0	0,4	0,1	0	0,1
П3 ($x_5 \wedge x_6 \sim y_3$)	0,2	0	0,2	0	0	0

Т а б л и ц а 5.27

Окончательные результаты сравнения вариантов

Сложные гипотезы	v_1			v_2		
	MB	MD	CF	MB	MD	CF
$[v_j; y_1, y_2]$	0,4	0	0,4	0,64	0	0,64
$[v_j; y_1, y_2, y_3]$	0,52	0	0,52	0,64	0	0,64

Таким образом, методика повышения надежности принимаемых управленческих решений с использованием МШБ заключается в следующем.

1. По результатам высказываний экспертов определяются медианные значения условных вероятностей $\tilde{p}(v_j | x_i)$ и интервальные значения $[p_n(v_j | x_i), p_v(v_j | x_i)]$.

2. Используя значения $\tilde{p}(v_j | x_i)$, рассчитывается условно оптимальный вариант решения $\tilde{v}^*$

3. Полученный вариант $\tilde{v}^*$ оценивается на надежность (отказоустойчивость). Для этого в расчете вместо $\tilde{p}(v_j | x_i)$ используются граничные значения — неблагоприятные для $\tilde{v}^*$ и благоприятные для альтернативных вариантов. Если при этом вариант $\tilde{v}^*$ сохраняется как оптимальный, то принимаемое решение считается абсолютно надежным. В противном случае рассчитываются показатели надежности $\mathcal{N}_1, \mathcal{N}_2$ и т.д., на основе которых принимается окончательное решение.

Для учета дополнительно используемой информации при выработке решений широкое применение находит также метод Демпстера – Шафера [17, 28]. Теорию Демпстера – Шафера (ТДШ) можно рассматривать как развитие байесовского подхода по уточнению апостериорных вероятностей по мере накопления данных на случаи, когда неизвестны законы распределения вероятностей исследуемых переменных и параметров. При байесовском подходе требуется знание точных значений вероятностей, здесь отсутствию знаний соответствует равновероятность событий, т.е. как в случае полного незнания, так и в случае равных вероятностей

событиям A_i приписываются одни и те же значения $p(A_i)$. Кроме того, для гипотезы (события) A всегда выполняется условие $p(A) - p(\bar{A}) = 1$. Используемые в ТДШ аксиомы слабее аксиом теории вероятностей, вместе с тем получаемые результаты обработки данных совпадают, если все вероятности, т. е. понимаемые в этом смысле показатели, точно известны. Во многих случаях свидетельства, частично подтверждающие гипотезу, необязательно подтверждают ее отрицание.

В основе ТДШ лежат два положения: возможность получения меры доверия для решаемой задачи из субъективных свидетельств о связанных с ней проблемах и правило объединения свидетельств (формула Демпстера).

Пусть подмножество гипотез A поддерживается первой группой свидетельств, соответствующую меру доверия обозначим $m_1(A)$. Подмножество гипотез B поддерживается второй группой показаний с мерой доверия $m_2(B)$. В предположении, что $m_1(A)$, $m_2(B)$ получены на основе независимых высказываний, новая мера $m_3(C)$, где C — подмножество гипотез, которое поддерживается как первой, так и второй группой свидетельств, определяется по формуле Демпстера

$$m_3(C) = K \sum_{A \cap B = C} m_1(A) m_2(B). \quad (5.45)$$

где

$$K = \left(1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) m_2(B) \right)^{-1} \quad (5.46)$$

Коэффициент K представляет собой константу нормализации, он обеспечивает выполнение условия, чтобы сумма мер доверия элементов подмножества C равнялась 1.

Поясним применение формулы (5.55) на следующем примере. Пусть высказывание эксперта или группы экспертов относительно предпочтительности вариантов $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ рассматривается как первая часть свидетельств. При этом выдвинуты гипотезы о перспективности вариантов v_2 и v_3 , т. е. $A = \{v_2, v_3, \theta_a\}$. Здесь θ_a множество гипотез, представляющее собой полную группу взаимоисключающих событий. На основе первой части свидетельств получены меры $m_1(v_2) = 0,4$; $m_1(v_3) = 0,3$; $m_1(\theta_a) = 0,3$. На основе новой группы свидетельств имеет место $B = \{v_1, v_2, \theta_b\}$ с $m_2(v_1) = 0,3$; $m_2(v_2) = 0,3$; $m_2(\theta_b) = 0,4$. Для двух независимых источников свидетельств формируется подмножество $C = \{v_1, v_2, v_3, \theta_c\}$. Объединение свидетельств без учета нормализации приведено в табл. 5.28.

Объединение свидетельств без учета нормализации

m_1	m_2	m_3
$m_1(v_2) = 0,4$	$m_2(v_1) = 0,3$	$m_3(\emptyset) = 0,12$
$m_1(v_3) = 0,3$	$m_2(v_1) = 0,3$	$m_3(\emptyset) = 0,09$
$m_1(\theta_a) = 0,3$	$m_2(v_1) = 0,3$	$m_3(v_1) = 0,09$
$m_1(v_2) = 0,4$	$m_2(v_2) = 0,3$	$m_3(v_2) = 0,12$
$m_1(v_3) = 0,3$	$m_2(v_2) = 0,3$	$m_3(\emptyset) = 0,09$
$m_1(\theta_a) = 0,3$	$m_2(v_2) = 0,3$	$m_3(v_2) = 0,09$
$m_1(v_2) = 0,4$	$m_2(\theta_b) = 0,4$	$m_3(v_2) = 0,16$
$m_1(v_3) = 0,3$	$m_2(\theta_b) = 0,4$	$m_3(v_3) = 0,12$
$m_1(\theta_a) = 0,3$	$m_2(\theta_b) = 0,4$	$m_3(\theta_c) = 0,12$

Используя формулу (5.46), рассчитывается коэффициент нормализации $K = (1 - m_3(\emptyset))^{-1} = 1,4286$. Далее по формуле (5.47) определяются меры доверия в результате объединения двух свидетельств:

$$m_3(v_1) = K \cdot 0,09 = 0,1286; \quad m_3(v_2) = K(0,12 - 0,09 + 0,16) = 0,5286;$$

$$m_3(v_3) = K \cdot 0,12 = 0,1714; \quad m_3(\theta_c) = K \cdot 0,12 = 0,1714.$$

Таким образом, после объединения двух групп свидетельств мера доверия к варианту v_2 существенно возросла, а к другим гипотезам уменьшилась, при этом

$$m_3(v_1) - m_3(v_2) - m_3(v_3) - m_3(\theta_c) = m_3(C) = 1.$$

В общем случае на n -м шаге объединения источников свидетельств формула Демпстера записывается в виде

$$m_n(Z) = \frac{\sum_{X \cap Y = Z} m_{n-2}(X) m_{n-1}(Y)}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_{n-2}(X) m_{n-1}(Y)}.$$

При объединении свидетельств $m_{n-2}(X)$ и $m_{n-1}(Y)$ для получения $m_n(Z)$ в результате пересечения двух пар множеств X и Y могут получаться пустые множества $m_n(\emptyset)$. Большое значение $m_n(\emptyset)$ означает существование конфликта свидетельств на множестве мер доверия.

Серьезным недостатком подхода Демпстера – Шафера является то, что правило объединения функций доверия (правило Демпстера) получено в предположении одинаковой достоверности разных источников свидетельств. В действительности информация, получаемая из разных источников, имеет разную степень достоверности. Это важное обстоятельство в формуле Демпстера

не учитывается и может привести к неправильным решениям. Для устранения данного недостатка в формулу Демпстера вводится коэффициент c_{n-1} относительной достоверности информации, получаемой из последнего источника, т. е. для подмножества Y . Коэффициент $c_{n-1} < 1$, если достоверность гипотез $Y = \{y_1, \dots, y_m, \theta_y\}$ меньше достоверности $X = \{x_1, \dots, x_k, \theta_x\}$, и $c_{n-1} > 1$ в противном случае. Модифицированная формула Демпстера имеет следующий вид:

$$m_n(Z | c_{n-1}) = \frac{\sum_{X \cap Y = Z} m_{n-2}(X) m_{n-1}(Y | c_{n-1})}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_{n-2}(X) m_{n-1}(Y | c_{n-1})},$$

где $m_{n-1}(Y | c_{n-1})$ — мера доверия $m_{n-1}(Y)$ с учетом коэффициента достоверности c_{n-1} .

Для пересчета значений $m_{n-1}(Y)$ в $m_{n-1}(Y | c_{n-1})$ используются следующие формулы:

в случае $c_{n-1} < 1$

$$m_{n-1}(y_i | c_{n-1}) = \frac{dm_{n-1}(y_i)}{d \sum_{i=1}^m m_{n-1}(y_i) + m_{n-1}(\theta_y)}, \quad i = \overline{1, m}; \quad (5.47)$$

$$m_{n-1}(\theta_y | c_{n-1}) = \frac{m_{n-1}(\theta_y)}{d \sum_{i=1}^m m_{n-1}(y_i) + m_{n-1}(\theta_y)}; \quad (5.48)$$

$$d = \frac{c_{n-1} m_{n-1}(\theta_y)}{1 - c_{n-1} \sum_{i=1}^m m_{n-1}(y_i)}; \quad (5.49)$$

в случае $c_{n-1} > 1$

$$m_{n-1}(y_i | c_{n-1}) = \frac{m_{n-1}(y_i)}{\sum_{i=1}^m m_{n-1}(y_i) - d_1 m_{n-1}(\theta_y)}, \quad i = \overline{1, m}; \quad (5.50)$$

$$m_{n-1}(\theta_y | c_{n-1}) = \frac{dm_{n-1}(\theta_y)}{\sum_{i=1}^m m_{n-1}(y_i) - d_1 m_{n-1}(\theta_y)}; \quad (5.51)$$

$$d_1 = \frac{c_{n-1}^{-1} \sum_{i=1}^m m_{n-1}(y_i)}{1 - c_{n-1}^{-1} m_{n-1}(\theta_y)}. \quad (5.52)$$

Значения $m_{n-1}(y_i | c_{n-1})$, $i = \overline{1, m}$, $m_{n-1}(\theta_y | c_{n-1})$, рассчитанные по формулам (5.47)–(5.52), удовлетворяют условиям нормировки.

Методика применения модифицированной формулы Демпстера состоит в следующем. Для поступающих новых свидетельств с мерами $m_{n-1}(y_i)$, $i = \overline{1, m}$, определяется коэффициент достоверности c_{n-1} по отношению к ранее используемым $m_{n-2}(X)$. Коэффициент c_{n-1} может оцениваться методом экспертных оценок или на основе сравнения точностных характеристик X и Y . Значения $m_{n-1}(y_i)$ по формулам (5.47)—(5.49) или (5.50)—(5.52) пересчитываются в $m_{n-1}(y_i | c_{n-1})$, которые подставляются в формулу Демпстера для расчета $m_n(Z)$.

5.6. Методы нечеткой логики

Ряд задач системотехнического проектирования, связанных с построением моделей, оптимизацией в условиях неопределенности, идентификацией проблемных ситуаций и т. д., успешно решается в автоматизированном режиме с использованием методов теории нечетких множеств. Основными понятиями этой теории являются нечеткое (размытое) множество, функция принадлежности, лингвистическая переменная, операции нечеткого вывода.

Под нечетким множеством (fuzzy set) обычно понимается совокупность элементов произвольной природы, относительно которых нельзя с полной определенностью утверждать, принадлежит ли тот или иной элемент данной совокупности либо нет. Например, $\mathcal{X}$ — совокупность всех проектов; x — конкретный проект, связанный с модернизацией передающего устройства радиостанции. Нечеткое множество A — множество сложных проектов.

Математически нечеткое множество (НМ) определяется как множество упорядоченных пар вида $\langle x, \mu_A(x) \rangle$, где x является элементом универсума (универсального множества) $\mathcal{X}$; $\mu_A(x)$ — функция принадлежности (ФП) элемента x к множеству A , которая ставит в соответствие каждому из элементов $x \in \mathcal{X}$ некоторое действительное число из интервала $[0, 1]$. Таким образом, функция принадлежности (membership function) определяет степень или уверенность, с которой элементы некоторого множества принадлежат заданному нечеткому множеству. Задать конкретное нечеткое множество означает определить соответствующую ему функцию принадлежности.

Функции принадлежности $\mu_A(x)$ могут иметь различную форму (рис. 5.3). Во многих случаях $\mu_A(x)$ представляют кусочно-линейными зависимостями, примеры которых представлены на рис. 5.3, б—д. Кусочно-линейные зависимости ФП удобно записывать математически, с ними легко выполнять логические опера-

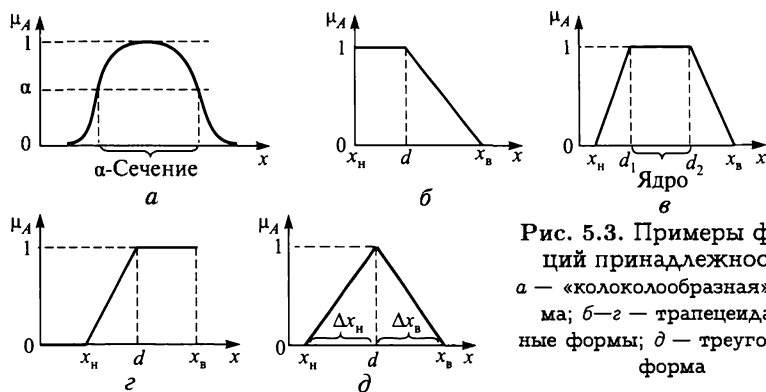


Рис. 5.3. Примеры функций принадлежности:
а — «колоколообразная» форма; б—г — трапециевидные формы; д — треугольная форма

ции. Например, ФП трапециевидальной формы (рис. 5.3, в) аналитически задается в виде

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_n; \\ \frac{x - x_n}{d_1 - x_n}, & x \in (x_n, d_1); \\ 1, & x \in [d_1, d_2]; \\ \frac{x_b - x}{x_b - d_2}, & x \in (d_2, x_b); \\ 0, & x \geq x_b. \end{cases}$$

ФП треугольной формы (рис. 5.3, д) может задаваться тройкой чисел $(\bar{x}, \Delta x_n, \Delta x_b)$, поэтому иногда нечеткие множества с такими ФП называют нечеткими числами. Область значений НМ, при которых ФП равна 1, называется его ядром, например интервал $[d_1, d_2]$ на рис. 5.3, в. Значения x , при которых ФП больше некоторого задаваемого α -уровня ($\alpha \in (0; 1)$), называются α -сечением (рис. 5.3, а).

Лингвистическая переменная (ЛП) задается на количественной шкале и принимает свои значения из множества лингвистических термов, в качестве которых рассматриваются НМ. Математически ЛП записывается в форме тройки

$$\langle a, T_a, x \rangle.$$

где a — название ЛП; T_a — множество лингвистических значений (термов, нечетких множеств) ЛП; x — область определения (количественная шкала) значений НМ, входящих в T_a . Например, в качестве ЛП рассматриваются проекты, сложность которых оценивается баллами с $x = [0; 10]$. Запись такой ЛП в форме тройки имеет следующий вид:

$$\langle \text{«проект»}, \{ \text{«простой»}, \text{«средней сложности»}, \text{«сложный»} \}, [0; 10] \rangle.$$

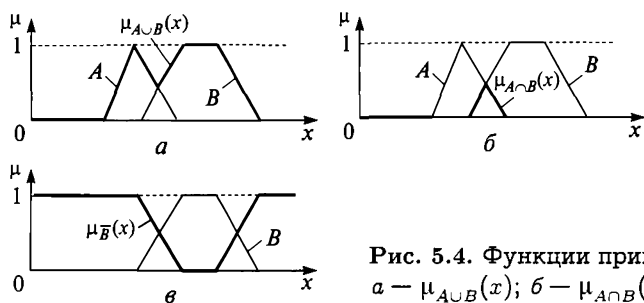


Рис. 5.4. Функции принадлежности:
а — $\mu_{A \cup B}(x)$; б — $\mu_{A \cap B}(x)$; в — $\mu_{\bar{B}}(x)$

С нечеткими множествами выполняются все логические операции, которые используются для обычных (четких) множеств. В результате логических операций получаются новые НМ с соответствующими ФП. Наиболее часто применяются следующие логические операции:

- произведение (пересечение) НМ A и B : $A \cap B$,

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in \mathcal{X};$$

- сумма (объединение) НМ A и B : $A \cup B$,

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in \mathcal{X};$$

- дополнение (отрицание) множества A ,

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in \mathcal{X};$$

- вложение (принадлежность): $A \subset B$,

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in \mathcal{X}.$$

На рис. 5.4 приведены графические преобразования ФП при логических операциях с НМ.

Задача принятия проектных решений с использованием нечеткой логики обычно формулируется следующим образом. Задаются входные $X_1, X_2, \dots$ и выходные $Y_1, Y_2, \dots$ лингвистические переменные в виде математических выражений соответствующих функций принадлежности. В качестве входных ЛП могут рассматриваться требуемые материальные затраты на проект, сроки выполнения проекта, необходимые кадровые ресурсы, сложность предстоящих работ и т. п. Выходными ЛП могут быть важность проекта для организации, риск своевременного выполнения и достижения ожидаемых результатов и т. д. Составляется система продукционных правил (правил нечетких продукций) Π_i ,

$i = 1, 2, \dots$, записываемых в виде

P_i ЕСЛИ «подусловия», ТО «подзаключения».

Например:

P_i ЕСЛИ «затраты на проект очень большие» И «сроки выполнения проекта относятся к категории жестких», ТО «риск своевременного выполнения проекта высокий».

Собираются (задаются) необходимые исходные числовые данные, например затраты на проект 15 млн руб., срок выполнения работ 6 месяцев.

Решение задачи включает шесть этапов.

1. *Фаззификация* (введение нечеткости) входных лингвистических переменных. На данном этапе по заданным числовым значениям всех входных ЛП переменных x^1, x^2 и ФП соответствующих НМ определяются их степени истинности, т. е. соответствующие значения ФП.

Например, для входной ЛП X_1 «затраты» с термами (нечеткими множествами) $X_{нз}^1$ — «незначительные», $X_{ум}^1$ — «умеренные», $X_{зн}^1$ — «значительные», $X_{об}^1$ — «очень большие» и функциями принадлежности $\mu_{нз}(x)$, $\mu_{ум}(x)$, $\mu_{об}(x)$ задается $x^1 = 15$, этому значению соответствуют следующие степени истинности s_v^1 , $v \in \{нз, ум, зн, об\}$:

$$\begin{aligned}\mu_{нз}(x^1 = 15) &= s_{нз}^1; & \mu_{ум}(x^1 = 15) &= s_{ум}^1; \\ \mu_{зн}(x^1 = 15) &= s_{зн}^1; & \mu_{об}(x^1 = 15) &= s_{об}^1.\end{aligned}$$

В результате фаззификации определяются все значения степеней истинности s_v^i для каждого из подусловий системы продукционных правил нечеткого вывода.

2. *Агрегирование* заключается в использовании полученных значений s_v^i для определения степеней истинности условий по каждому продукционному правилу системы нечеткого вывода.

Если в правиле P_k для подусловий со степенями истинности s_v^i и s_v^j содержится нечеткая конъюнкция (нечеткое «И»), то степень истинности правила $S_x(P_k)$ определяется по формуле

$$S_x(P_k) = \min\{s_v^i, s_v^j\}.$$

В случае, когда подусловия объединены нечеткой дизъюнкцией (нечетким «ИЛИ»), обычно используется соотношение

$$S_x(P_k) = s_v^i - s_v^j - s_v^i s_v^j.$$

Для определения нечетких «И» и «ИЛИ» могут использоваться также другие формулы [16].

В результате выполнения данного этапа находится множество значений степеней истинности

$$S_x = \{S_x(\Pi_1), \dots, S_x(\Pi_n)\},$$

где n — число продукционных правил.

3. *Активизация* представляет собой процедуру нахождения степеней истинности подзаключений в правилах нечетких продукций на основе полученного множества значений S_x и весовых коэффициентов F_i , $i = \overline{1, n}$, для правил (а иногда и для подзаключений). В случае, когда заключение имеет вид высказывания об одной выходной лингвистической переменной Y (например, Π_i : ЕСЛИ «условие», ТО «риск проекта высокий»), степень истинности заключения определяется по формуле

$$S_y(\Pi_i) = F_i S_x(\Pi_i).$$

Если заключение содержит два подзаключения (например, Π_i : ЕСЛИ «условие», ТО «риск проекта малый» И (ИЛИ) «конкурентоспособность изделий ожидается большая»), то степени истинности рассчитываются для каждого подзаключения, т. е.

$$S_1^1(\Pi_i) = F_i S_x(\Pi_i), \quad S_1^2(\Pi_i) = F_i S_x(\Pi_i),$$

где $S_1^j(\Pi_i)$, $j = 1, 2$, — степень истинности j -го подзаключения.

В последнем случае множество степени истинности подзаключений S_y содержит $2n$ элементов, т. е.

$$S_y = \{S_y^2(\Pi_1), S_y^1(\Pi_1), S_y^1(\Pi_2), \dots, S_y^2(\Pi_n)\}.$$

Для сокращения записи обозначим элементы множества S_y через c_i , в этом случае

$$S_y = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}, \quad q = 2n.$$

С использованием полученных степеней истинности определяются функции принадлежности подзаключений методом нечеткой композиции. При этом могут применяться формулы:

- min-активизации

$$\mu'(y) = \min\{c_i; \mu(y)\};$$

- prod-активизации

$$\mu'(y) = c_i \mu(y);$$

- average-активизации

$$\mu'(y) = 0,5(c_i + \mu(y)).$$

Кроме приведенных формул для выполнения активизации могут использоваться другие, основанные на модификации разных операций нечеткой композиции.

4. *Аккумуляция* (аккумулирование) заключается в определении функций принадлежности для выходных лингвистических переменных на основе объединения степеней истинности подзаключений, относящихся к одной и той же выходной лингвистической переменной и принадлежащих различным правилам Π_i . Для этого последовательно рассматриваются выходные ЛП и выделяются относящиеся к ним нечеткие множества. Затем выделенные нечеткие множества объединяются с учетом частоты (плотности) их повторения.

На данном этапе обычно используется метод max-объединения. Например, пусть выходная ЛП Y_p есть «риск выполнения проекта», а ее термы (НМ) — малый риск Y_m и большой риск Y_6 . В результате активизации для этих НМ получены ФП $\mu^p(y'_m)$ и $\mu^p(y'_6)$. Тогда в результате аккумуляции получают ФП $\mu_a^p(y)$ по одной из следующих формул:

$$\begin{aligned}\mu_a^p(y) &= \mu_a^p(y'_m) + \mu^p(y'_6) - \mu_a^p(y'_m)\mu^p(y'_6); \\ \mu_a^p(y) &= \min\{\mu^p(y'_m) + \mu^p(y'_6); 1\}; \\ \mu_a^p(y) &= \begin{cases} \mu^p(y'_m), & \text{если } \mu^p(y'_6) = 0; \\ \mu^p(y'_6), & \text{если } \mu^p(y'_m) = 0; \\ 1 & \text{в остальных случаях;} \end{cases} \\ \mu_a^p(y) &= \lambda\mu^p(y'_m) + (1-\lambda)\mu^p(y'_6), \quad \lambda \in [0; 1].\end{aligned}$$

5. *Дефаззификация* представляет собой процесс определения численных значений $\bar{y}_i$, $i = \overline{1, m}$, выходных ЛП Y_i , $i = \overline{1, m}$, полученных в результате аккумуляции. Для расчета значений $\bar{y}_i$ обычно используется центроидный метод (метод центра тяжести), в соответствии с которым

$$\bar{y}_i = \frac{\int_{y_i \min}^{y_i \max} y_i \mu_a^i(y) dy}{\int_{y_i \min}^{y_i \max} \mu_a^i(y) dy}, \quad i = \overline{1, m}.$$

6. На основе рассчитанных численных значений $\bar{y}_i$, $i = \overline{1, m}$, принимается решение по исследуемой проблеме.

Для выполнения рассмотренных этапов нечеткого моделирования в автоматизированном режиме можно использовать программные продукты MATLAB и fuzzy TECH [16].

5.7. Задачи схемотехнического проектирования

Основными задачами схемотехнического или функционального проектирования являются выбор элементной базы, разработка принципиальных схем частей РЭС, структурный и параметрический синтез схем, анализ чувствительности и др. При решении задач схемотехнического проектирования используются математические модели, отображающие физические процессы, которые протекают в схемах и трактах радиосистем. Результатом выполнения работ данного этапа является техническое решение в виде аппаратурной реализации РЭС с конкретным набором выбранных параметров (номиналов элементов схем и других характеристик), отвечающих заданным критериям на проектирование.

К наиболее сложным и ответственным задачам схемотехнического проектирования относятся задачи структурного и параметрического синтеза, которые решаются как задачи оптимизации в тесной взаимосвязи с соответствующими задачами анализа. Сначала решается задача структурной оптимизации, а затем для выбранной структуры — задача параметрической оптимизации. В условиях использования САПР задачи структурного и параметрического синтеза, разработки конструкции и другие формулируются как задачи оптимального проектирования (ОП). В общем виде задача ОП формулируется следующим образом.

Для проектируемого объекта выделяется вектор (совокупность) независимых переменных $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, которые можно изменять при выработке проектных решений и от которых зависят показатели качества объекта. Переменные $x_i, i = \overline{1, n}$, называют переменными проектирования или варьируемыми переменными, они могут иметь различную природу в зависимости от решаемой задачи, например отражать геометрические размеры компонентов, способы их включения и др. Задаются допустимые области изменения этих переменных, т.е. $x_i \in [x_i^H, x_i^B], i = \overline{1, n}$, где x_i^H, x_i^B — нижнее и верхнее граничные значения переменной x_i . Вводится критерий оптимальности (целевая функция) $Q(X)$, который при выборе наилучших значений $x_i, i = \overline{1, n}$, принимает экстремальное (максимальное или минимальное) значение. Кроме того, записываются различного рода ограничения и условия $g_j(X), j = \overline{1, m}$,

связанные с обеспечением выполнения проектируемых объектом требуемых функций и получением необходимых технических характеристик. Эти ограничения могут иметь вид равенств или неравенств. Зависимости $Q(X)$, $g_j(X)$, $j = \overline{1, m}$, обычно являются нелинейными.

С использованием введенных обозначений математически задача ОП формулируется следующим образом. Требуется определить такие значения переменных проектирования x_i^* , $i = \overline{1, n}$, при которых выполняются все ограничения

$$\begin{aligned} g_j(x_1^*, \dots, x_n^*) &\geq 0, \quad j = \overline{1, m}; \\ x_i^* &\in [x_i^H, x_i^B], \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (5.53)$$

и критерий оптимальности достигает экстремального значения

$$Q^*(X^*) = \underset{X}{\text{extr}} Q(X). \quad (5.54)$$

Если функции $Q(X)$ и $g_j(X)$, $j = \overline{1, m}$, известны, то задача (5.53)–(5.54) относится к классу задач математического программирования. В этом классе задач выделяют задачи линейного и нелинейного программирования. В первом случае функции $Q(X)$, $g_j(X)$, $j = \overline{1, m}$, представляют собой линейные зависимости от переменных x_i , $i = \overline{1, n}$, во втором — нелинейные. Если переменные x_i могут принимать только дискретные значения (например, номиналы элементов электрической схемы) или целочисленные значения (например, число каскадов усилителя), то решается задача дискретного программирования. Для решения этих задач используются соответственно методы линейного, нелинейного и целочисленного программирования.

Стандартная задача линейного программирования (ЛП) формулируется следующим образом.

Задается система m неравенств с n неизвестными $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$:

$$a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \geq b_1;$$

$$a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \geq b_m$$

и целевая функция (линейная форма)

$$Q = c_1x_1 + \dots + c_nx_n.$$

Требуется определить такие значения $x_i^* \geq 0$, $i = \overline{1, n}$, при которых критерий Q достигает максимального (в задаче на максимум) или минимального (в задаче на минимум) значения.

Основным методом решения задач ЛП является симплекс-метод*, который подробно описан во многих учебниках и реализуется в ряде пакетов прикладных программ [31].

При решении практических задач проектирования РЭС и технологических процессов ограничения (5.53) и критерий $Q(X)$ обычно описываются нелинейными зависимостями, т.е. имеют место задачи нелинейного программирования (в том числе выпуклое, квадратичное программирование и др.). Для решения задач нелинейного программирования в зависимости от особенностей функций $g_j(X)$, $j = \overline{1, m}$, и $Q(X)$ применяются методы неопределенных множителей Лагранжа, градиентный метод, метод наискорейшего спуска, Ньютона и ряд других.

Рассмотрим основные соотношения решения следующей задачи нелинейного программирования:

$$Q(X) \rightarrow \max_{X \in S} \quad S \quad g_i(X) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}.$$

методом неопределенных множителей Лагранжа. Сначала записывается функция Лагранжа

$$L(X, Y, \lambda) = Q(X) - \sum_{i=1}^m \lambda_i (g_i(X) - y_i^2).$$

где y_i^2 — дополнительные переменные, которые аддитивно добавляются к левой части ограничений — неравенствам для преобразования их в равенства.

Далее задача решается с использованием необходимых условий экстремума Куна — Таккера, т.е.

$$\begin{aligned} \lambda &= (\lambda_1, \dots, \lambda_m)^T \geq 0; \\ \nabla Q(X) - \lambda \nabla g(X) &= 0; \\ \lambda_i g_i(X) &= 0, \quad i = \overline{1, m}; \\ g_i(X) &\leq 0, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned}$$

где

$$\nabla Q(X) = \begin{pmatrix} \frac{\partial Q}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad \nabla g(X) = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

* В последнее время все чаще используют надстройку Excel «Поиск решения», которая решает задачи ЛП методом Ньютона или сопряженных градиентов. — *Прим. ред.*

Для численного решения задач линейного и нелинейного программирования можно использовать распространенные программные продукты типа MATLAB, Excel и др.

5.7.1. Задачи структурного синтеза

В общем случае под структурой проектируемой РЭС понимают состав основных компонентов с описанием их важнейших характеристик и связей между ними. Задача структурного синтеза (ЗСС) заключается в определении оптимальной структуры системы для реализации содержащихся в техническом задании (ТЗ) функций в соответствии с выбранным на этапе системотехнического проектирования принципом действия. В результате решения ЗСС находятся перечень элементов системы, схемы расположения компонентов с указанием их типов, таблицы соединений компонентов, алгоритмы функционирования и т. д.

Большинство задач структурного синтеза трудно формализуемы, обычно они сводятся к формированию множества альтернативных вариантов структурных решений и выбору наиболее предпочтительного варианта одним из методов, рассмотренных в подразд. 5.3—5.6.

Сложность формализации ЗСС связана с большим числом факторов, которые влияют на различные виды структур, их свойства и параметры. Состав вектора независимых переменных X (5.53), (5.54) для каждой структуры может сильно различаться. Это ведет к существенному увеличению числа варьируемых переменных и размерности задачи.

Для преодоления этих трудностей может использоваться блочно-иерархический подход, в основе которого лежит разбиение процесса проектирования на взаимосвязанные иерархические уровни. В соответствии с этим принципом структура всей системы декомпозируется на определенные функциональные части, блоки, устройства и т. д. [14]. Иерархический подход уменьшает число рассматриваемых вариантов на каждом уровне. В зависимости от особенностей синтезируемых структур различают задачи одномерного, схемного и геометрического синтеза.

По вычислительным возможностям выделяют ЗСС с полным перебором альтернативных вариантов (число вариантов невелико) и задачи, в которых рассмотреть все варианты за приемлемое время невозможно (например, множество вариантов структур является счетным). Во втором случае получение точных решений ЗСС обычно не представляется возможным, и здесь широкое приме-

нение находят различные эвристические приближенные методы, позволяющие при небольших вычислительных затратах получать решения, близкие к оптимальным. Такие методы, в частности, используются при решении задач компоновки, размещения и трассировки.

При разработке оптимальной структуры важная роль отводится задачам анализа качества структуры системы, в том числе проверке существования решения задачи, устойчивости используемых алгоритмов и т. п.

С точки зрения информационных технологий структурный синтез рассматривается как преобразование исходной информации, содержащей описание требований к системе, функциональные характеристики, условия ее эксплуатации, ограничения, накладываемые на элементную базу и т. п., в информацию о составе элементов, значениях их параметров, способах соединения и т. д. Для такого описания используются специализированные языки, в частности язык VHDL для электроники, который применяется для функционального, поведенческого и структурного описаний системы, EXPRESS — универсальный язык спецификаций для представления и обмена информацией в CALS-технологиях [21].

Для решения ЗСС в настоящее время используется большое число различных методов, в том числе дискретное математическое программирование, метод ветвей и границ, методы локальной оптимизации и поиска с запретами, методы распространения ограничений, эволюционные методы, генетические алгоритмы и др.

В ряде случаев при решении ЗСС целесообразно использовать функциональный подход, при котором назначение проектируемой системы задается выполняемыми функциями $F = (f_1, \dots, f_m)$. Вариант структуры системы с функциями F задается номенклатурой элементов, реализующих функции $\Phi = (\varphi_1, \dots, \varphi_{m_1})$. При этом набор функций Φ должен обеспечивать выполнение функций F системы и позволять решать задачи ее дальнейшей модернизации.

Для представления альтернатив в информационно-поисковых системах при решении ЗСС используются разные виды описаний, в том числе [21]:

- представление множества альтернатив A кортежем

$$A = \langle P, \mathcal{E} \rangle,$$

где P — способ (алгоритм); $\mathcal{E}$ — набор элементов;

- морфологические таблицы M вида

$$M = \langle Y, R \rangle,$$

где Y — множество функций (свойств, характеристик) проектируемого объекта; R — множество способов реализации соответствующих функций;

- альтернативные И-ИЛИ-графы (деревья) иерархического типа, у которых вершины — логические операции, а ребра — значения функций и др.

Для решения ЗСС широкое применение находят морфологические методы синтеза систем. Морфологический синтез новых структурных решений включает следующие этапы:

- декомпозиция проектируемой системы на обобщенные функциональные подсистемы;
- выделение подмножеств альтернативных вариантов A_{ij} каждой из подсистем;
- синтез всей системы на основе комбинированных альтернативных вариантов ее подсистем;
- выбор из полученных вариантов наиболее предпочтительной или оптимальной по некоторому критерию комбинации;
- реализация полученной комбинации в виде действующего макета и экспериментальная проверка [25].

Для альтернативных вариантов подсистем A_{ij} , $j = \overline{1, k_i}$, формируются функциональные f_{iv} и конструктивные $k_{i\mu}$ (а в случае необходимости и технологические) признаки. Полученная информация систематизируется в виде морфологической таблицы.

Например, в качестве обобщенных функциональных подсистем (ОФПС) для РАС могут рассматриваться антенная система (АС), приемно-передающий модуль (ППМ), система обработки информации (СОИ), система автоматического распознавания (САР) и автоматизированное рабочее место оператора (АРМО). В этом случае строится морфологическая таблица, содержащая информацию об альтернативах A_{ij} с функциональными f_{iv} и конструктивными $k_{i\mu}$ признаками (табл. 5.29). Вариант структуры проектируемой системы представляет собой кортеж S_j , содержащий по одной альтернативе из каждой строки морфологической таблицы, т. е.

$$S_j = \langle A_{1i}, A_{2v}, \dots, A_{L\mu} \rangle, \quad i = \overline{1, k_1}, \quad v = \overline{1, k_2}, \quad \mu = \overline{1, k_L}.$$

где L — число обобщенных функциональных подсистем.

Возможные варианты структур образуют морфологическое множество

$$\Phi = \Phi_1 \times \Phi_2 \times \dots \times \Phi_L.$$

где Φ_i , $i = \overline{1, L}$, — множество альтернатив i -й строки морфологической таблицы.

Морфологическая таблица

Обобщенные функциональные подсистемы	Функциональные f_{iv} и конструктивные k_{iu} значения признаков альтернативы A_{ij}			
ОФПС ₁ — АС	A_{11} $f_{11}, f_{12}, \dots$ $k_{11}, k_{12}, \dots$	A_{12} $f_{11}, f_{12}, \dots$ $k_{11}, k_{13}, \dots$		A_{1k_1} $f_{11}, f_{12}, \dots$ $k_{11}, k_{14}, \dots$
ОФПС ₂ — ППМ	A_{21} $f_{21}, f_{22}, \dots$ $k_{21}, k_{22}, \dots$	A_{22} $f_{21}, f_{22}, \dots$ $k_{21}, k_{23}, \dots$		A_{2k_1} $f_{21}, f_{22}, \dots$ $k_{21}, k_{24}, \dots$
ОФПС ₃ — СОИ				
ОФПС ₄ — САР				
ОФПС ₅ — АРМО	A_{51} $f_{51}, f_{52}, \dots$ $k_{51}, k_{52}, \dots$	A_{52} $f_{51}, f_{52}, \dots$ $k_{51}, k_{53}, \dots$		A_{5k_1} $f_{51}, f_{52}, \dots$ $k_{51}, k_{54}, \dots$

Число возможных вариантов N , т. е. мощность множества Φ ,

$$N = \prod_{i=1}^L k_i.$$

Для последующего решения ЗСС на основе полученного морфологического множества Φ используются в основном два подхода. Первый подход предполагает наличие одного или нескольких прототипов проектируемого объекта и сформулированные требования к улучшаемым характеристикам прототипов. Второй подход используется при синтезе новой системы в отсутствие прототипа.

При реализации первого подхода используются следующие методы: а) метод непосредственного оценивания критериев качества альтернатив; б) метод морфологического синтеза, использующий попарное сравнение альтернатив; в) метод исключения наихудших вариантов (например, трудно реализуемых и т. п.); г) метод расстановки приоритетов; д) метод оценки мер сходства и различия альтернативного варианта с прототипом и др.

При втором подходе ЗСС решаются методами принятия проектных решений в условиях нечеткой и неполной исходной информации. Для получения наиболее рациональной структуры системы здесь используется понятие «полезность» и формируется система показателей, конкретизирующих цель выбора. Эти показатели характеризуют качество проектируемого объекта, функциональное назначение, экологичность, соответствие нормативным международным нормам, защищенность патентами и т. д.

5.7.2. Задачи параметрического синтеза

Задача параметрического синтеза (ЗПС) заключается в выборе или расчете наилучших значений параметров системы, имеющей определенную структуру. При этом должны учитываться все требования ТЗ на проектируемое РЭС, т. е. выходные показатели системы должны соответствовать требуемым. ЗПС в отличие от задач структурного синтеза хорошо формализуются, часто их называют задачами параметрической оптимизации.

Для математической постановки ЗПС вводятся векторы варьируемых переменных (параметров) $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и выходных переменных $Y = (y_1, y_2, \dots, y_k)$. Векторы X и Y связаны определенными соотношениями, входящими в состав модели системы. Вектор выходных параметров, соответствующий требованиям ТЗ, обозначим Y^0 .

Обычно ЗПС формулируется как задача математического программирования, т. е. требуется определить такое значение вектора X^* , при котором выбранная целевая функция $Q(X)$ достигает экстремального значения и выполняются все накладываемые на X ограничения. Для определенности будем считать, что критерий $Q(X)$ минимизируется, тогда математически ЗПС записывается в виде

$$X^* = \arg \min_{X \in X_{\text{доп}}} Q(X, Y^0);$$

$$g(X, Y) = 0, \quad h(X, Y) \geq 0.$$

где $X_{\text{доп}}$ — область допустимых значений изменения X ; $g(X, Y)$, $h(X, Y)$ — векторные функции, описывающие условия и ограничения на X, Y .

В качестве целевой функции часто используют следующие критерии:

- максимальное значение модуля отклонения выходных характеристик $\tilde{y}_j(X)$ от заданных $y_j^{(0)}$, $j = \overline{1, k}$, с учетом весовых коэффициентов c_j , т. е.

$$Q(X) = \max_j \{c_j |y_j^{(0)} - \tilde{y}_j(X)|; j = \overline{1, k}\};$$

- среднеквадратичное отклонение между $\tilde{y}_j$ и $y_j^{(0)}$

$$Q(X) = \sqrt{\sum_{j=1}^k c_j (y_j^{(0)} - \tilde{y}_j(X))^2}$$

и др.

Заметим, что выбор $Q(X)$ носит субъективный характер, поэтому в результате решения ЗПС мы получаем оптимальное решение в смысле используемого критерия. При задании значений $y_j^{(0)}$, $j = \overline{1, k}$, следует ориентироваться на лучшие (эталонные) образцы с учетом последних научно-технических достижений.

Определяющее значение в задачах параметрического синтеза имеет выполнение условий работоспособности проектируемого РЭС. Эти условия определяются требуемыми соотношениями между расчетными значениями выходных переменных (параметров) $\tilde{y}_j$, $j = \overline{1, k}$, и задаваемыми (техническими требованиями) $y_j^{(0)}$, $j = \overline{1, k}$, которое в общем случае имеют вид

$$\begin{aligned}\tilde{y}_j &< y_j^{(0)} & j = \overline{1, k_1}; \\ \tilde{y}_j &> y_j^{(0)}, & j = \overline{k_1 + 1, k_2}; \\ \tilde{y}_j &= y_j^{(0)} \pm \Delta y_j, & j = \overline{k_2 + 1, k_3},\end{aligned}$$

где Δy_j — допустимое отклонение $\tilde{y}_j$ от указанного значения в ТЗ.

Обычно постановка ЗПС включает следующие основные этапы:

- выбор целевой функции F ;
- выделение управляемых (варьируемых) X и выходных Y переменных (параметров);
- назначение ограничений на X и Y ;
- нормирование компонентов X и Y

Отдельные составляющие выходных переменных могут представлять собой качественные характеристики, которые при численном решении ЗПС оцениваются баллами.

В большинстве случаев критерий оптимальности имеет векторный характер, при этом изменение какого-либо компонента $x_i \in X$ может приводить к улучшению одних выходных параметров РЭС и ухудшению других. Такие задачи относятся к классу многокритериальных, для их сведения к задачам математического программирования применяются различные способы свертки векторного критерия в скалярную целевую функцию.

Наиболее часто в качестве скалярной целевой функции используются следующие:

1) частный критерий, когда среди составляющих вектора Y можно выделить один основной показатель, например для передатчика это может быть мощность, для приемника — чувствительность и т. д.;

2) взвешенный аддитивный критерий, например:

$$Q(X) = \sum_{j=1}^k c_j y_j^{(-)}(X) - \sum_{j=k_1-1}^k c_j y_j^{(-)}(X),$$

где $y_j^{(-)}(X)$, $y_j^{(-)}(X)$ — выходные параметры, которые соответственно следует уменьшать (энергопотребление, габариты и т. п.) и увеличивать (помехоустойчивость, надежность и т. п.);

3) мультипликативный критерий вида

$$Q(X) = \prod_{j=1}^{k_1} y_j^{(-)}(X) / \prod_{j=k_1-1}^{k_1} y_j^{(-)}(X),$$

здесь предполагается, что значения $y_j^{(-)}$, $y_j^{(-)}$ не могут принимать нулевые значения.

В ряде случаев для радиосистем в результате решения ЗПС необходимо обеспечить наилучшее совпадение функции изменения выходного параметра $\tilde{y}(X, \gamma)$, зависящей от аргумента γ , с заданной функцией $y^{(0)}(X, \gamma)$. В зависимости от характера функции в качестве аргумента используются частота (для частотных характеристик), время (для временных характеристик) и т. п. В этих случаях в интервале изменения аргумента выделяются узловые точки γ_i , $i = \overline{1, l}$, и в качестве целевой функции могут использоваться следующие функции:

$$Q(X) = \sum_{i=1}^l c_i |\tilde{y}(X, \gamma_i) - y^{(0)}(X, \gamma_i)|;$$

$$Q(X) = \sum_{i=1}^l c_i (\tilde{y}(X, \gamma_i) - y^{(0)}(X, \gamma_i))^2;$$

$$Q(X) = \max\{c_i |\tilde{y}(X, \gamma_i) - y^{(0)}(X, \gamma_i)|; \quad i = \overline{1, l}\},$$

где c_i — весовой коэффициент, соответствующий важности точки γ_i .

При назначении ограничений выделяют:

- прямые ограничения на варьируемые переменные

$$x_i \in [x_i^H, x_i^B], \quad i = \overline{1, n},$$

где x_i^H , x_i^B — нижняя и верхняя границы интервала изменения переменной x_i , $i = \overline{1, n}$, соответственно;

- функциональные ограничения типа равенств

$$g(x, y) = 0;$$

- функциональные ограничения типа неравенств

$$h(x, y) > 0.$$

Векторные функции $g(x, y)$, $h(x, y)$ обычно представляют собой условия работоспособности по выходным параметрам, которые не вошли в целевую функцию. Прямые и функциональные ограничения задают область изменения X при решении ЗПС, т. е. допустимую область поиска D_X . Любое значение $X \in D_X$ является допустимым решением ЗПС. Заметим, что если функциональные ограничения совпадают с условиями работоспособности, то D_X также называют областью работоспособности.

Нормирование компонентов переменных X и Y вводится для приведения их к безразмерному виду или одинаковой размерности с целью облегчения процедур поиска решений в многомерном пространстве. Широкое распространение находит способ логарифмического нормирования, когда переменная x_i преобразуется к безразмерному виду x_i по формуле $x_i = \ln(x_i/\Delta x_i)$, где Δx_i — единичное значение x_i .

В качестве примера постановки задачи параметрического синтеза рассмотрим задачу синтеза параметров антенны в виде линейки из n необходимых элементарных излучателей. Диаграмма направленности такой антенны может быть записана в виде

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^n k_i \frac{\sin(b_i \sin \theta)}{\sin d \sin \theta} \cos(x_i \sin \theta + \varphi_i),$$

где θ — угол в азимутальной плоскости; k_i, φ_i, x_i, b_i — коэффициент усиления, фаза возбуждающего напряжения, относительная координата и характеристический параметр i -го излучателя соответственно; d — константа.

На взаимное расположение излучателей задаются габаритные ограничения

$$G: \Delta x_i = |x_{i+1} - x_i| \geq \Delta x_{\text{доп}}, \quad \sum_{i=1}^n \Delta x_i = L.$$

Требуется определить такие значения варьируемых переменных $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $K = (k_1, k_2, \dots, k_n)$, $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$, которые при заданных ограничениях обеспечивают минимальный относительный уровень максимального по величине бокового лепестка $\Phi(\theta) = F(\theta)/F(0)$ общей диаграммы направленности

$$\min \Phi(\theta) = \min_{X, K, \varphi} \max_{\theta} \frac{|F(0); X, K, \varphi|}{F(0)}.$$

Для решения данной задачи может использоваться один из градиентных методов поиска.

5.8. Задачи конструкторского проектирования

Основными задачами конструкторского проектирования (ЗКП) являются задачи компоновки (разбиения), размещения и трассировки, решаемые на основе результатов схемотехнического проектирования.

В большинстве случаев под компоновкой понимают процесс перехода от схемы РЭС к конструктивному распределению (разбиению) всех элементов на группы, соответствующие конструктивам различных уровней (микросхем, типовых элементов замены, панелей блоков, стоек и т.д.). Иногда выделяют три постановки задачи компоновки: типизация — разбиение схемы на конструктивные элементы различных типов; покрытие — преобразование исходной схемы в схему соединений элементов; разрезание — разбиение исходной схемы на части [2].

В дальнейшем под компоновкой будем понимать разрезание большой схемы (структурной, функциональной, логической, электрической принципиальной) на части. Эта задача формулируется следующим образом.

Пусть исходная схема представляется мультиграфом $G(V, R)$, здесь множество вершин V соответствует множеству конструктивных модулей, а множество ребер R — связям между ними. Требуется разрезать (разбить) граф $G(V, R)$ на n частей $G_1(V_1, R_1), \dots, G_n(V_n, R_n)$ с $N_i, i = \overline{1, n}$, вершинами в каждой так, чтобы число ребер, соединяющих вершины разных частей, было минимальным, т.е. критерий оптимальности имеет вид

$$Q = \sum_{i,j=1}^n |R_{i,j}| \rightarrow \min_{V_1, \dots, V_n}, \quad (5.55)$$

где $|R_{i,j}|$ — мощность множества ребер $R_{i,j}$, инцидентных частям $G_i(V_i, R_i)$ и $G_j(V_j, R_j)$.

При этом должен выполняться ряд ограничений.

1. Число вершин в каждой части должно быть задано, т.е.

$$\forall i = \overline{1, n} \quad |V_i| = N_i. \quad (5.56)$$

2. Одна вершина должна принадлежать лишь одной части, т.е.

$$\forall G_i, G_j: G_i \neq G_j \Rightarrow V_i \cap V_j = \emptyset. \quad (5.57)$$

3. Объединение всех частей должно быть равно исходному графу, т. е.

$$\bigcup_{i=1}^n G_i(V_i, R_i) = G(V, R). \quad (5.58)$$

4. Максимально допустимое число внешних связей каждой части не должно превышать допустимой величины S_i :

$$\left| \bigcup_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^n R_{i,j} \right| \leq S_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5.59)$$

5. Раздельная компоновка отдельных вершин $v_k, v_l \in V$ в различных частях графа, т. е.

$$v_k \in V_i \Rightarrow v_l \in V \setminus V_i. \quad (5.60)$$

6. Некоторые вершины v_p, v_q должны быть жестко закреплены за определенными частями V_i, V_j . Такие вершины называются закрепленными, т. е.

$$v_p \in V_i, \quad v_q \in V_j. \quad (5.61)$$

Ограничения (5.56)–(5.61) на компоновку накладываются в зависимости от различных требований, предъявляемых к изделию, а также для учета различных физических факторов. Так, например, ограничение (5.60) обычно связано с выполнением условий электромагнитной и тепловой совместимости различных компонентов схемы. Поэтому применительно к реальным схемам при решении задачи компоновки могут накладываться как все рассмотренные ограничения, так и отдельные из них.

Размещение обычно рассматривается как проектная процедура, заключающаяся в определении расположения заданного множества элементов в монтажном пространстве. При проектировании РЭС решаются задачи размещения микросхем на печатной плате, компонентов в кристалле БИС, типовых элементов замены в панели, панелей в стойке и т. п. Решением задачи размещения достигаются повышение надежности, уменьшение размеров конструктивных единиц и длины соединений, минимизация взаимных наводок, задержек сигналов и т. д. От результатов ее решения зависит эффективность последующей задачи — трассировки.

Обычно задача размещения формулируется как задача оптимизации. Исходными данными для решения задачи являются множество конструктивных элементов $V = \{v_1, \dots, v_n\}$, множество

связей между ними $R = \{r_1, \dots, r_p\}$ и множество установочных мест (позиций) на коммутационной плате $T = \{t_1, \dots, t_m\}$, причем $m \geq n$. Указываются конфигурация монтажного пространства, ограничения на расположение отдельных элементов по установочным местам и относительно друг друга, а также на тепловой и электрический режимы платы (блока). Схема соединений элементов может задаваться графом $G(V, R)$, матрицей цепей или списком. Кроме того, задается целевая функция Q . Наиболее часто в задачах размещения минимизируется суммарная длина соединений

$$Q_1 = \frac{1}{2} \sum_{i,j} l_{ij} s_{ij}, \quad (5.62)$$

суммарное число внутрисхемных пересечений

$$Q_2 = \frac{1}{2} \sum_{r_{i,j} \in R} p(r_{ij}), \quad (5.63)$$

число соединений, длина которых превышает задаваемую величину l_3 ,

$$Q_3 = \frac{1}{2} \sum_{i,j} l'_{ij} s_{ij}, \quad l'_{ij} \geq l_3, \quad (5.64)$$

где l_{ij} — расстояние между i -м и j -м установочными местами, в которых расположены соответствующие конструктивные элементы; l'_{ij} — расстояния l_{ij} , превышающие l_3 ; s_{ij} — число кратных связей (ребер графа G), соединяющих элементы в i -м и j -м установочных местах; $p(r_{ij})$ — число пересечений ребра r_{ij} графа G .

При размещении элементов на плоскости расстояние определяется по формулам

$$l_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (5.65)$$

или

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (5.66)$$

где x_i, y_i — координата i -й установочной позиции.

Для совместного учета нескольких частных критериев при размещении элементов можно использовать обобщенный критерий, например

$$Q_4 = c_1 Q_1 + c_2 Q_2,$$

где c_i — весовой коэффициент, учитывающий важность i -го критерия.

Математически задача размещения формулируется следующим образом. Для заданных $G(V, R)$ и T требуется найти такое

отображение графа схемы G на множество установочных мест T , чтобы выполнялись необходимые ограничения и обеспечивался минимум целевой функции Q .

Трассировка является одной из самых сложных задач проектирования радиоэлектронной аппаратуры и заключается в соединении между собой контактов РЭС электрической цепью, при этом критерий качества соединений должен достигать экстремального значения и выполняться необходимые технологические ограничения.

Задача трассировки печатных соединений на плате формулируется следующим образом. На коммутационной поверхности задано координатами (x, y) множество конструктивных элементов $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$. Выводы (контакты) этих элементов образуют некоторое множество из L связанных подмножеств: $\mathcal{E} = \{C_1, C_2, \dots, C_L\}$, причем каждое подмножество C_i объединяет N_i выводов конструктивных элементов из множества Z в соответствии с принципиальной электрической схемой. Кроме того, задано расположение групп контактных площадок разъемов и монтажных отверстий, а также ряд требований, предъявляемых к топологии платы: минимальная ширина проводников и зазора между ними, размеры контактных площадок, число слоев металлизации и способы перехода с одного слоя на другой и т. п. Требуется с учетом заданных конструкторско-технологических ограничений соединить выводы конструктивных элементов внутри каждого подмножества $C_i \subset \mathcal{E}$ так, чтобы выбранный критерий качества Q печатного монтажа достигал экстремального значения.

На практике при оптимизации топологии печатного монтажа часто используют следующие критерии качества:

- 1) минимум суммарной длины всех соединений;
- 2) минимум числа пересечений проводников;
- 3) равномерность распределения проводников на печатной плате;
- 4) минимальная протяженность параллельных участков соседних проводников;
- 5) минимум числа изгибов проводников;
- 6) минимум числа переходов из слоя в слой (при проектировании многослойных печатных плат).

Каждый из перечисленных частных критериев учитывает одну из сторон качества монтажа. Во многих случаях используются обобщенные критерии на основе нескольких частных. Так как некоторые частные критерии являются противоречивыми, то при

выборе обобщенного критерия следует учитывать их важность, например, с помощью весовых коэффициентов.

Для решения задач компоновки, размещения и трассировки используется большое число различных методов, которые рассматриваются в подразд. 5.9 — 5.11.

5.9. Алгоритмы решения задач компоновки

Для автоматизированного решения задачи компоновки (5.56) — (5.61) применяется ряд алгоритмов. Рассмотрим кратко некоторые из них.

Последовательный алгоритм, использующий матрицу смежности. Идея последовательного алгоритма состоит в поочередной компоновке частей графа от первой до последней. При формировании j -й части $G_j(V_j, R_j)$ из рассматриваемого множества $V \setminus \bigcup_{i=1}^{j-1} V_i$ вершин выбирается $v^{(j)}$, имеющая минимальную степень $s(v^{(j)})$. К вершине $v^{(j)}$ добавляются смежные с ней вершины, в результате образуется подмножество $V_{(j)}$, мощность которого сопоставляется с требуемым числом N_j . Если $|V_{(j)}| \neq N_j$, то добавляется или удаляется необходимое число вершин, затем переходят к формированию следующей $(j - 1)$ -й части и т.д.

Рассмотрим основные этапы последовательного алгоритма решения задачи компоновки (5.56) — (5.61) на примере выделения первой части, т.е. $G_1(V_1, R_1)$.

1. Исходный мультиграф $G(V, R)$ представляется матрицей смежности S .

2. Выбирается вершина $v^{(1)}$, степень которой минимальна, т.е.

$$s(v^{(1)}) = \min_v \{s(v), v \in V\}.$$

Если вершин с минимальной степенью несколько, то выбирается вершина с максимальным числом кратных ребер.

3. Формируется первоначальное подмножество вершин $V_{(1)}$ для первой части, в которое включаются вершина $v^{(1)}$ и смежные с ней вершины.

4. На основе подмножества $V_{(1)}$ образуется множество вершин V_1 первой части. Если мощность полученного подмножества равна заданному числу вершин первой части, т.е. $|V_{(1)}| = N_1$, то $V_1 = V_{(1)}$. В случае $|V_{(1)}| > N_1$ необходимое число вершин удаляется, а при $|V_{(1)}| < N_1$ — добавляется. В результате компонуется первая часть $G_1(V_1, R_1)$.

5. Из $G(V, R)$ удаляется сформированная часть $G_1(V_1, R_1)$.

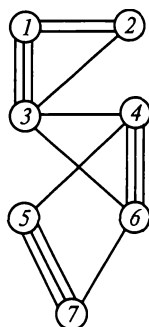


Рис. 5.5. Исходный мультиграф

Для оставшегося графа $G(V, R) \setminus G_1(V_1, R_1)$ аналогично выделяется вторая часть $G_2(V_2, R_2)$ и т. д.

Наибольшую трудность выполнения работы представляют расчеты четвертого этапа для случая $|V_{(1)}| \neq N_1$. Чтобы определить, какую вершину v удалять из $V_{(1)}$ (или добавлять к $V_{(1)}$), для каждой вершины $v_i \in V_{(1)}$ (или $v \in V \setminus V_{(1)}$) определяется ее относительный вес

$$\delta(v_i) = s(v_i) - \sum_{j \in J_1} s_{i,j}, \quad (5.67)$$

где $s(v)$ — степень вершины v ; $s_{i,j}$ — элемент матрицы S ; J_1 — множество номеров вершин $v_i \in V_{(1)}$.

Относительный вес $\delta(v)$ вершины v характеризует приращение числа внешних ребер части $G_1(V_1, R_1)$ при включении вершины v в часть $V_{(1)}$. Из множества вершин $V_{(1)}$ удаляется вершина, для которой вес $\delta(v)$ максимален, или добавляется вершина $v \in V \setminus V_{(1)}$ с минимальным значением $\delta(v)$.

Покажем это на простейшем примере. Пусть заданный граф $G(V, R)$ (рис. 5.5) имеет следующую матрицу смежности:

$$S = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccc} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & s(v_i) \\ \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{array} & \left(\begin{array}{cccccccc} 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 1 & 0 \end{array} \right) \end{array} \end{array} \begin{array}{l} 5 \\ 3 \\ 6 \\ 5 \\ 4 \\ 5 \\ 4 \end{array}$$

Рядом с матрицей выписаны значения степеней вершин $s(v)$, которые определяются как суммы элементов соответствующих строк. Так как минимальную степень имеет вершина v_2 , т. е. $v^1 = v_2$, и ей смежны вершины v_1, v_3, v_4 , получаем следующее первоначальное подмножество вершин для первой части $V_{(1)} = \{v_2; v_1; v_3; v_4\}$. Заметим, что если по условию задания для первой части есть закрепленная за ней вершина v_3 , то множество $V_{(1)}$ содержит v_3 и смежные с ней вершины.

Значения относительных весов $\delta(v)$ рассчитываются с учетом $V_{(1)}$ по формуле (5.67)

$$\delta(v_1) = s(v_1) - \sum_{j \in J_1} s_{1,j} = 0; \quad \delta(v_2) = s(v_2) - \sum_{j \in J_1} s_{2,j} = 0;$$

$$\delta(v_3) = s(v_3) - \sum_{j \in J_1} s_{3,j} = 1; \quad \delta(v_4) = s(v_4) - \sum_{j \in J_1} s_{4,j} = 4;$$

$$J_1 = \{1, 2, 3, 4\}.$$

Пусть $N_1 = 3$. Так как $|V_{(1)}| = 4$, для образования V_1 из $V_{(1)}$ надо удалить одну вершину, а именно v_4 , имеющую максимальное значение $\delta(v)$. В результате получаем первую часть с $V_{(1)} = \{v_2; v_1; v_3\}$.

В предположении, что $N_1 = 5$, к $V_{(1)}$ следовало бы добавить одну вершину из $v \in V \setminus V_{(1)}$. Такой вершиной была бы v_6 . Аналогичные процедуры выполняются для последующих частей графа.

Последовательный алгоритм, использующий матрицу цепей. Принципиальные электрические схемы соединения многоконтактных элементов (например, микросхем и микросборок) удобно представлять гиперграфом $\mathcal{G}$ и записывать в виде матрицы цепей

$$C = \|c_{ij}\|_{m \times k},$$

где m — число элементов схемы; k — число выводов многоконтактных элементов.

Элемент c_{ij} матрицы C означает номер электрической цепи, которая подключается к j -му выводу i -го многоконтактного элемента. Если контакт свободен, то $c_{ij} = 0$. Оптимальному разбиению схемы на n частей $\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_n$ соответствует такое разбиение матрицы C на подматрицы $C_1, C_2, \dots, C_n$, при котором число связей между частями минимально. Критерий оптимальности в этом случае записывается в виде

$$Q = \sum_{i=1} \sum_{\substack{j=1, \\ j>i}} |R_{ij}| = \sum_{i=1} \sum_{\substack{j=1, \\ j>i}} |C_i \cap C_j| \rightarrow \min_{C_1, C_2, \dots, C_n}, \quad (5.68)$$

где R_{ij} — число связей между i -й и j -й частями.

Работа алгоритма заключается в поочередном определении для каждого элемента v_i схемы чисел $\Delta R_1^i, \Delta R_2^i, \dots, \Delta R_n^i$, характеризующих приращение связей при расположении этого элемента в части $\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_n$. Для определения этих чисел вводится вспомогательная матрица $W = \|w_{ij}\|_{n \times l}$, где l — число цепей схемы; n — число частей разбиения. Элемент матрицы w_{ij} определяется соотношением

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я цепь } u_j \text{ содержится в } i\text{-й части;} \\ 0, & \text{если } j\text{-я цепь } u_j \text{ не содержится в } i\text{-й части.} \end{cases} \quad (5.69)$$

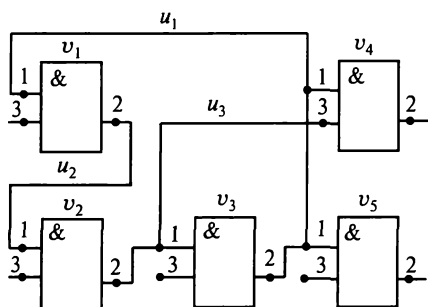


Рис. 5.6. Фрагмент электрической схемы

Число ΔR_j^i равно числу единиц l -вектора строки W_j^i , рассчитываемой по формуле

$$W_j^i = \overline{W}_j W_0^i \left(\bigvee_{v=1, v \neq j}^n W_v \right)$$

$$\Delta R_j^i = |W_j^i|, \quad (5.70)$$

где W_v — v -я строка матрицы W ; $\overline{W}_j$ — инверсия строки W_j ; W_0^i — l -вектор-строка, заполненная в соответствии с формулой (5.69).

Из чисел $\Delta R_1^i, \Delta R_2^i, \dots, \Delta R_n^i$ выбирается минимальное, и элемент v_i заносится в соответствующую часть.

Последовательность решения задачи рассмотрим на примере разбиения фрагмента электрической схемы (рис. 5.6) на части V_1 и V_2 с количеством элементов в каждой части $N_1 = 3$ и $N_2 = 2$, причем за первой частью закреплен элемент v_1 , а за второй — элемент v_5 .

1. Заданная схема представляется матрицей цепей

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 3 & 0 \\ 3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

2. Для закрепленных за отдельными частями элементов составляется вспомогательная матрица

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}, \quad V_1 = \{v_1\}, \quad V_2 = \{v_5\}.$$

При составлении матрицы следует учесть, что если хотя бы одна из вершин содержит данную цепь, то в соответствующей ячейке ставится единица.

3. Берется очередной незакрепленный элемент v_i и для него заполняется строка W_0^i , в нашем случае это v_2 и $W_0^2 = (0 \ 1 \ 1)$.

4. Определяется часть, в которую заносится элемент $v_i = v_2$. Для этого выполняются следующие расчеты:

- записываются инверсии $\overline{W}_j, j = \overline{1, n}$, для частей разбиения ($n = 2$), т.е. $\overline{W}_1 = (0 \ 0 \ 1)$ и $\overline{W}_2 = (0 \ 1 \ 1)$;
- подсчитываются сомножители в формуле (5.70), содержащие дизъюнкции; для нашего примера это $\overline{W}_1 = (100)$ и $\overline{W}_2 = (110)$;
- по формуле (5.70) определяются строки $W_j^i, j = \overline{1, n}$, и числа $\Delta R_j^i, j = \overline{1, n}$; в случае нашего примера

$$W_1^2 = \overline{W}_1 W_0^2 W_2 = (0 \ 0 \ 1)(0 \ 1 \ 1)(1 \ 0 \ 0) = (0 \ 0 \ 0); \quad \Delta R_1^2 = |W_1^2| = 0;$$

$$W_2^2 = \overline{W}_2 W_0^2 W_1 = (0 \ 1 \ 1)(0 \ 1 \ 1)(1 \ 1 \ 0) = (0 \ 1 \ 0); \quad \Delta R_2^2 = |W_2^2| = 1;$$

- находится минимальное число $\Delta R_q^i = \min\{\Delta R_j^i, j = \overline{1, n}\}$, и если q -я часть еще не заполнена (число элементов в ней меньше заданного N_q), то элемент v_i заносится в q -ю часть, в противном случае берется следующее по величине число ΔR_j^i и т.д. В нашем примере $\Delta R_q^2 = \Delta R_1^2 = 0$, следовательно, элемент v_2 заносится в первую часть и после выполнения данного этапа $V_1 = \{v_1, v_2\}$, а $V_2 = \{v_5\}$.

5. Корректируется строка матрицы W с учетом распределения элемента v_2 , скорректированная матрица

$$W = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}; \quad V_1 = \{v_1, v_2\}; \quad V_2 = \{v_5\}.$$

6. Выбирается следующий незакрепленный элемент, для которого выполняются этапы 4 — 5, и т.д., пока не будут заполнены все части. В нашем случае очередным элементом является v_3 , для него

$$W_0^3 = (1 \ 0 \ 1); \quad \overline{W}_1 = (0 \ 0 \ 0); \quad \overline{W}_2 = (0 \ 1 \ 1);$$

$$W_2 = (1 \ 0 \ 0); \quad W_1 = (1 \ 1 \ 1).$$

Следовательно,

$$W_1^3 = \overline{W}_1 W_0^3 W_2 = (0 \ 0 \ 0)(1 \ 0 \ 1)(1 \ 0 \ 0) = (0 \ 0 \ 0); \quad \Delta R_1^3 = |W_1^3| = 0;$$

$$W_2^3 = \overline{W}_2 W_0^3 W_1 = (0 \ 1 \ 1)(1 \ 0 \ 1)(1 \ 1 \ 1) = (0 \ 0 \ 1); \quad \Delta R_2^3 = |W_2^3| = 1.$$

Так как $\Delta R_q^3 = \Delta R_1^3 = 0$, а $\Delta R_2^3 = 1$, то элемент v_3 включается в первую часть. В результате первая часть полностью заполнена, так как по условию примера $|V_1| = N_1 = 3$. Таким образом, результатом решения задачи являются $V_1 = \{v_1, v_2, v_3\}$ и $V_2 = \{v_5, v_4\}$, при этом вспомогательная матрица

$$W = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}; \quad V_1 = \{v_1, v_2, v_3\}; \quad V_2 = \{v_4, v_5\}.$$

Для оценки качества разбиения рассчитывается значение критерия оптимальности Q , характеризующего число связей между частями. При расчете критерия Q вместо формулы (5.68) часто используется упрощенная формула, основанная на использовании вспомогательной матрицы W , имеющая вид

$$Q = \sum_{j=1}^l (u_{\Sigma j} - 1). \quad (5.71)$$

где $u_{\Sigma j}$ — сумма элементов (единиц) j -го столбца матрицы W

С использованием формулы (5.71) для нашего примера получаем

$$Q = (2 - 1) - (1 - 1) - (2 - 1) = 2.$$

Рассмотренный алгоритм компоновки применительно к схемам с многоконтактными элементами позволяет с помощью простых операций оптимальным образом разбить исходную схему на требуемое количество частей.

Итерационный алгоритм, использующий матрицу смежности. Идея итерационного алгоритма заключается в перестановках вершин или групп вершин из одной части графа в другую, до тех пор пока после многократного применения одних и тех же операций не будет получено минимальное число связей между частями.

В общем случае алгоритм состоит из двух этапов: 1) начальное «разрезание» графа (например, механическое деление матрицы смежности на части) — это вспомогательный этап; 2) основной этап, в ходе которого выполняется итерационное улучшение решения на основе парного или группового обмена вершин из различных частей.

Рассмотрим алгоритм на примере решения задачи разбиения графа $G(V, R)$ с числом вершин (мощностью) $|V| = 8$ на $n = 3$ части с числом вершин в каждой части $N_1 = 2$; $N_2 = 3$ и $N_3 = 3$ соответственно (рис. 5.7).

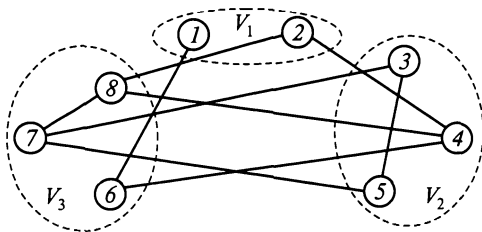


Рис. 5.7. Исходный граф $G(V, R)$

Предварительно исходный граф $G(V, R)$ представляется матрицей смежности S размерностью $m \times m$, где $m = |V|$. Матрица S для графа с выделенными частями V_1, V_2, V_3 , приведенного на рис. 5.7, имеет следующий вид:

$$S = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \end{matrix} & \begin{pmatrix} \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{1} & \overline{0} & \overline{0} \\ \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{1} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{1} \\ \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{1} & \overline{0} & \overline{1} & \overline{0} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & \overline{0} & \overline{1} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{1} & \overline{0} \\ \overline{1} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{1} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} & \overline{0} \\ 0 & 0 & \overline{1} & 0 & \overline{1} & 0 & 0 & \overline{1} \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} V_1 \\ \\ \\ V_2 \\ \\ \\ V_3 \end{matrix}$$

На первом этапе матрица S делится на $n \times n$ блоков, по диагонали расположены блоки S_{ii} , $i = \overline{1, n}$, размерностью $N_i \times N_i$, соответствующие числу вершин каждой части разбиения. Эти блоки сверху вниз располагают по мере увеличения их размерности. В результате такого деления матрицы S на блоки, т. е.

$$S = \begin{bmatrix} \overline{S_{11}} & \overline{S_{12}} & \overline{S_{13}} \\ \overline{S_{21}} & \overline{S_{22}} & \overline{S_{23}} \\ \overline{S_{31}} & \overline{S_{32}} & \overline{S_{33}} \end{bmatrix}$$

граф $G(V, R)$ делится на три части $G_1(V_1, R_1)$, $G_2(V_2, R_2)$, $G_3(V_3, R_3)$ с $V_1 = \{v_1, v_2\}$, $V_2 = \{v_3, v_4, v_5\}$, $V_3 = \{v_6, v_7, v_8\}$.

При решении задачи используется критерий оптимальности (5.55), т. е. минимум числа соединительных связей между частями. Разбиение графа в соответствии с выбранным критерием (5.55) тем лучше, чем больше связей сосредотачивается в диагональных блоках матрицы S . Поэтому вместо минимизации числа связей между частями можно максимизировать суммарное число ребер внутри всех частей графа $G(V, R)$. Полученный таким образом критерий оптимальности примет вид

$$Q = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^{|R_{jj}|} \alpha_i^j, \quad \alpha_i^j = \begin{cases} 1, & r_i^j \in R_{jj}; \\ 0, & r_i^j \notin R_{jj}, \end{cases}$$

где r_i^j — i -е ребро j -й части; R_{jj} — подмножество «внутренних» ребер части $G_j(V_j, R_j)$; l — число частей.

Для первоначального разбиения $Q = 7$. На этом первый этап заканчивается. В ходе выполнения второго этапа при каждой итерации выполняются следующие операции.

1. Подсчитываются перестановочные коэффициенты $\Delta R(v_i, v_j)$ для пар вершин, принадлежащих различным частям. Коэффициент $\Delta R(v_i, v_j)$ при $v_i \in V_p, v_j \in V_q$ характеризует изменение числа соединительных ребер $|R_{pq}|$ между частями G_p и G_q в результате перестановки вершин v_i и v_j .

2. Отбираются пары вершин, перестановка которых уменьшает число связей между частями, при этом должно выполняться условие $\Delta R(v_i, v_j) > 0$. Среди этих пар выбирается пара, дающая максимальное сокращение связей между частями.

3. Выполняется перестановка выбранной пары вершин и строится новая матрица S .

Итерации заканчиваются, когда для любых пар вершин из разных частей коэффициенты ΔR принимают отрицательные значения или равны нулю, т. е. при $\Delta R(v_i, v_j) \leq 0$.

Наиболее сложной частью алгоритма является расчет перестановочных коэффициентов $\Delta R(v_i, v_j)$, они оцениваются по формулам

$$\Delta R(v_i, v_j \mid v_i \in V_p, v_j \in V_q) = \Delta S_{qp}(v_i) + \Delta S_{pq}(v_j) - 2S_{ij};$$

$$\Delta S_{qp}(v_i) = \sum_{k \in J_q} S_{ik} - \sum_{k \in J_p} S_{ik}; \quad \Delta S_{pq}(v_j) = \sum_{k \in J_q} S_{jk} - \sum_{k \in J_p} S_{jk}; \quad (5.72)$$

где $\Delta S_{qp}(v_i)$, $\Delta S_{pq}(v_j)$ — числа связности вершин v_i и v_j ; J_p, J_q — множества номеров вершин частей V_p и V_q соответственно.

Величина $\Delta S_{qp}(v_i)$ равна разности чисел связности вершины $v_i \in V_p$ с вершинами $v \in V_q$ и с вершинами $V_p \setminus v_i$.

Расчет $\Delta R(v_i, v_j)$ рекомендуется проводить в следующей последовательности. Сначала определяется матрица ΔR_1 перестановочных коэффициентов для вершин первой части. Матрица имеет размерность $N_1 \times (m - N_1)$ и для нашего примера имеет вид

$$\Delta R_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} & r_{17} & r_{18} \\ r_{23} & r_{24} & r_{25} & r_{26} & r_{27} & r_{28} \end{pmatrix} =$$

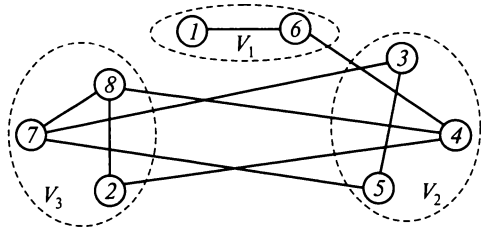
$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

где

$$r_{13} = \Delta R(v_1, v_3 \mid v_1 \in V_1, v_3 \in V_2) = \Delta S_{21}(v_1) + \Delta S_{12}(v_3) - 2S_{13} =$$

$$= \sum_{k \in \{3,4,5\}} S_{1k} - \sum_{k \in \{1,2\}} S_{1k} - \sum_{k \in \{1,2\}} S_{3k} - \sum_{k \in \{3,4,5\}} S_{3k} - 2S_{13} = -1;$$

Рис. 5.8. Разбиение графа $G(V, R)$ после первой итерации



$$r_{26} = \Delta R(v_2, v_6 \mid v_2 \in V_1, v_6 \in V_3) = \Delta S_{31}(v_2) - \Delta S_{13}(v_6) - 2S_{26} = \\ = \sum_{k \in \{6,7,8\}} S_{2k} - \sum_{k \in \{1,2\}} S_{2k} - \sum_{k \in \{1,2\}} S_{6k} - \sum_{k \in \{6,7,8\}} S_{6k} - 2S_{26} = 2.$$

Аналогично по формуле (5.72) вычисляются остальные коэффициенты матрицы ΔR_1 . Затем определяются пары вершин, имеющие положительный знак $\Delta R(v_i, v_j)$. В рассматриваемом примере такими парами являются $\{v_1, v_4\}$, $\{v_1, v_8\}$ и $\{v_2, v_6\}$. Так как для пары вершин (v_2, v_6) значение $\Delta R(v_2, v_6) = 2$ максимально, то в матрице смежности вершины v_2 и v_6 меняются местами, т. е. вершина v_2 переносится в третью часть, а v_6 — в первую. Разбиение графа $G(V, R)$ после первой итерации приведено на рис. 5.8, а матрица S_1 имеет следующий вид:

$$S_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 6 & 3 & 4 & 5 & 2 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_6 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_2 \\ v_7 \\ v_8 \end{matrix} & \begin{pmatrix} - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \\ V_1 \\ \\ V_2 \\ \\ V_3 \end{matrix}$$

Как видно из рис. 5.8 и матрицы S_1 , после первой итерации число внешних связей уменьшилось с $Q_0 = 7$ до $Q_1 = 5$.

В случае отсутствия положительных компонентов матрицы ΔR_1 строится матрица ΔR_2 размерностью $N_2 \times [m - (N_1 - N_2)]$, по которой определяется возможность перестановки вершин $v_i \in V$ с вершинами $v \in V \setminus V_1 \cup V_2$. Если матрица ΔR_2 не содержит положительных компонентов, то переходят к рассмотрению ΔR_3 и т. д. Решение задачи заканчивается, когда все компоненты матрицы ΔR_{n-1} отрицательны или равны нулю.

На второй итерации с использованием формулы (5.72) заполняется матрица коэффициентов $\Delta R'_1$, т.е.

$$\Delta R'_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 3 & 4 & 5 & 2 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -2 & 0 & -2 & -2 & -3 & -3 \\ -1 & -1 & -1 & -2 & -2 & -3 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Так как для рассматриваемого примера в матрице все перестановочные коэффициенты отрицательны или равны нулю, то переставлять вершины первой части с вершинами других частей нецелесообразно.

Для определения возможности перестановки вершин $v \in V_2$ по формуле (5.72) вычисляются перестановочные коэффициенты и заполняется матрица ΔR_2 размерности $N_2 \times (m - (N_1 + N_2))$. В нашем случае

$$\Delta R_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_2 & v_7 & v_8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_4 \\ v_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 0 & 3 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Максимальное значение ΔR_2 имеет место для пары вершин $\{v_4, v_7\}$, поэтому в матрице смежности вершины v_4 и v_7 меняются местами. Полученная матрица смежности имеет вид

$$S_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 6 & 3 & 7 & 5 & 2 & 4 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_6 \\ v_3 \\ v_7 \\ v_5 \\ v_2 \\ v_4 \\ v_8 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} V_1 \\ \\ V_2 \\ V_3 \\ \\ V_3 \end{matrix}$$

Разбиение графа после второй итерации приведено на рис. 5.9. Значение критерия Q_2 после двух перестановок равно 2.

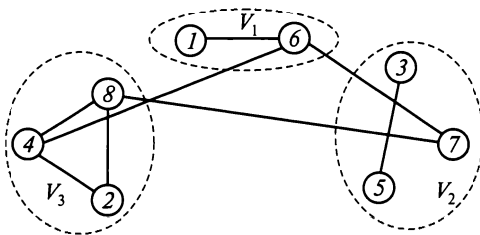


Рис. 5.9. Разбиение графа $G(V, R)$ после второй итерации

На третьей итерации матрица $\Delta R'_2$ имеет вид

$$\Delta R'_2 = \begin{matrix} & v_2 & v_4 & v_8 \\ \begin{matrix} v_3 \\ v_7 \\ v_5 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -4 & -4 & -3 \\ -3 & -3 & -4 \\ -4 & -4 & -3 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Так как все элементы матрицы $\Delta R'_2$ отрицательны и других матриц ΔR строить не требуется, то на этом решение задачи разбиения графа на три части заканчивается.

Несмотря на то что итерационный алгоритм позволяет достичь оптимального результата, его недостатком является наличие большого числа громоздких процедур, связанных с перестановкой элементов. Для сокращения числа итераций используется последовательно-итерационный алгоритм.

Последовательно-итерационный алгоритм. Данный алгоритм решения задачи компоновки отличается от итерационного тем, что первоначально группы (части) графа $G(V, R)$ формируются не произвольно, а на основе простых операций последовательного алгоритма. Это позволяет значительно сократить число трудоемких в вычислительном отношении итераций обмена вершинами между частями. Таким образом, в этом комбинированном алгоритме объединены достоинства последовательного и итерационного алгоритмов.

С помощью последовательно-итерационного алгоритма задача компоновки решается в следующем порядке.

1. Записывается матрица смежности S и выбирается начальная вершина $v^{(1)}$ для формирования первой части графа $G_1(V_1, R_1)$ с $|V_1| = N_1$. В качестве $v^{(1)}$ берется либо вершина, имеющая минимальную степень $s(v)$, $v \in V$, либо вершина, закрепленная за первой частью по условию задания.

2. Формируется множество вершин $V_1 \subset V$ первой части аналогично тому, как это предусмотрено последовательным алгоритмом. Рассмотрим данный этап подробнее. Сначала V_1 включает только один элемент $v^{(1)}$, т. е. $V_1 = \{v^{(1)}\}$. Далее формируется вспомогательное множество $V_1^{(1)}$, в которое входят все вершины, смежные $v^{(1)}$. Для вершин $v \in V_1^{(1)}$ рассчитываются относительные веса

$$\delta(v_i) = s(v_i) - \sum_{j \in J_1} s_{i,j},$$

характеризующие приращение числа внешних ребер части графа $G_1(V_1, R_1)$ при включении вершины v_i в множество V_1 . Здесь $s_{i,j}$ —

элемент матрицы S ; J_1 — массив номеров вершин, входящих в множество V_1 .

Для минимизации числа связей между частями в множество V_1 включают вершину v_k , имеющую минимальный относительный вес, т.е. $\delta v_k = \min_{\delta(v)} \{\delta(v), v \in V_1^{(1)}\}$. В результате получаем $V_{(1)} = \{v^1, v_k\}$. Затем образуется вспомогательное множество $V_1^{(2)} = \Gamma v^{(1)} \cup \Gamma v_k$ и подсчитываются относительные веса $\delta(v)$, $v \in V_1^{(2)}$. Здесь Γv_k — отображение вершины v_k в множество смежных с ней вершин. Этот процесс продолжается, пока не сформируется множество вершин V_1 с $|V_1| = N_1$.

3. Проверяется необходимость перестановки вершин между множеством V_1 и множеством оставшихся вершин $(V \setminus V_1)$ по процедуре итерационного алгоритма, т.е. рассчитывается матрица перестановочных коэффициентов ΔR_1 размерностью $N_1 \times (m - N_1)$, $m = |V|$, с использованием формулы (5.72). Если матрица ΔR_1 содержит положительные компоненты, то соответствующие вершины переставляются. Переписывается матрица смежности S и рассчитывается новая матрица $\Delta R'_1$. Эти операции продолжаются, пока все перестановочные коэффициенты не будут меньше нуля или равны нулю.

4. Из графа $G(V, R)$ исключается первая часть $G_1(V_1, R_1)$. Для оставшейся части графа $G_{0.1}(V_{0.1}, R_{0.1}) \triangleq G(V, R) \setminus G_1(V_1, R_1)$ составляется матрица смежности $S_{0.1}$ размерности $(m - N_1) \times (m - N_1)$, здесь $V_{0.1} = V \setminus V_1$. Затем выбирается начальная вершина $v^{(2)}$ второй части графа $G_2(V_2, R_2)$ с $|V_2| = N_2$ в соответствии с рекомендациями первого этапа.

Далее выполняются второй и третий этапы для второй части графа и так, пока не будут выделены все части. Заметим, что при выполнении третьего этапа, когда выделяются пары элементов для перестановки между двумя частями (дихотомическое разбиение), в вычислительном отношении удобно использовать числа связности вершин. Для вершины v_k число связности $\delta(v_k)$ определяется с помощью соотношения

$$\alpha(v_k) = \begin{cases} \sum_{j \in J \setminus J_1} s_{k,j} - \sum_{j \in J_1} s_{k,j}, & v_k \in V_1; \\ \sum_{j \in J_1} s_{k,j} - \sum_{j \in J \setminus J_1} s_{k,j}, & v_k \in V \setminus V_1, \end{cases}$$

где J_1 — множество номеров вершин $v \in V_1$; $J \setminus J_1$ — множество номеров вершин, не вошедших в первую часть, т.е. $v \in V \setminus V_1$.

Если $\alpha(v_k) = 0$, то число соединительных ребер от перестановки v_k из одной части в другую остается без изменения; если $\alpha(v_k) < 0$, то число соединительных ребер увеличивается, а при $\alpha(v_k) > 0$ уменьшается. На основании этого можно сделать вывод, что если все числа связности вершин $v \in V$ отрицательные или равны нулю, то не существует пары вершин $v_i \in V_1$ и $v_j \in V \setminus V_1$, перестановка которых привела бы к сокращению соединительных ребер. Условием целесообразности перестановки вершин $v_i \in V_1$ и $v_j \in V \setminus V_1$ является

$$\Delta R(v_i, v_j) = \alpha(v_i) - \alpha(v_j) - 2S_{i,j} > 0. \quad (5.73)$$

Из сопоставления формул (5.72) и (5.73) видно, что

$$\alpha(v_i \in V_p) = \Delta S_{qp}(v_i). \quad \alpha(v_j \in V_q) = \Delta S_{pq}(v_j).$$

Таким образом, последовательно-итерационный алгоритм позволяет сократить число итераций и обеспечивает оптимальное решение.

Генетический алгоритм. В последние годы широкое применение для решения конструкторских задач находят генетические алгоритмы (ГА). В общем случае в этих алгоритмах задаются структура хромосомы, способы рекомбинации и условия завершения эволюции. Хромосома играет роль вектора управляемых параметров, она состоит из генов и содержит информацию об их значениях. Выделяют хромосомы родителей и потомков. На начальном этапе решения задачи формируются хромосомы родителей и рассчитывается показатель (критерий), характеризующий предпочтительность каждой хромосомы (особи). Затем отбираются «лучшие» родительские хромосомы для получения хромосом потомков. Операция рекомбинации (скрещивания, кроссовера) обычно выполняется по схеме (2;2), т. е. два родителя — два потомка. Точка разрезания пары хромосом родителей может выбираться случайным образом. На последующих этапах оцениваются предпочтительности хромосом потомков и из них выбираются пары для рекомбинации.

В качестве условий окончания эволюционного процесса селекции может использоваться достижение некоторого значения критерия либо выполнение заранее задаваемого числа рекомбинаций.

Рассмотрим решение задачи компоновки методом комбинирования эвристик (НСМ — Heuristics Combination Method), являющегося представителем генетических алгоритмов. Пусть заданы:

- множество элементов (конструктивов)

$$V = \{v_i, i = \overline{1, m}\};$$

- множество блоков (частей)

$$B = \{B_j, j = \overline{1, n}\};$$

- матрица связей между элементами

$$C = \|c_{ik}\|_{m \times m}.$$

где c_{ik} характеризует наличие соединения v_i и v_k , т. е.

$$c_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{между } v_i \text{ и } v_k \text{ нет соединения;} \\ 1, & \text{между } v_i \text{ и } v_k \text{ есть соединение;} \end{cases}$$

- матрица кратностей связей (смежности)

$$S = \|s_{ik}\|_{m \times m},$$

где s_{ik} — число связей между v_i и v_k .

Требуется так разместить m конструктивов по n блокам, т. е. найти такую матрицу закрепления элементов за частями

$$X = \|x_{ji}\|_{n \times m}.$$

чтобы число межблочных связей было минимально и выполнялись ограничения

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} = 1, \quad \sum_{i=1}^n x_{ji} \leq V_{\max}.$$

где $V_{\max}$ — максимальное число элементов, помещающихся в один блок;

$$x_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если элемент } v_i \text{ включен в } B_j; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В процессе решения задачи формируются промежуточные матрицы

$$Y = XP_S = \|y_{ji}\|_{n \times m}, \quad W = YX^T = \|w_{pq}\|_{n \times m}.$$

где y_{ji} — число связей j -го блока с i -м конструктивом; w_{pq} — число связей между блоками B_p и B_q . Заметим, что значения вектора столбца P_S берутся из матрицы S .

Так как число межблочных связей равно общему числу связей минус число внутренних связей K , в качестве целевой функции Q можно рассматривать суммарное число внутренних связей, которое надо максимизировать, т. е.

$$Q = K(X) = \sum_{p=1}^n w_{pp}(X) \rightarrow \max_X. \quad (5.74)$$

Таким образом, сформированная задача представляет собой задачу дискретного математического программирования. При ре-

шении задач ГА используется хромосома, в ней гены соответствуют m конструктивам, при этом значение i -го гена есть номер одного из n блоков, в который помещен i -й конструктив.

Общая задача компоновки разбивается на ряд подзадач, в каждой из них выбирается один из еще не распределенных конструктивов (по правилу T_i) и закрепляется за одним из блоков (по правилу Q_k). Пара правил (T_i, Q_k) в данном случае называется эвристикой, которая обозначается Θ_{ik} .

Назначаемые правила T_i, Q_k должны соответствовать общему критерию оптимальности, точнее, способствовать достижению оптимального значения критерия. В задаче компоновки для выбора очередного конструктива из числа нераспределенных можно использовать следующие правила: T_1 — берется конструктив, которому соответствует элемент $s_{ik}^{\max}$ матрицы S , т. е. имеющий наибольшее число связей; T_2 — берется конструктив, имеющий максимальное число связей с другими конструктивами, для него сумма элементов в строке матрицы S максимальна; T_3 — берется конструктив с максимальным числом связей с уже распределенными конструктивами, в матрице Y ему соответствует столбец с максимальной суммой элементов.

Для выбора блока можно использовать следующие правила: Q_1 — минимально загруженный блок; Q_2 — блок, конструктивы которого имеют максимальное число связей с i -м распределяемым конструктивом, т. е. блок с максимальным элементом y_{ji} текущей матрицы Y .

Для сформулированных правил можно использовать шесть различных эвристик:

$$\Theta_{11} = (T_1, Q_1), \quad \Theta_{21} = (T_2, Q_1), \dots, \quad \Theta_{32} = (T_3, Q_2).$$

Покажем расчет матриц Y и W на численном примере с $m = 7$ и $n = 3$.

Исходные матрицы C и S в соответствии с графом $G(V, R)$, представленным на рис. 5.10, равны

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 5 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 7 \\ 6 \end{matrix}.$$

В этом случае хромосома H имеет длину 7, номер гена соответству-

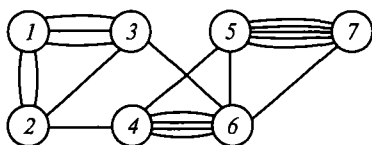


Рис. 5.10. Исходный граф $G(V, R)$

ет номеру элемента, а значение гена — номеру блока, в который помещен элемент, т. е.

$$H: \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline h_1 = b_j & h_2 = b_i & h_3 = & h_4 = & h_5 = & h_6 = & h_7 = b_k \\ \hline \end{array}$$

Пусть отобраны две особи родителей с хромосомами

$$P_1: \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 \\ \hline \end{array}, \quad P_2: \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 3 & 2 & 1 & 3 & 2 & 1 & 3 \\ \hline \end{array}.$$

Этим родителям соответствуют следующие матрицы X :

$$X(P_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad X(P_2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Для расчета матрицы $Y(P_i)$ в качестве вектора P_S используются соответствующие столбцы матрицы S . Запишем подробно вычисление $Y(P_1)$:

$$\begin{aligned} Y(P_1) &= X(P_1) \times P_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{s_1} \\ \\ P_{s_7} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} s_{11} + s_{41} + s_{71} & s_{12} + s_{42} + s_{72} & 0 \\ s_{21} + s_{51} & s_{22} + s_{52} & s_{27} + s_{57} \\ s_{31} + s_{61} & s_{32} + s_{62} & s_{37} + s_{67} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 3 & 3 & 0 & 6 & 5 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 5 \\ 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Матрица $W(P_1)$ для рассчитанного значения $Y(P_1)$ равна

$$\begin{aligned} W(P_1) &= Y(P_1)X^T(P_1) = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 3 & 3 & 0 & 6 & 5 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 5 \\ 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 9 & 8 \\ 9 & 0 & 2 \\ 8 & 2 & 2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Следовательно,

$$K(X(P_1)) = w_{11} + w_{22} + w_{33} = 2.$$

Аналогично выполняются вычисления для второго родителя:

$$\begin{aligned} Y(P_2) &= X(P_2)P_S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{s_1} \\ P_{s_2} \\ P_{s_7} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 3 & 3 & 0 & 6 & 5 & 0 \end{pmatrix} \\ W(P_2) &= Y(P_2)X^T(P_2) = \\ &= \begin{pmatrix} 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 3 & 3 & 0 & 6 & 5 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 8 \\ 2 & 0 & 9 \\ 8 & 9 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

и $K(X(P_2)) = 2$.

Используя эвристику $\Theta_{11} = (S_1, Q_1)$, запишем хромосому для третьего родителя. В результате получаем

$$P_3: \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array},$$

т. е.

$$\begin{aligned} X(P_3) &= \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \\ Y(P_3) &= X(P_3)P_S = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{s_1} \\ P_{s_2} \\ P_{s_7} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 5 \\ 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 0 & 1 & 4 & 0 \end{pmatrix} \\ W(P_3) &= Y(P_3)X^T(P_3) = \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 5 \\ 3 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 0 & 1 & 4 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 4 \\ 2 & 2 & 7 \\ 4 & 7 & 0 \end{pmatrix}$$

$$K(X(P_3)) = 2.$$

Для скрещивания отбираются родители P_1 и P_3 . Сечение отобранных родителей выполняется после третьего гена, т. е.

$$P_1: \boxed{1 \ 2 \ 3 \ 1 \ 2 \ 3 \ 1}, \quad P_3: \boxed{3 \ 1 \ 2 \ 3 \ 1 \ 2 \ 1}$$

В результате хромосомы двух потомков имеют вид

$$C_1: \boxed{1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 1 \ 2 \ 1}, \quad C_2: \boxed{3 \ 1 \ 2 \ 1 \ 2 \ 3 \ 1}$$

Результаты расчета для потомков показывают:

- для первого потомка

$$X(C_1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Y(C_1) = X(C_1)P_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{s_1} \\ P_{s_2} \\ P_{s_7} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 & 1 & 5 & 2 & 5 \\ 2 & 0 & 2 & 5 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 1 & 5 & 0 \end{pmatrix}$$

$$W(C_1) = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 & 1 & 5 & 2 & 5 \\ 2 & 0 & 2 & 5 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 1 & 5 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & 4 & 4 \\ 4 & 0 & 7 \\ 4 & 7 & 0 \end{pmatrix}$$

$$K(X(C_1)) = 10;$$

- для второго потомка:

$$X(C_2) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
Y(C_2) &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{s_1} \\ P_{s_2} \\ P_{s_7} \end{pmatrix} = \\
&= \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 & 6 & 5 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 5 \\ 0 & 2 & 4 & 4 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
W(C_2) &= \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 & 6 & 5 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 5 \\ 0 & 2 & 4 & 4 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 7 & 7 \\ 7 & 0 & 5 \\ 7 & 5 & 0 \end{pmatrix} \\
K(X(C_2)) &= 2.
\end{aligned}$$

После рекомбинации наилучший результат $K(X(C_1)) = 10$ получен для первого потомка. Для дальнейших расчетов формируются новые родительские пары с учетом эвристик (5.74) и значений критерия (5.74) для потомков. Процесс вычисления прекращается, когда полученное максимальное значение $K(X(H))$ при некотором заданном числе последующих рекомбинаций не будет превышено. Соответствующая хромосома H будет решением задачи компоновки.

5.10. Алгоритмы решения задач размещения

Для решения задач размещения (ЗР) применяется большое число алгоритмов. Наиболее распространены алгоритмы, использующие градиентные методы, метод ветвей и границ, а также эвристические алгоритмы и случайного поиска.

Последовательный алгоритм размещения однотипных элементов. С помощью этого алгоритма решается задача размещения n элементов $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ в установочные (посадочные) места $T = \{t_1, \dots, t_n\}$. Если число элементов меньше числа посадочных мест, то вводятся дополнительные фиктивные элементы. Элементы соединены между собой электрическими цепями из множества $C = \{c_1, \dots, c_k\}$. Часть элементов может быть закреплена за отдельными позициями. В качестве целевой функции может рассматриваться минимум длины связей или минимум суммы полупериметров прямоугольников, охватывающих электрические цепи.

Идея последовательного алгоритма состоит в том, чтобы на очередную позицию устанавливать элемент, максимально связанный с ранее размещенными. В качестве меры связности s_{ij} двух элементов v_i и v_j выберем число общих для них цепей, т. е.

$$s_{ij} = \sum_{k \in C(v_i) \cap C(v_j)} \sigma_k, \quad (5.76)$$

где $C(v_i)$ — подмножество цепей, связанных с элементом v_i ; σ_k — весовой коэффициент цепи c_k , обычно $\sigma_k = 1$. Если элементы, имеющие общей k -ю цепь, необходимо разместить как можно ближе, то берется $\sigma_k > 1$. Из значений s_{ij} образуется матрица связей $S = \|s_{ij}\|_{n \times n}$, в ней $s_{ii} = 0$, $i = \overline{1, n}$.

Если по условию задачи нет закрепленных элементов, то в первую позицию t_1 устанавливается элемент v_i , которому соответствует $C(v_i)$ с минимальным числом цепей. На очередное место устанавливается элемент, имеющий максимальное значение коэффициента связности с ранее размещенными, который для элемента v_v равен

$$K(v_v | J_{\text{разм}}) = \sum_{j \in J_p} s_{vj} - \left| \bigcap_{j \in J_p \cup \{v\}} C(v_j) \right| \quad (5.77)$$

где J_p — множество номеров размещенных элементов.

После выбора очередного элемента для него определяется оптимальное посадочное место из числа свободных. Для этого можно рассчитать суммарную длину связей до размещенных элементов. Такое последовательное размещение продолжается, пока не будут расставлены все элементы.

Значение критерия Q в виде суммы полупериметров прямоугольников, охватывающих цепи, рассчитывается по формуле

$$Q = \sum_{c \in C} [\Delta x(c) + \Delta y(c)];$$

$$\Delta x(c) = x_{\max}(c) - x_{\min}(c); \quad \Delta y(c) = y_{\max}(c) - y_{\min}(c).$$

где $x_{\max}(c)$, $y_{\max}(c)$ — максимальные координаты по осям x и y прямоугольника P_c , охватывающего все точки цепи c ; $x_{\min}(c)$, $y_{\min}(c)$ — минимальные точки координаты прямоугольника P_c .

В качестве примера рассмотрим решение задачи размещения шести элементов, электрическая схема соединения и схема позиций которых приведены на рис. 5.11. Таким образом, заданы множества $V = \{v_1, \dots, v_6\}$, $T = \{t_1, \dots, t_6\}$, $C = \{c_1, \dots, c_6\}$. Для расчета матрицы связей S определяются подмножества цепей $C(v) \subseteq C$ для каждого

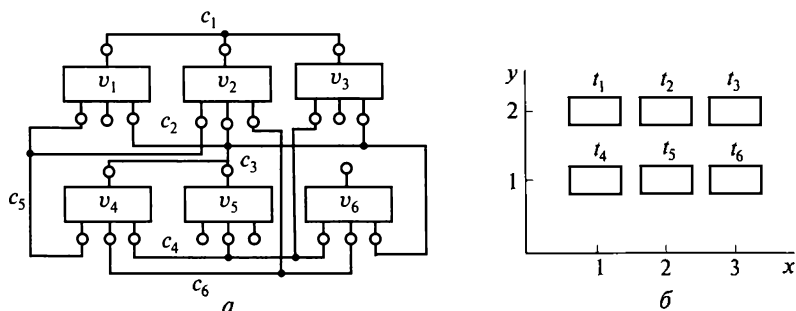


Рис. 5.11. Электрическая схема (а) и схема монтажного пространства (б)

элемента $v \in V$ В результате получаем

$$\begin{aligned} C(v_1) &= \{c_1, c_2, c_5\}; & C(v_2) &= \{c_1, c_3, c_5, c_6\}; & C(v_3) &= \{c_1, c_2, c_4\}; \\ C(v_4) &= \{c_3, c_4, c_5, c_6\}; & C(v_5) &= \{c_3, c_4\}; & C(v_6) &= \{c_2, c_4, c_6\}. \end{aligned}$$

На основе подмножеств $C(v)$, $v \in V$, по формуле (5.76) рассчитываются элементы s_{ij} матрицы S , например в предположении $\sigma_k = 1$ для всех цепей элемент

$$s_{1,2} = \sum_{k \in C(v_1) \cap C(v_2)} \sigma_k = \sum_{k \in \{c_1, c_5\}} \sigma_k = 2.$$

Матрица S для нашего примера имеет следующий вид:

$$S = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} & \begin{matrix} C(v) \\ |K(v \mid J_p = \{5\}) \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ & 0 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ & & 0 & 1 & 1 & 2 \\ & & & 0 & 2 & 2 \\ & & & & 0 & 1 \\ & & & & & 0 \end{pmatrix} & \begin{matrix} 3 & 0 \\ 4 & 1 \\ 3 & 1 \\ 4 & 2 \\ 2 - \min & - \\ 3 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

Справа от матрицы приведены мощности подмножеств $C(v)$. Так как элементу v_5 соответствует минимум $|C(v)|$, его следует разместить в t_1 . В результате $J_p = \{5\}$. Чтобы определить, какой элемент разместить в очередную позицию t_2 , рассчитывают коэффициенты связности по формуле (5.77):

$$\begin{aligned} K(v_1 \mid J_p) &= 0; & K(v_2 \mid J_p) &= 1; & K(v_3 \mid J_p) &= 1; \\ K(v_4 \mid J_p) &= 2; & K(v_6 \mid J_p) &= 1. \end{aligned}$$

Таким образом, с элементом v_5 максимально связан v_4 , поэтому он размещается в позицию t_2 .

Аналогично последовательно заполняются следующие установочные позиции.

Итерационный алгоритм с выделением «длинных» и «коротких» ребер. Идея данного алгоритма заключается в том, что после начального размещения в виде графа $G(V, R)$ для каждой вершины $v_i \in V$ множество R_i инцидентных ребер разбивается на два подмножества R'_i «коротких» ребер и R''_i «длинных» ребер. На основе такого деления определяются пары вершин, перестановки которых приводят к уменьшению суммарной длины связей, т. е. критерия (5.62). Ребра на «короткие» и «длинные» делятся с помощью граничной длины $l_{гр}$. Если длина связи l_{ij} между вершинами v_i и v_j меньше $l_{гр}$, то ребро r_{ij} считается «коротким» ($r_{ij} \in R'_i$). В случае, когда $l_{ij} > l_{гр}$, ребро r_{ij} относят к «длинным» ($r_{ij} \in R''_i$). Приблизительно $l_{гр}$ равна половине наибольшей длины связи l_{max} между элементами. Более точно $l_{гр}$ можно определить из соотношений

$$l'(l' - 1) < 0,5(l_{max} - 1); \quad l''(l'' - 1) < 0,5l_{max}(l_{max} - 1); \quad l' < l_{гр} < l''$$

Алгоритм состоит из следующих основных этапов.

1. Элементы $v \in V$ произвольно размещаются в установочных местах $t \in T$ монтажного пространства, например $v_1 \rightarrow t_1$, $v_2 \rightarrow t_2$ и т.д.
2. Рассчитывается значение граничной длины $l_{гр}$.
3. Для каждой вершины $v_i \in V$ множество инцидентных ребер R_i разбивается на подмножества «коротких» R'_i и «длинных» R''_i ребер и подсчитывается разность

$$\Delta R_i = |R''_i| - |R'_i|,$$

где $|R'_i|$ — число ребер в множестве R'_i (мощность множества R'_i).

4. Выделяется подмножество вершин элементов $V_n \subset V$, для которых $\Delta R_i > 0$.

5. Из подмножества V_n выбирается вершина v_v с максимальным числом инцидентных ребер (имеющая максимальную степень $s(v_v)$) или с максимальным значением ΔR_i , и относительно нее множество V делится на подмножества V'_v и V''_v . В V'_v включается вершина v_v и отстоящие от нее вершины на расстояние не больше $l_{гр}$, в подмножество V''_v — остальные вершины.

6. Формируется подмножество V_μ , в которое включаются вершины, инцидентные «длинным» ребрам v_v и $V_n \setminus v_v$, т. е. $V_\mu = V''_v \cap (V_n \setminus v_v)$.

7. Для вершин $v_j \in V_\mu$ подсчитывается число ребер $|R_j(V'_v)|$ и $|R_j(V''_v)|$, инцидентных вершинам подмножеств V'_v и V''_v соответ-

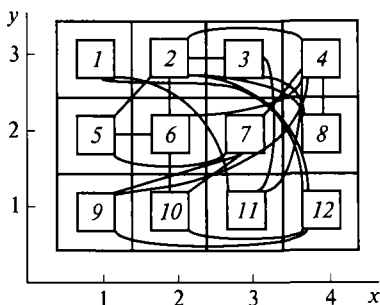


Рис. 5.12. Начальное размещение элементов

ственно, и затем вычисляется разность $\Delta R_j = |R_j(V'_v)| - |R_j(V''_v)|$. Определяется вершина v_μ , для которой $\Delta R_\mu = \max(\Delta R_j)$.

8. Проверяется выполнение условия, при котором целесообразна перестановка, т. е.

$$\Delta R_v + \Delta R_\mu > 0. \quad (5.78)$$

Если это условие выполняется, то вершины v_v и v_μ переставляются. В противном случае берется другая вершина из подмножества V_n и повторяются пункты 5—8.

9. После каждой перестановки вычисляется значение критерия Q по формуле (5.62).

Далее на каждой итерации выполняются пункты 3 — 9. Расчет прекращается, когда подмножество V_n станет пустым или для всех $v \in V_n$ условие (5.78) не выполняется.

Рассмотрим данный алгоритм на следующем примере. Пусть в результате начального размещения получен граф $G(V, R)$, представленный на рис. 5.12.

В соответствии с исходными данными максимальная длина ребра $l_{\max} = 5$ и в качестве граничного значения берется $l_{\text{гр}} \approx 2.5$. Значения $|R'_i|$, $|R''_i|$ и ΔR_i для всех вершин представлены в табл. 5.30.

Здесь вершина v_1 не содержит «коротких» ребер с $l_{ij} < l_{\text{гр}}$ и $|R'_1| = 0$, оба ребра $r_{1,11}$ и $r_{1,12}$, инцидентных v_1 , являются «длин-

Т а б л и ц а 5.30

Длины связей между элементами при начальном размещении

Вершина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$ R'_i $	0	4	3	3	3	3	3	2	0	3	1	1
$ R''_i $	2	2	0	3	0	1	1	0	3	0	2	3
ΔR_i	2	-2	-3	0	-3	-2	-2	-2	3	-3	1	2

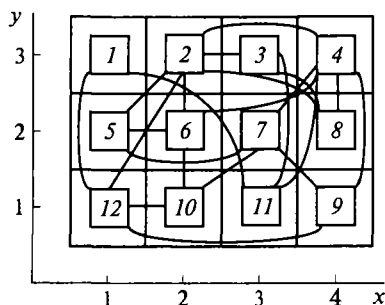


Рис. 5.13. Размещение элементов после первой итерации

ными», поэтому $|R'_1| = 2$ и $\Delta R_1 = |R''_1| - |R'_1| = 2$. Аналогично определяются ΔR_i и для других вершин.

Вершины с $\Delta R_i > 0$ образуют подмножество $V_n = \{v_1, v_9, v_{11}, v_{12}\}$. В качестве первой вершины v_v пары (v_v, v_μ) для перестановки выбирается вершина v_{12} , имеющая максимальную степень ($s(v_{12}) = 4$). Относительно нее множество V делится на подмножества $V'_{12} = \{v_4, v_7, v_8, v_{10}, v_{11}, v_{12}\}$ и $V''_{12} = \{v_1, v_2, v_3, v_5, v_6, v_9\}$.

Формируется подмножество

$$V_\mu = V''_{12} \cap (V_n \setminus v_{12}) = V''_{12} \cap \{v_1, v_9, v_{11}\} = \{v_1, v_9\}.$$

Для вершин v_1 и v_9 определяются числа $|R'_1(V_{12})| = 2$, $|R''_1(V_{12})| = 0$, $|R'_9(V'_{12})| = 3$, $|R'_9(V_{12})| = 0$ и далее вычисляются их разности:

$$\Delta R_1 = |R'_1(v_{12})| - |R''_1(v_{12})| = 2 \quad \text{и} \quad \Delta R_9 = |R'_9(v_{12})| - |R''_9(v_{12})| = 3.$$

Так как $\Delta R_9 > \Delta R_1$, то в качестве второй вершины v_μ пары (v_v, v_μ) выбирается v_9 . Условие (5.78) выполняется: $\Delta R_{12} + \Delta R_9 = 2 + 3 > 0$, следовательно, переставляются вершины v_{12} и v_9 . На этом первая итерация считается завершенной. Граф $G(V, R)$ после перестановки показан на рис. 5.13.

Аналогично выполняются последующие итерации до тех пор, пока не будет достигнуто $V_n = \emptyset$ или пока для любого $v \in V_n$ не будет выполняться условие (5.78).

Алгоритм, основанный на методе ветвей и границ. Во многих случаях исходные данные задачи размещения задаются в виде расширенной матрицы цепей схемы РЭА, расположения вертикальных и горизонтальных каналов в монтажном пространстве с числами магистралей в них (магистраль представляет собой часть канала). В качестве критерия берется минимум числа внутрисхемных пересечений (5.63).

Распиренная матрица цепей

$$C_{\text{ц}} = \|c_{i,j}\|$$

имеет n строк (по числу элементов) и в общем случае $2d \times 2r$ столбцов, где d — число контактов верхней (нижней) части элемента; r — число магистралей вертикального канала для соединения от верхних и нижних контактов. По матрице $C_{\text{ц}}$ рассчитывается вспомогательная матрица пересечений

$$P = \|p_{i,j}\|_{k \times k},$$

где k — число цепей; p_{ij} — число пересечений между фрагментами цепей c_i и c_j , расположенными в одном канале, причем фрагмент цепи c_i расположен под фрагментом c_j . Если фрагмент цепи c_i не может быть расположен ниже c_j , то $p_{ij} = \infty$.

В процессе решения задачи последовательно заполняются фрагменты цепей в пределах канала магистрали, начиная с первой (нижней). Основная идея алгоритма состоит в выборе фрагмента цепи для очередной магистрали, так чтобы число пересечений с остальными, еще не размещенными фрагментами было минимально. Для этого множество A всех допустимых размещений, т. е. решений задачи, разбивается на подмножества. Сначала заполняется первая магистраль, поэтому множество A разбивается на подмножества $A_{c_i}^{(1)}$, $i = \overline{1, k}$, решений задачи, в которых фрагмент цепи c_i расположен в первой магистрали (ниже всех остальных). Если минимальное значение критерия оптимальности (5.62) для канала обозначить $Q^*(A)$, то для подмножества решений $A_{c_i}^{(1)}$ значение критерия

$$Q(A_{c_i}^{(1)}) = Q^*(A) - \delta_{c_i},$$

где δ_{c_i} — дополнительное к значению $Q^*(A)$ число пересечений при расположении фрагмента цепи c_i на первой магистрали.

Очевидно, что в первой магистрали следует разместить фрагмент цепи, для которого величина δ_c минимальна. Величина δ_{c_i} рассчитывается по формуле

$$\delta_{c_i} = \sum_{j=1}^k \Delta p_{ij}, \quad (5.79)$$

где

$$\Delta p_{ij} = \begin{cases} p_{ij} - p_{ji}, & \text{если } p_{ij} > p_{ji}; \\ 0, & \text{если } p_{ij} \leq p_{ji}; \end{cases} \quad (5.80)$$

p_{ij}, p_{ji} — элементы матрицы P .

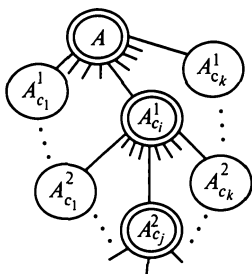


Рис. 5.14. Схема процесса ветвления множества решений

используется матрица P_1 , получаемая из P вычеркиванием строки и столбца, соответствующих цепи c_i , выделенной на первом шаге. В этом случае фрагмент цепи c_j на втором шаге выбирается из условия

$$Q(A_{c_j}^{(2)}) = Q(A_{c_i}^{(1)}) + \delta_{c_j}^{(1)} \rightarrow \min,$$

где $\delta_{c_j}^{(1)}$ рассчитывается по формуле

$$\delta_{c_j}^{(1)} = \sum_{l=1, l \neq i}^k \Delta p_{j,l}.$$

Такой процесс ветвления множества решений A (рис. 5.14) продолжается до тех пор, пока не получим подмножество из одного решения.

Если на каком-либо v -м шаге для нескольких фрагментов цепей $\delta_c^v = 0$, то эти цепи объединяют в один массив C_Σ^v , для которого выделяют подмножество решений $A_{C_\Sigma^v}^v$. Дальнейшее ветвление продолжается из вершины $A_{C_\Sigma^v}^v$. Если для нескольких цепей $c \in C_j$ минимальное значение δ_c равно или больше нуля, то строится матрица P'_j , содержащая столбцы и строки, соответствующие только этим цепям. Если снова минимальные значения δ_c для нескольких цепей $c \in C_l \subset C_j$ равны или больше нуля, то процесс сокращения матрицы продолжается, пока не будет получено $\delta_c = 0$. В результате решения задачи получаем упорядоченное множество цепей $C^* = (c_i, c_j, \dots)$, которое может содержать и массивы вида C_Σ^v .

Фрагменты цепей по магистралям на основе множества C^* размещаются в следующей последовательности: 1) фрагмент цепи c_i , выделенной на первом шаге, размещают на первой магистрали; если на первом шаге получен массив C_Σ , то его фрагменты раз-

Нулевое значение Δp_{ij} при $p_{ij} < p_{ji}$ указывает на то, что размещение фрагмента цепи c_i ниже фрагмента цепи c_j дает меньше пересечений, чем размещение фрагмента c_j по c_i .

Положительное значение Δp_{ij} , т.е. разности $p_{ij} - p_{ji}$, соответствует увеличению числа пересечений при размещении фрагмента c_i ниже c_j . В свою очередь, подмножество решений $A_{c_i}^{(1)}$ подразделяется на подмножества решений второго шага $A_{c_j}^{(2)}$, $j = \overline{1, k}$, $j \neq i$. Для анализа решений $A_{c_j}^{(2)}$ ис-

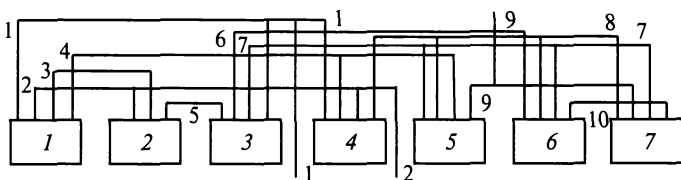


Рис. 5.15. Первоначальное размещение

мещаются на первых магистралях так, чтобы различные цепи не совмещались на одном участке магистрали; 2) берется фрагмент цепи c_j и для него определяется самая низкая магистраль, на которой он не совмещается с ранее размещенными цепями и т. д. После размещения подсчитывается число пересечений Q_2 .

Рассмотрим данный алгоритм на простом примере. Пусть требуется разместить соединения элементов по семи магистралям горизонтального канала с минимальным числом пересечений для схемы, приведенной на рис. 5.15.

Расширенная матрица цепей для схемы имеет следующий вид:

$$C_{\Pi} = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix}}^d & \overbrace{\begin{matrix} 5 \end{matrix}}^r \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \left(\begin{matrix} 1a & 2a & 3a & 4a & - \\ - & 2 & 3b & 5a & - \\ 5b & 6a & 7a & 1 & 1c \\ 1b & 4 & 2 & 8a & 2bc \\ 7 & 8 & 4b & 9a & 9d \\ 6b & 8 & 7 & 10a & - \\ 8b & 9b & 7b & 10b & - \end{matrix} \right) \end{matrix},$$

где a и b означают соответственно начало и конец цепи в магистрали горизонтального канала при распространении слева направо; c и d — начало и конец в магистрали вертикального канала при распространении сверху вниз. Число столбцов матрицы равно пяти, что соответствует четырем контактам верхней части элемента ($d = 4$) и одному вертикальному каналу при распространении сверху вниз.

Значения p_{ij} по матрице C_{Π} определяются следующим образом. Для первой строки матрицы P (цепь c_j) в матрице C_{Π} берутся начало цепи ($1a$) и конец ($1b$), затем, просматривая по строкам элементы матрицы C_{Π} от $1a$ до $1b$, подсчитываются пересечения с другими цепями (значения 1 и $1c$ не учитываются, так как они идут вниз). Так, при определении $p_{1,2}$ цепь c_2 встречается два раза ($c_{1,2} = 2a$, $c_{2,2} = 2$), значит $p_{1,2} = 2$.

При расчете p_{ij} следует учитывать, что элементы матрицы C_{Σ} с индексом d (фрагмент идет вверх по вертикальному каналу) дают дополнительное пересечение. Рассчитанная таким образом для десяти цепей вспомогательная матрица P имеет вид

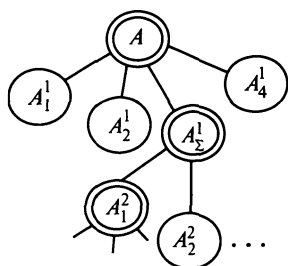
$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 1 & 0 & 2 & 1 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 4 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$\delta_{c_i}: \quad 4 \quad 4 \quad 0 \quad 6 \quad 0 \quad 6 \quad 5 \quad 0 \quad 3 \quad 0$$

С помощью формул (5.79), (5.80) определяются значения δ_{c_i} и Δp_{ij} . В частности, для цепи c_1 $\Delta p_{1,2} = 0$, так как $p_{1,2} - p_{2,1} = 2 - 3 = -1 < 0$; $\Delta p_{1,3} = p_{1,3} - p_{3,1} = 2$ и т.д.; $\delta_{c_1} = \sum_{i=2}^{10} \Delta p_{ij} = 4$.

Значения δ_{c_i} , $i = \overline{1,10}$, приведены под матрицей P . Так как $\delta_{c_3} = \delta_{c_5} = \delta_{c_8} = \delta_{c_{10}} = 0$, фрагменты цепей c_3 , c_5 , c_8 , c_{10} следует разместить на нижней магистрали канала, их соединяют в одну объединенную цепь C_{Σ} .

Вершины $A_3^{(1)}$, $A_5^{(1)}$, $A_8^{(1)}$, $A_{10}^{(1)}$ дерева решений также объединяют в одну $A_{\Sigma}^{(1)}$, $\Sigma = \{3, 5, 8, 10\}$. Дальнейший процесс решения начинается из $A_{\Sigma}^{(1)}$ (рис. 5.16). Для этого из матрицы P вычеркиваются строки и столбцы с номерами Σ , в результате получаем новую матрицу



$$P_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 4 & 6 & 7 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 4 \\ 6 \\ 7 \\ 9 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 3 & 2 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$\delta_{c_i}^{(1)}: \quad 0 \quad 1 \quad 3 \quad 5 \quad 3 \quad 1$$

Рис. 5.16. Схема ветвления решений задачи с объединенной цепью C_{Σ}

Затем подсчитываются $\delta_c^{(1)}$ и т.д.

Алгоритм случайного поиска. Задачи оптимального размещения элементов РЭС в монтажном пространстве по векторному критерию обычно решаются поисковыми методами. Рассмотрим применение алгоритма случайного поиска для векторного критерия, включающего три частных показателя: 1) минимум суммарной взвешенной длины соединений Q_1 ; 2) минимум числа пересечений проводников Q_2 ; 3) минимум числа соединений, длина которых более критической Q_3 .

Пусть множество V конструктивных элементов и множество R связей между ними, т. е. граф $G(V, R)$, задаются матрицей смежности $S = \|s_{ij}\|_{n \times n}$, где n — число элементов. Монтажное пространство задается множеством T установочных мест и расстояниями в виде матрицы длин D или списка координат позиций. По координатам позиций рассчитывается расстояние между ними (см. (5.65) или (5.66)).

Варианты размещения формируются с помощью генератора случайных чисел. Для варианта размещения на k -м шаге по формулам (5.62) — (5.64) рассчитываются значения показателей $Q_1^{(k)}$, $Q_2^{(k)}$, $Q_3^{(k)}$. Качество полученного размещения оценивается с помощью критерия

$$Q^{(k)} = \sum_{j=1}^3 c_j \frac{Q_j^{(k-1)} - Q_j^{(k)}}{Q_j^{(k-1)}},$$

где c_j — коэффициент, учитывающий важность j -го показателя.

Если $Q^{(k)} > 0$, то k -й вариант считается лучше предыдущего (или базового) и его принимают за новое базовое значение, в противном случае вариант отбрасывают. Обычно на первом шаге в качестве базовых значений выбирают заведомо большие числа $Q_{j \max} > 0$ (из области допустимых), поэтому при оценке первого варианта $Q^1 > 0$.

Процесс поиска продолжается до тех пор, пока значение критерия Q , соответствующее выбору нового базового варианта, на протяжении большого числа шагов, например 20—30, не будет меньше некоторой наперед заданной погрешности или пока не будет исчерпан лимит времени на решение задачи.

5.11. Алгоритмы решения задач трассировки

Задача трассировки при целевой функции в виде минимума суммарной длины всех соединений может быть сформулирована как задача построения для графа $G(V, R)$ покрывающего дерева минимальной длины, и сведена в дальнейшем к проблеме соедине-

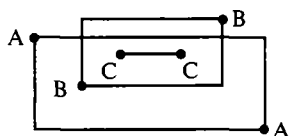


Рис. 5.17. Очередность проведения трасс

ния между собой пар дискрет. Большое значение при этом имеет определение очередности проведения трасс. Первыми обычно соединяются контакты, расположенные на кратчайшем расстоянии друг от друга или имеющие минимальный приоритетный номер (под приоритетным номером подразумевается количество кон-

тактов, подлежащих соединению, внутри прямоугольника, построенного на дискретах, через которые должна быть проведена трасса). Например, контакты, показанные на рис. 5.17, будут трассироваться в следующей последовательности: 1 — (C-C), 2 — (B-B), 3 — (A-A).

Трассировку соединений в большинстве случаев осуществляют с помощью эвристических алгоритмов и алгоритмов, основанных на методе динамического программирования. Общим для этих алгоритмов является разбиение монтажного поля на ячейки — дискреты, размеры которых выбирают исходя из ширины соединительных проводников и расстояния между ними.

Лучевые алгоритмы. Эти алгоритмы представляют собой упрощенные модификации волнового алгоритма. Они используются для печатных плат с невысокой плотностью монтажа или для трассировки значительной части соединений (до 70 — 80 %) с последующей доводкой другими способами. Достоинствами лучевых алгоритмов являются простота, быстроедействие, малый объем занимаемой памяти. Основной их недостаток — не гарантируется нахождение трассы, которая в действительности существует.

Решение задачи трассировки с помощью лучевого алгоритма сводится к серии задач проведения соединений минимальной длины между парами контактов, пересечение соединений не допускается. Для проведения трассы монтажное пространство (поле) делится на дискреты (ячейки) с учетом размеров контактов (выводов) элементов и максимальной ширины трассы. В ходе решения задачи все ячейки поля делятся на занятые (в них находятся контакты и ранее проведенные трассы) и свободные. Лучи L_i , $i = 1, 2, \dots$, распространяются шагами по свободным дискретам, за один шаг луч переходит в соседний дискрет. При встрече препятствия луч обходит его в соответствии с задаваемыми приоритетами движения. Приоритеты устанавливаются с учетом взаимного расположения соединяемой пары контактов.

В качестве примера рассмотрим лучевой алгоритм, предложенный Л.Б. Абрайтисом. Пусть в рассматриваемом алгоритме

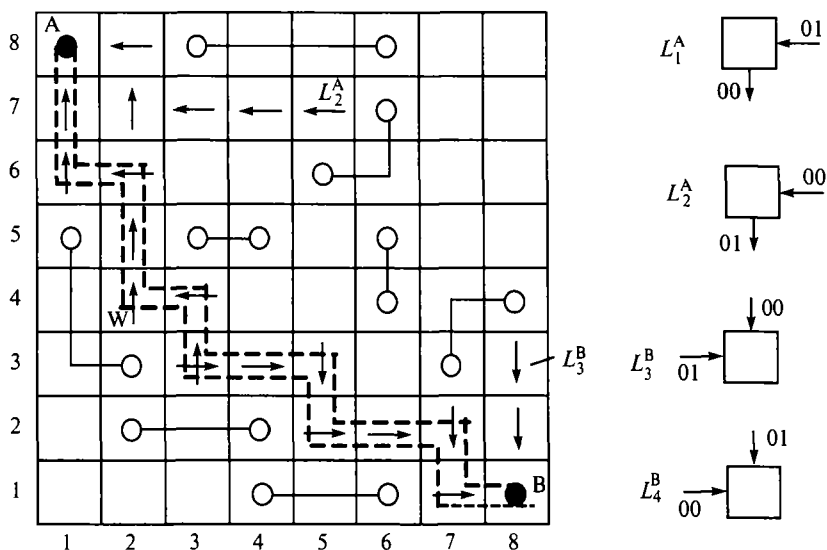


Рис. 5.18. Монтажное поле платы и приоритеты лучей

соединяются контакты P и Q , для них задаются лучи, например $L_1^P, L_2^P, L_3^Q, L_4^Q$ (по два для каждого контакта). Лучи L_1^P, L_2^P (или L_3^Q, L_4^Q) называются одноименными, лучи L_i^P, L_j^Q — разноименными. В общем случае число одноименных лучей может быть больше двух. Для каждого луча задаются приоритеты, например, если контакт P расположен выше и левее Q , то луч L_1^P может иметь приоритетное движение «вниз», а если соседний снизу дискрет занят, то движение «вправо». Такие приоритеты обозначаются стрелками, направленными в сторону, противоположную движению луча (рис. 5.18).

После задания лучей и их приоритетов начинается расчет пошагового одновременного распространения лучей. В ходе распространения отдельные лучи могут попадать в «ловушку», т. е. «блокироваться» занятыми дискретами (не могут их обойти), оставшиеся лучи продолжают движение.

Когда два разноименных луча L_i^P и L_j^Q встречаются, расположение лучей прекращается, а из точки встречи W проводятся два участка трассы WP и WQ по дискретам, отмеченным стрелками этих лучей. Если разноименные лучи не встретились, то решение следует повторить, увеличив число лучей или изменив приоритеты.

Рассмотрим использование лучевого алгоритма на простейшем примере. Монтажное поле представлено на рис. 5.18. Требуется

Траектории движения лучей

Номер шага	Лучи			
	L_1^A	L_2^A	L_3^B	L_4^B
1	1; 7	2; 8	8; 2	7; 1
2	1; 6	2; 7	8; 3	7; 2
3	2; 6	3; 7	Блокировка	6; 2
4	2; 5	4; 7	—	5; 2
5	2; 4	5; 7	—	5; 3
6	3; 4	Блокировка	—	4; 3
7	3; 3	—	—	3; 3

провести трассу между контактами A и B . Учитывая взаимное расположение соединяемых контактов, задаются четыре луча L_1^A , L_2^A , L_3^B , L_4^B с соответствующими приоритетами.

Распространение лучей представлено в табл. 5.31. Луч L_3^B блокирован на третьем шаге, луч L_2^A — на шестом. Лучи L_1^A и L_4^B встретились на седьмом шаге в дискрете W с координатами (3; 3), из этой точки трасса проходит к контактам A и B .

Задавая число лучей и направления приоритетов движения, а также порядок распространения лучей, можно получить различные модификации рассматриваемого лучевого алгоритма.

Волновой алгоритм. Волновой алгоритм (алгоритм Ли), основанный на методе динамического программирования, широко применяется при решении задач конструкторского проектирования печатных плат (ПП) с большой плотностью монтажа. Так как в алгоритме используются достаточные условия оптимальности, построение трассы здесь гарантируется, если она существует. Общее число протрассированных соединений максимально по сравнению с другими алгоритмами и в зависимости от плотности монтажа составляет 80—90 % общего числа трасс.

Основными положениями волнового алгоритма являются следующие.

1. Плоскость трассировки монтажного поля (платы, кристалла) разбивается на прямоугольные площадки — элементарные дискреты (ЭД) или ячейки заданного размера, который определяется допустимыми размерами проводников, выводов и расстояниями между ними. Задача проведения трассы между выводами (контактами) A и B состоит в определении последовательности соединяющих их ЭД.

2. Все ЭД подразделяются на занятые и свободные. Занятыми считаются дискреты, в которых находятся монтажные выводы

элементов, расположены проводники, построенные на предыдущих этапах, а также дискреты, соответствующие запрещенным для прокладки проводников участкам. Каждый раз при проведении новой трассы можно использовать лишь свободные дискреты, число которых по мере проведения трасс сокращается.

3. На множестве свободных дискрет коммутационного поля моделируется распределение волны из ячейки, в которой она зарождается (источник, исток), например А, в другую ячейку, подлежащую соединению с ней (приемник, сток), например В. Наиболее часто в качестве приемника и источника используют два ЭД. В некоторых модификациях волнового алгоритма в качестве источника, приемника выступают участки ранее проведенных трасс. Фронт волны распространяется дискретно (шагами, этапами). За первый шаг волна из А распространяется на соседние свободные дискреты $v_1[1], v_2[1], \dots$ (максимальное число их — четыре), имеющие с А общую сторону. На втором шаге фронт волны из дискрет $v_1[1], v_2[1]$, переходит на свободные соседние с последними ячейки $v_1[2], v_2[2], \dots$ т. е. дискреты $v_1[1], v_2[1], \dots$ как бы являются источниками волны на втором шаге. На третьем шаге фронт из $v_1[2], v_2[2]$ распространяется дальше на соседние дискреты. Такой процесс продолжается, пока фронт волны не достигает приемника В. При прохождении волны в дискретах проставляется номер шага, направление и «вес», характеризующий предпочтительность прохождения трассы по данной дискрете.

Например (рис. 5.19, а), на первом шаге волна из источника А (координаты (2,4)) переходит в дискреты (2,5), (2,3) и (3,4), этот путь отмечается стрелками, которые проставляются обратно ходу движения, в левом верхнем углу указывается номер шага. Заметим, что соседняя с А ячейка (1,4) занята выводом, там стрелка не ставится. На втором шаге волна распространяется из ячеек (2,5), (2,3), (3,4) дальше на соседние ячейки (1,3), (1,5), (2,2), (3,3), (3,5) и т. д.

Показатель веса дискреты p_i на i -м шаге определяется по формуле

$$p_i = p_{i-1} + \psi(Q_1, Q_2, \dots), \quad (5.81)$$

где p_{i-1} — показатель веса ячейки, из которой сделан шаг; $\psi(Q_1, Q_2, \dots)$ — положительная добавка, оценивающая качество пути в зависимости от выбранного критерия оптимальности проведения трассы, т. е. $p_i \geq p_{i-1}$. В ячейке-источнике (нулевой шаг) принимается $p_0 = 0$. Вес проставляется в правом нижнем углу (см. рис. 5.19, а).

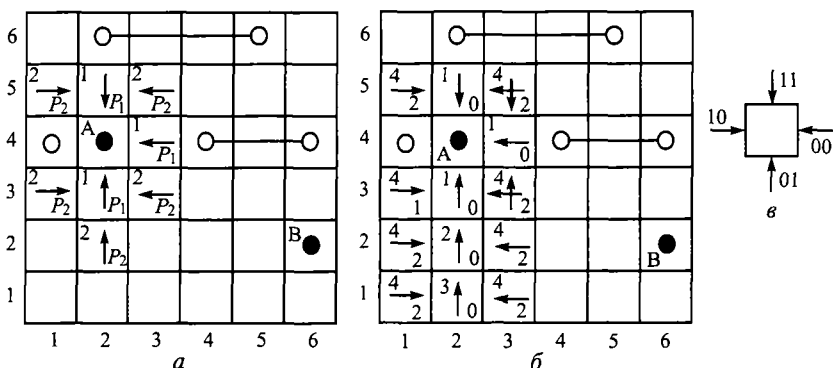


Рис. 5.19. Моделирование распространения волны (а, б) и приоритетный порядок движения (е)

Рассмотрим несколько примеров расчета показателя p_i . Если в качестве критерия берется минимум длины трассы, то вес рассчитывается по формуле

$$p_i = p_{i-1} - c, \quad c > 0. \quad (5.82)$$

где c — постоянная, характеризующая длину шага, если $c = 1$, то p_i совпадает с номером шага (и его можно не проставлять).

В случае, когда критерием является минимум числа поворотов,

$$p_i = \begin{cases} p_{i-1}, & \text{если нет поворота;} \\ p_{i-1} - a, & \text{если есть поворот,} \end{cases} \quad (5.83)$$

где a — положительное число (вес одного поворота), например $a = 2$.

Если требуется провести трассу, максимально отстоящую от ранее проведенных трасс, то

$$p_i = p_{i-1} - z, \quad (5.84)$$

где z — число занятых соседних ячеек.

Когда допускается пересечение ранее проведенных трасс (под прямым углом) и минимизируется число пересечений,

$$p_i = \begin{cases} p_{i-1}, & \text{нет пересечения;} \\ p_{i-1} - b, & \text{есть пересечение,} \end{cases} \quad (5.85)$$

где b — положительное число (вес одного пересечения), например $b = 5$.

Если требуется учесть несколько частных критериев оптимальности, то для расчета конструируется более общее соотношение на основе (5.81)—(5.85). Например, требуется провести трассу,

имеющую минимальную длину $c = 1$, а также минимальное число поворотов и пересечений, в этом случае, используя (5.83), (5.85), получаем

$$p_i = \begin{cases} p_{i-1} - 1, & \text{нет поворота и пересечения;} \\ p_{i-1} - 1 - a, & \text{есть поворот (нет пересечения);} \\ p_{i-1} - 1 - b, & \text{есть пересечение (нет поворота);} \\ p_{i-1} - 1 - a - b, & \text{есть поворот и пересечение.} \end{cases} \quad (5.86)$$

Важно отметить, что при использовании соотношений (5.82) — (5.86) фронт волны распространяется сначала по дискретам, в которых не происходит увеличение веса.

Рассмотрим начальные шаги при минимизации числа поворотов трассы. Первые три шага делаются без поворотов (с весом $p_0 = 0$), на четвертом шаге осуществляется поворот направления движения волны (рис. 5.19, б, вес поворота $a = 2$).

В ряде случаев при определении направления движения волны возникает неопределенность. Например (см. рис. 5.19, а), решается задача проведения трассы от А к В минимальной длины, т. е. вес p_i рассчитывается по формуле (5.82). В этом случае на втором шаге в дискретах (3, 3) и (3, 5) направление распространения волны может быть по вертикали и по горизонтали. Для исключения такого рода неопределенностей устанавливается предпочтительность движения волны по разным направлениям, т. е. вводится приоритетный порядок движения, учитывающий взаимное расположение источника А и приемника В. Приоритетный порядок задается числовыми кодами направлений движений, чем меньше число, тем предпочтительнее направление.

Например, источник А расположен левее и выше, в этом случае наиболее предпочтительно движение вправо, затем вниз, если эти направления невозможны, то волна распространяется влево или вверх, этим четырем направлениям соответствуют коды 00, 01, 10, 11 (рис. 5.19, в). Согласно выбранным приоритетам в ячейках (3, 3) и (3, 5) следует поставить стрелки справа. Заметим, что в случае неопределенности с направлением при минимизации числа поворотов в соответствующей дискрете ставятся две стрелки, например в (3, 3), (3, 5) (см. рис. 5.19, б).

При расчете на ЭВМ для указания движения волны дискретам вместо стрелок присваиваются коды 00, 01, 10, 11 координат (см. рис. 5.19, в).

4. Когда фронт волны достигает приемника В, моделирование волны прекращается и трасса (путь) проводится из точки В в А, т. е. в обратном (движению волны) порядке, по дискретам с мо-

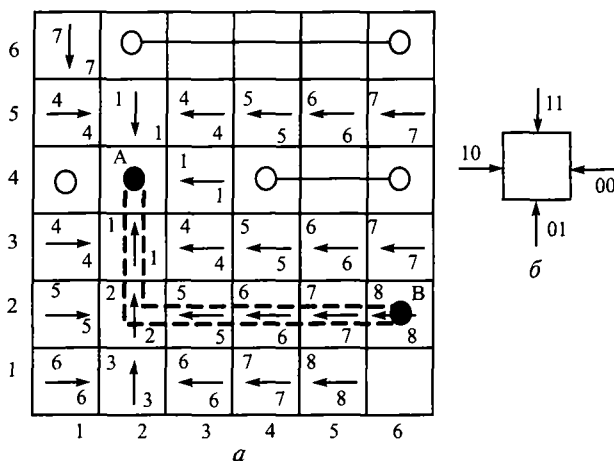


Рис. 5.20. Пример трассировки платы (а) и приоритетный порядок (б)

нотонным убыванием веса p_i по направлению стрелок (значений путевых координат).

На рис. 5.20, а показан ход распространения волны из А в В и проведение трассы при минимизации длины и числа поворотов трассы, т. е.

$$p_i = \begin{cases} p_{i-1} - 1, & \text{движение без поворота;} \\ p_{i-1} - 3, & \text{движение с поворотом.} \end{cases}$$

Фронт волны достигает приемника В на восьмом шаге из ячейки (5, 2). Трасса из В в А проводится по дискретам (5, 2), (4, 2), (3, 2), (2, 2), (2, 3). Качество данной трассы оценивается суммарным весом 8 (длина 6 и поворот 2), это оптимальная трасса, трассы с меньшим весом нет. Если трассу провести по дискретам (6, 3), (5, 3), (4, 3), (3, 3), (2, 3), то ее вес будет 10 (длина 6 и два поворота 4).

Разработаны различные модификации волнового алгоритма, которые позволяют решать задачи проведения трасс для соединения нескольких контактов, выполнять трассировку многослойных печатных плат и др.

Трассировка многослойных печатных плат. Задачи трассировки соединений многослойных ПП являются самыми распространенными и наиболее трудными, рассмотрим их на примере двухслойных печатных плат (ДПП). При трассировке ДПП в качестве модели монтажного пространства рассматриваются два дискретных рабочих слоя (поля), связанных между собой переходами. Соединяемые контакты А, В находятся в соответствующих дис-

кретах обоих слоев. Один из основных критериев — минимальное число переходов между слоями. Большинство алгоритмов трассировки ДПП представляет собой развитие волнового и лучевого алгоритмов. Рассмотрим некоторые варианты таких алгоритмов.

Во всех алгоритмах можно выделить два основных этапа. На первом этапе волна (лучи) от источника А в каждом слое шагами распространяется на соседние свободные дискреты. При распространении волны выделяются дискреты для перехода из одного слоя в другой. В занимаемых волной дискретах проставляется «вес», характеризующий качество пути. Распространение волны продолжается, пока в одном из слоев ее фронт не достигнет приемника В. На втором этапе трасса проводится из В в А. Трасса начинается в слое, где дискрет с В имеет предпочтительный вес. Если на пути трассы встречается препятствие, то путь проходит через один из выделенных дискретов в другой слой, где продолжается, пока не достигнет источника А или не встретит препятствие. Иногда проводят два варианта трассы: один с началом в первом слое, другой — во втором.

Рассмотрим один из алгоритмов трассировки ДПП на простейшей схеме, представленной на рис. 5.21. Здесь при распространении волны в каждой ячейке проставляются два числа, первое характеризует длину пути (от источника А), что указывает и на число шагов, второе — число переходов из слоя в слой. Первый этап данного алгоритма (распространение волны) продемонстрирован на рис. 5.21, а.

За первый шаг волна из ячейки А с координатами (2, 1), имеющей «вес» 0; 0, распространяется в первом слое в дискреты (1, 1), (2, 2), (3, 1) и соответствующие дискреты во втором слое. Во всех этих дискретах проставляется вес 1; 0, т.е. длина пути 1, число переходов между слоями 0. На втором шаге в первом слое волна занимает свободные дискреты (1, 2), (3, 2), а во втором слое — (1, 2), (2, 3), (3, 2), их вес 2; 0.

На третьем шаге в первом слое волна приходит в ячейку (4, 2) с весом 3; 0 и в (2, 4) с весом 3; 1, а во втором слое в ячейке (2, 4) с весом 3; 0 и в ячейке (3, 3) с весом 3; 0. Для ячейки (2, 4) первого слоя вторая цифра увеличилась (с 0 до 1), так как из ячейки (2, 4) первого слоя можно попасть в источник А без увеличения длины трассы, лишь перейдя во второй слой. Данная ячейка выделяется для возможного перехода. Характерным признаком ячеек, в которых планируется переход на другой слой, является большее на одно значение второй цифры по сравнению с соответствующей ячейкой другого слоя.

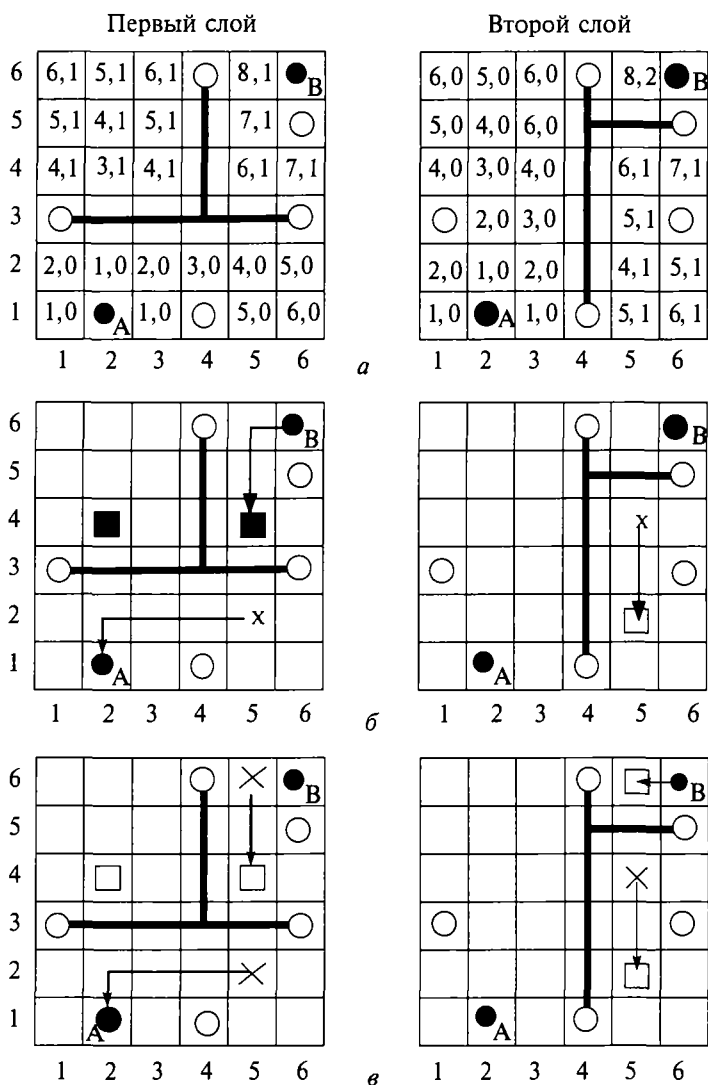


Рис. 5.21. Моделирование распространения волны в ДПП (а) и проведение трассы с началом в первом (б) и во втором (в) слое

Аналогичным образом на четвертом шаге выделяется ячейка (5,2) для перехода из второго слоя в первый, на шестом — (5,4) (переход из первого слоя) и на восьмом — ячейка (5,6) (переход из второго слоя).

На девятом шаге волна достигает приемника В, причем в первом слое с весом 9; 1, во втором — 9; 2. Таким образом, первая

цифра l (длина) увеличивалась по формуле $l_i = l_{i-1} - 1$, а вторая цифра α (число переходов из одного слоя в другой) в соответствии с отношением

$$\alpha_i = \begin{cases} \alpha_{i-1}, & \text{переход не планируется;} \\ \alpha_{i-1} - 1, & \text{переход планируется.} \end{cases}$$

Второй этап показан на рис. 5.21, б. Проведение трассы из точки В начинается в первом слое, так как ее вес по α меньше. Трасса проходит по дискретам с убыванием l , т. е. (6, 6), (5, 6), (5, 5), (5, 4). В дискрете (5, 4) осуществляется переход во второй слой, где трасса проводится по ячейкам (5, 4), (5, 3), (5, 2). Далее переход в первый слой ячейки (5, 2), (4, 2), (2, 2), (2, 1). Если трассу начать во втором слое, то потребуется три перехода (пунктир на рис. 5.21, в).

При трассировке двуслойных печатных плат широко используются модификации волнового алгоритма, отличающиеся критерием качества (минимальная длина трассы, минимум поворотов трассы, минимум числа межслойных переходов, комплексный критерий) и способом планирования переходов.

Контрольные вопросы

1. Какие группы задач выделяют при проектировании РЭС?
2. Каковы особенности задач, решаемых при схемотехническом проектировании?
3. Как формулируется задача выбора оптимального варианта проектного решения?
4. Какие методы используются для решения задач в условиях полной неопределенности?
5. Что характеризует коэффициент конкордации?
6. Какие методы используются для принятия проектных решений в условиях частичной неопределенности?
7. Приведите пример формулировки задачи в условиях частичной неопределенности.
8. Какие вы знаете методы, позволяющие вносить коррекцию в принимаемое решение с учетом новой информации?
9. Какие виды может иметь функция принадлежности нечетких множеств?
10. Приведите примеры лингвистической переменной и нечеткого множества.
11. Приведите пример продукционного правила.
12. Как формулируется задача структурного синтеза?
13. Какие методы используются для решения задач структурного синтеза?
14. Как формулируется задача параметрического синтеза?

15. Какие методы используются для решения задач параметрического синтеза?

16. Приведите примеры задач конструкторского проектирования.

17. Какие методы используются для решения задач компоновки?

18. Приведите пример математической постановки задачи компоновки.

19. Каковы достоинства и недостатки последовательного алгоритма решения задачи компоновки?

20. Каковы достоинства и недостатки итерационного алгоритма решения задачи компоновки?

21. Приведите пример математической постановки задачи размещения.

22. Какие алгоритмы используются для решения задач размещения?

23. Какие целевые функции используются в задачах размещения?

24. Каковы достоинства и недостатки последовательного и итерационного алгоритмов решения задач размещения?

25. Какие правила останова используются в алгоритме случайного поиска?

26. Приведите пример математической постановки задачи трассировки печатной платы.

27. Какие методы применяются для решения задач трассировки?

28. Приведите примеры критериев, используемых в задачах трассировки.

29. Приведите примеры ограничений в задачах трассировки.

30. Какова идея волнового алгоритма решения задач трассировки?

В настоящее время широко используются термины «новые, новейшие и современные информационные технологии», «высокие технологии» и др. Общепринятых определений для этих терминов нет. Наиболее часто под новыми понимают ИТ, использующие новые инфологические и компьютерные средства, средства связи для получения, сбора передачи, хранения и обработки (актуализации) информации. Во многих случаях предполагается, что в новых ИТ применяются методы искусственного интеллекта. Понятие «высокие технологии» обычно связывают с качественными изменениями состава, характера и методов решаемых задач, т.е. высокие технологии позволяют решать задачи, которые не могли решаться с помощью обычных технологий.

Новые ИТ классифицируются по различным признакам. В зависимости от состава пользователей различают новые технологии корпоративной работы и технологии индивидуальной работы. По направлениям развития выделяют следующие новые ИТ: *коммуникативные* технологии, решающие проблемы связи, общения, коммуникаций; *когнитивные* технологии, обеспечивающие получение, актуализацию и представление знаний, использование методов искусственного интеллекта для принятия решений; *инструментальные* технологии, связанные с созданием и совершенствованием инструментария (среды) для построения и обслуживания других технологий. Свойства новых ИТ наглядно проявляются в системах поддержки принятия решений, экспертных системах, интеллектуальных САПР и др.

6.1. Информационные системы поддержки принятия решений

На всех этапах ЖЦ проектирования РЭС для преодоления трудностей, связанных с неопределенностью и нечеткостью исходных данных, неточностью, а иногда и с отсутствием математических моделей, находят применение системы поддержки принятия

решений (СППР), или DSS (Decision Support Systems). Математическое обеспечение систем поддержки принятия решений применительно к решению задач системотехнического проектирования рассмотрено в подразд. 5.2—5.4.

СППР используются для решения широкого круга важных задач: выбора варианта стратегического развития предприятия; оценки степени соответствия возможных вариантов проектных и управленческих решений предъявляемым требованиям и предпочтениям; ранжирования альтернативных вариантов по итоговой степени предпочтительности и др.

К особенностям СППР как информационных систем можно отнести:

- более дружелюбный интерфейс (за счет использования элементов естественного языка);
- применение специальных структур хранения данных, в которых реализуются сложные пространственно-временные и концептуальные зависимости между данными;
- наличие гибких аналитических процедур, использующих предварительное вычисление интегрированных показателей, а также правил принятия решений на основе специальных аналитических технологий и хранилищ данных (Data Warehouse).

Интерфейс СППР обеспечивает пользователю следующие возможности: ведение диалога на всех этапах решения задачи ППР, в том числе при вводе входных данных, проведении вычислительных экспериментов, выдаче рекомендации и т. п.; выдачу промежуточных и окончательных результатов в наиболее удобном виде; выбор методов и моделей, необходимых для решения проектных и управленческих задач; исследование различных режимов работы систем, в том числе идентификационного (для получения требуемой модели), имитационного (проведение вычислительных экспериментов), экспертного (анализ и использование ранее полученных результатов) и др.

Задача принятия проектного решения (ЗППР) обычно содержит следующие компоненты [21]: множество V альтернативных вариантов проектного решения; критерий Q (обычно векторный), который позволяет сопоставлять варианты $v \in V$ на соответствие поставленным целям проектирования; модель (алгоритм) M , позволяющая рассчитывать значения $Q(v)$, $v \in V$; множество S различных ситуаций (состояний внешней среды), которые могут повлиять на значения $Q(v)$, $v \in V$ при реализации проекта; решающее правило R для выбора наиболее перспективного варианта.

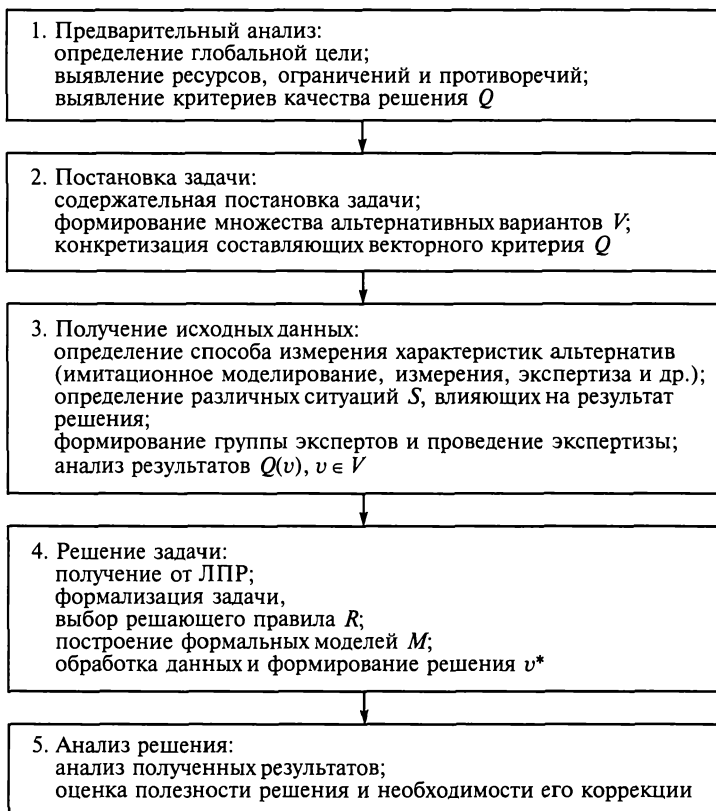


Рис. 6.1. Обобщенная схема процесса принятия решений

Сокращенно ЗППР может быть представлена кортежем

$$\langle V, Q, M, S, R \rangle.$$

Процесс принятия решений в большинстве случаев имеет многостадийный и итерационный характер. В этом процессе можно выделить следующие основные этапы: 1) предварительный анализ решаемой проблемы; 2) постановка задачи; 3) получение исходных данных; 4) непосредственное решение задачи; 5) анализ полученных результатов. Обобщенная схема процесса принятия решений и содержание этапов приведены на рис. 6.1.

Структура автоматизированной СППР приведена на рис. 6.2 [4, 28]. В качестве информационных средств в системах поддержки принятия решений широко используются хранилища данных и средства аналитической обработки в реальном времени (OLAP-средства, On-Line Analytical Processing).

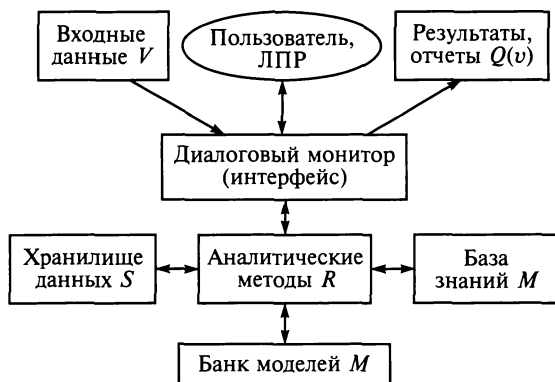


Рис. 6.2. Структура автоматизированной СППР

Различают OLAP-системы на реляционных СУБД и специализированные OLAP-системы. В первом случае аналитическая обработка многомерных данных связана с просмотром большого числа записей из множества таблиц, что существенно снижает производительность решения задач. В специализированных OLAP-системах многомерный анализ данных выполняется более оперативно, однако здесь накладываются существенные ограничения на объем базы данных. Данные в этих системах хранятся в виде гиперкубов или поликубов, т. е. многомерных таблиц с постоянным или переменным числом ячеек соответственно [21]. Широкое распространение получила OLAP-система Oracle Express, предоставляющая возможность пользователям (экспертам, консультантам, ЛПР) получать данные в виде разрезов многомерных таблиц при обосновании вырабатываемых решений.

Большинство систем DSS имеют средства консультирования в виде модулей, содержащих советы по преодолению противоречий и другие рекомендации при выборе решений, например, в процессе проектирования РЭС.

Во многих СППР используются методы и приемы инженерного творчества и решения изобретательных задач, в частности компьютерные методы поискового конструирования. Основу компьютерной системы поискового конструирования составляют программное обеспечение в виде пакета прикладных программ и информационное обеспечение, включающее базы знаний и данных. При поисковом конструировании (проектировании) выделяют пять этапов и соответственно пять типов задач [4]:

- 1) формирование концептуальной модели, цели и функций (ограничений) проектируемой РЭС;

- 2) выбор (поиск) наиболее эффективного физического принципа действия объекта для конкретных условий и требований;
- 3) выбор (поиск) наиболее рационального технического решения (схемы) при рассматриваемом физическом принципе действия;
- 4) оптимизация значений параметров для заданного технического решения;
- 5) решение задач графического отображения, дизайнерского оформления и технологии производства.

Для решения данных задач широко используются методы искусственного интеллекта, т. е. новые информационные технологии [26]. Например, с применением методов морфологического анализа и синтеза на И-ИЛИ-графах задача автоматизированного проектирования решается следующим образом.

1. Строится и вводится в ЭВМ обобщенный И-ИЛИ-граф рассматриваемого класса систем. Вершинами графа являются элементы системы и их признаки, а дуги показывают иерархическую соподчиненность между элементами и их признаками, а также принадлежность признаков элементам. Множество вершин разбивается на два непересекающихся подмножества вершин И и ИЛИ. В вершинах И располагаются элементы системы, выполняющие различные функции, а также признаки элементов, относящиеся к разным группам признаков. Вершины ИЛИ объединяют альтернативные элементы с одинаковыми функциями.

2. В ЭВМ вводится перечень функциональных технических требований, предъявляемых к разрабатываемой системе, а также список дополнительных требований (к надежности, технологичности и т. п.) и весовые коэффициенты требований.

3. В автоматическом режиме проводится усечение обобщенного И-ИЛИ-графа по основным требованиям рассматриваемой системы.

4. Определяется число вариантов системы, оставшихся на усеченном И-ИЛИ-графе. Если это число велико (десятки), то проводится дополнительное усечение за счет усиления отдельных функциональных и дополнительных требований. Если же множество альтернатив пустое, то часть требований ослабляют.

Определенные особенности имеют компьютерные системы для поддержки динамических процессов принятия решений [4]. Эти системы имеют более широкий состав процедур и соответствующих программных модулей. Данное обстоятельство связано с необходимостью получать оценки приоритетности альтернатив в зависимости от времени. Для этого в базе данных должны храниться наборы функций, которые аппроксимируют динамику изменения

предпочтений, а также алгоритмы численного решения задач прогнозирования об изменении предпочтительности одних альтернатив перед другими на некотором временном отрезке.

6.2. Экспертные системы

Экспертные системы (ЭС) относятся к классу систем искусственного интеллекта, они способны строить логические выводы, осуществлять обобщения и формировать заключения на основе использования знаний и данных, подобно тому как это делают специалисты в своей области при выработке умозаключений. Реализуются ЭС в виде программных комплексов, которые называют интеллектуальными системами. Эти системы на основе знаний в конкретной предметной области могут строить логические выводы и обеспечивать решение специфических задач.

Современные электронные САПР, использующие при решении задач анализа и синтеза радиосистем базы знаний, также могут быть отнесены к классу экспертных систем. Иногда говорят о применении ЭС в САПР, если в них задачи синтеза решаются не с помощью формальных математических методов, а на основе опыта и рекомендаций экспертов [21].

Экспертные системы обладают возможностями, позволяющими пользователю решать задачи, которые в отсутствии эксперта (специалиста в предметной области) правильно решить невозможно. Это обеспечивается тем, что они содержат в памяти необходимый объем знаний о конкретной предметной области, используют результаты большого опыта работы в этой области, а также позволяют точно сформулировать и правильно решить исследуемую задачу.

В качестве определения ЭС можно использовать следующее [19]: «Под экспертной системой понимается система, объединяющая возможности компьютера со знаниями и опытом эксперта в такой форме, что система может предложить разумный совет или осуществить разумное решение поставленной задачи. Дополнительной характеристикой такой системы, которая многими рассматривается как основная, является способность системы пояснить, по требованию, ход рассуждений в понятной для спрашивающего форме».

Основными требованиями, предъявляемыми к экспертной системе, являются следующие: использование знаний, связанных с конкретной предметной областью; способность приобретения знаний от экспертов; решение реальных и сложных задач; наличие

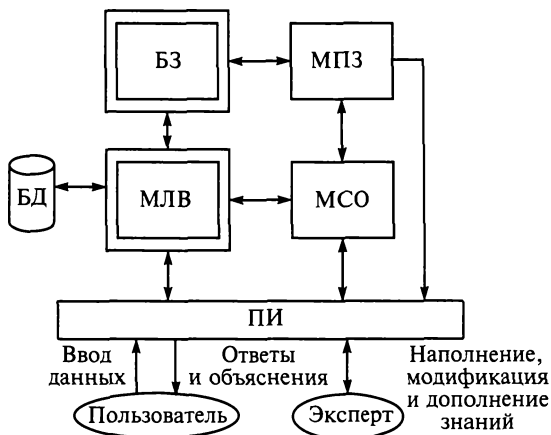


Рис. 6.3. Структурная схема экспертной системы:

БЗ — база знаний; БД — база данных; МЛВ — механизм логических выводов;
 МПЗ — модуль приобретения знаний; МСО — модуль советов и объяснений;
 ПИ — пользовательский интерфейс

способностей, присущих экспертам. В качестве экспертов могут выступать опытные проектировщики, программисты, консультанты, экономисты, врачи, преподаватели, переводчики и другие квалифицированные специалисты в соответствующих областях. Так как создание экспертных систем стало возможным лишь с развитием ЭВМ, то их иногда рассматривают как компьютерные системы, использующие логику экспертов.

Пример структурной схемы экспертной системы приведен на рис. 6.3. Ядром экспертной системы является база знаний (БЗ), которая содержит знания из конкретной предметной области. В БЗ содержатся как общие знания, так и информация о частных случаях. Пользователи и эксперты взаимодействуют с ЭС через пользовательский интерфейс. Механизм логических выводов (создатель заключений) применяет знания и сведения из баз знаний и данных при решении реальных задач. Модуль приобретения знаний позволяет пополнять и модифицировать знания в процессе эксплуатации системы. Модуль советов и объяснений выдает заключения, позволяет программе пояснить пользователю свое «рассуждение», дать ответы на вопросы «как?» и «почему?».

Экспертные системы должны в качестве выходной информации наряду с получаемым решением выдавать два вида объяснений: объяснения полученного решения и объяснения по запросу. Объяснение полученного решения в случае необходимости должно пояснить пользователю процесс решения задачи, ход рассужде-

ний. В объяснениях по запросу может потребоваться информация об используемых моделях, методах, значениях переменных, параметров и т. д.

Экспертную систему можно рассматривать как прикладную диалоговую систему искусственного интеллекта (ИИ), способную получать, накапливать, корректировать знания из некоторой предметной области (обычно поставляемые специалистами-экспертами), выводить новые знания, находить на основе этих знаний решения практических задач, близкие по качеству к решениям экспертов, и по запросу пользователя объяснять ход решения в понятной для него форме. ЭС развивались в ходе исследований в области ИИ.

От обычных прикладных программ, решающих строго определенные математические задачи по точным детерминированным алгоритмам, ЭС отличаются тем, что они решают неформализованные (слабоформализованные) и слабоструктурированные задачи. Алгоритмическое решение таких задач или не существует в силу неполноты, неопределенности, неточности, расплывчатости рассматриваемых ситуаций и знаний о них, или решения неприемлемы на практике в силу сложности строгих и точных алгоритмов. Поэтому ЭС используют логический вывод и эвристический поиск решения.

От систем поддержки принятия решений, которые опираются на математические методы и модели, ЭС отличаются тем, что базируются на эвристических, эмпирических знаниях, оценках, методах, которые получены от экспертов, и, кроме того, способны анализировать и объяснять пользователю свои действия и знания. Кроме того, в отличие от СППР технология экспертных систем позволяет пользователю принять решение, превосходящее его возможности (заметим, что СППР обеспечивают поддержку принятия решений в соответствии с интеллектом пользователя). Для этого в ЭС используется новый компонент информационной технологии — экспертные знания.

Основными свойствами для большинства ЭС являются следующие: ЭС имитирует рассуждения человека-эксперта при неточных и неполных данных, т. е. при решении слабоформализованных или неформализованных задач; применение ЭС жестко ограничено узкой предметной областью; ЭС содержат блок обоснования цепочки рассуждений (механизм логических выводов); содержащиеся в БЗ системы знания четко отделены от механизма вывода; в ЭС предусмотрена возможность постепенного наращивания знаний; мощность ЭС обусловлена мощностью БЗ; знания, накоп-



Рис. 6.4. Классификация экспертных систем

ленные в ЭС, должны позволять получать эффективные решения неформализованных задач в основном эвристическими методами.

С точки зрения задач, которые решают ЭС, они делятся на два класса. Системы первого класса предназначены для повышения уровня знаний специалистов в различных предметных областях, а ЭС второго класса выполняют функции консультирующих (или диагностирующих) систем.

Экспертные системы классифицируются по разным признакам (рис. 6.4). По способу функционирования выделяют ЭС, основанные на правилах, ЭС на базе моделей, ЭС, использующие рассуждения на основе опыта, и гибридные ЭС [17].

Экспертные системы, основанные на правилах (ЭСП), используют знания экспертов в простой форме, например в виде системы продукционных правил. Для этих ЭС характерна относительная простота их разработки, так как правила легко накапливать, реализовывать и тестировать. ЭСП имеют хорошие результаты применения в узких предметных областях. К недостаткам ЭСП относятся следующие: обычно правила носят эвристический характер и не охватывают знаний, основанных на моделях; в них отсутствует теоретическое обоснование; эвристические правила не проявляют робастности при «неожиданных» исходных данных, они оказываются неприменимыми на границе предметной области, при столкновении с новыми проблемами.

Экспертные системы, основанные на моделях (ЭСМ), при решении задач используют функциональные и структурные знания о предметной области, это позволяет решать часть задач, не предусмотренных при создании ЭС. В ЭСМ имеется возможность возвращаться к исходным данным при «столкновении» с новой проблемой, кроме того, базирование на теоретических научных знаниях позволяет использовать знания в разных задачах. В качестве недостатка ЭСМ следует указать, что они не используют известные экспериментальные данные и знания, относящиеся к предметной области. Кроме того, здесь необходимы точные модели описания предметной области, однако во многих реальных случаях хорошо определенная научная теория для построения точных моделей отсутствует. Разработка комплекса точных моделей, для ЭСМ обычно связана с проведением сложных и трудоемких исследований.

Экспертные системы, основанные на опыте (ЭСО), по сравнению с ЭСП и ЭСМ имеют ряд достоинств. При создании БЗ здесь можно непосредственно использовать имеющийся практический опыт или сведения, полученные из научно-технических публикаций, т. е. обойтись без привлечения экспертов. В ЭСО значительно сокращаются рассуждения и время решения задач, если известны аналогичные случаи, называемые шаблонами. ЭСО позволяют избежать прошлых ошибок и использовать удачные результаты, в том числе в сложных ситуациях. В них реализуется простая аддитивная модель приобретения знаний и не требуется анализ знаний о предметной области; имеется возможность использования стратегий индексирования для выбора соответствующих случаев из БД. К недостаткам ЭСО следует отнести то, что в них не учитываются глубокие знания о предметной области, это может приводить к ошибочному применению опыта; использование излишне большой БД в ЭСО приведет к снижению производительности их работы. Кроме того, имеются трудности в определении хороших критериев для индексирования и сравнения случаев.

Создание *гибридных экспертных систем (ГЭС)*, в которых сочетаются возможности систем, основанных, например, на правилах и опыте, или моделях и правилах, или моделях и опыте, позволяет значительно повысить эффективность ЭС. Так, ГЭС, основанные на правилах и опыте, имеют возможность предварительно просматривать известные случаи до начала рассуждений на основе правил, что существенно снижает затраты на поиск решения. Результаты выполненного поиска здесь можно сохранять в БД

для будущего использования, чтобы избежать повторного поиска. В БД можно сохранять как положительные примеры, так и исключения.

К достоинствам ГЭС, основанных на моделях и правилах, можно отнести следующие. Они имеют возможность дополнять объяснения теоретическими знаниями. В этих системах повышается устойчивость (робастность) за счет использования в рассуждениях исходных теоретических принципов при отсутствии эвристических правил. Кроме того, поиск на основе модели здесь дополняется эвристическим поиском, за счет этого появляется возможность выбора решения из числа альтернативных.

В ГЭС, основанных на моделях и опыте, увеличиваются возможности объяснения ситуаций; повышается производительность решения задач за счет проверки аналогичных случаев до начала более экстенсивного поиска посредством рассуждений на основе модели; обеспечивается внесение примеров и исключений в БД, которые могут быть использованы для управления выводом на основе модели; имеется возможность записи результатов вывода на основе моделей для будущего применения.

Применение и создание экспертных систем для решения задач проектирования и управления наиболее оправданно в следующих случаях: у проектировщиков отсутствует достаточный опыт в разработке определенного класса систем; область проектирования имеет приемлемые размеры и границы; определены необходимая терминология и методология построения систем; имеются эксперты, работающие в соответствующей области, умеющие четко выражать свои мысли и готовые поделиться своими знаниями с пользователями; проект не может быть выполнен традиционными хорошо известными методами, реализуемыми в пакетах прикладных программ; стоимость и усилия по разработке экспертной системы (временные затраты исчисляются человеко-годами) оправдываются важностью и необходимостью решения задач проектирования. Например, экспертная система обеспечит значительную экономию материальных и временных затрат, повысит безопасность человеческой жизни.

В разработке экспертных систем обычно принимают участие: 1) инженеры по знаниям, т. е. эксперты по методам представления знаний; их главная задача — выбрать программный и аппаратный инструментарий для системы, помочь экспертам предметной области четко структурировать необходимую информацию и реализовать ее в базе знаний; 2) эксперты в соответствующей предметной области, имеющие опыт работы в этой области, понимающие прин-

ципы решения задач, приемы их решения, умеющие управлять данными, в том числе нечеткими, и оценивать получаемые решения; 3) представители конечных пользователей, которые должны оценить, делает ли экспертная система их работу более легкой и быстрой, удобной, достаточен ли уровень необходимых объяснений и т. п.

Наиболее трудоемкой и сложной частью работы при создании ЭС является проектирование и наполнение БЗ. Это обусловлено рядом обстоятельств, к которым прежде всего относятся необходимость привлечения к работе высококвалифицированных экспертов в соответствующей предметной области, которые пожелают активно участвовать в коллективной разработке БЗ; дефицит специалистов по проектированию ЭС; большой объем БЗ, исчисляемый тысячами правил; длительные сроки проектирования (не менее года); отсутствие формализованных методик работы с экспертами (опрос, обработка ответов), недостаточное развитие методов представления знаний; высокий уровень риска успешного завершения проектных работ.

Одним из направлений преодоления отдельных из перечисленных трудностей является использование уже созданных универсальных оболочек ЭС для ускорения и облегчения проектирования конкретных ЭС. Приведем ряд примеров ЭС, успешно используемых при проектировании РЭС [34]. Система CADHELP моделирует объяснения эксперта, демонстрирующего работу графических компонент подсистемы САПР для проектирования цифровых логических схем. ЭС объясняет конструктору, как использовать подсистему САПР, дает пояснения, когда пользователь допускает ошибку или просит помочь. Тексты объяснения генерируются на основе базы знаний в динамическом режиме. По мере роста квалификации пользователя объяснения становятся более краткими. Знания в системе организованы в виде совокупности взаимодействующих подсистем, управляемых программой-администратором. Система реализована на FRANZ LISP, работает на DEC VAX11/780 с операционной системой UNIX.

Система CRITTER предназначена для решения задач проектирования интегральных схем, позволяет анализировать корректность, временные характеристики, робастность и быстродействие СВИС. В систему разработчик вводит электрическую схему, характеристики входов и выходов, по этим данным система строит исчерпывающую модель работы схемы, дает оценку ее функциональных возможностей, информацию по диагностированию и ремонту. База знаний CRITTER включает информацию о принци-

пиальных схемах и методах анализа схем. Принципиальные схемы представляются с помощью фреймов, а другие знания — с помощью алгебраических формул и исчисления предикатов. Система реализована на языке Интерлисп.

Система DAA оказывает помощь разработчикам СВИС по алгоритмическому описанию информационных потоков решать задачи размещения аппаратных компонент. База знаний системы включает алгоритмы размещения компонентов в монтажном пространстве, используемые опытными специалистами, а также знания, взятые из других программ размещения. Система основана на правилах с прямой цепочкой рассуждений.

Система PEACE помогает разработчикам выполнять анализ и синтез аналоговых и цифровых схем. База знаний системы включает функциональные описания основных элементов схемы, правила соединения для образования более сложных схем и сетей, функциональные и топологические преобразования схем, стратегии анализа и синтеза, а также эвристические правила предотвращения отказов. Система позволяет синтезировать аналоговые схемы по их функциональным описаниям, а цифровые схемы — по математическим выражениям передаточных функций. Система ориентирована на методы логики и реализована на языке Пролог.

Система SOPHIE предназначена для обучения студентов отлаживанию электрических цепей, нахождению в них неисправностей. Студент может выбирать неисправности в имитационной модели цепи и устранять их последовательными действиями, предсказывая приближенные показания измерительного инструмента. Когда студент допускает ошибку, система показывает результат измерения, объясняет его и выдает печатный отчет о результатах для просмотра. Система реализована на языках Интерлисп и Фортран, последний используется для имитационного моделирования.

Рассмотренные в примерах ЭС в основном доведены до исследовательского прототипа и показывают сферу их применимости при проектировании РЭС.

Наибольший эффект от использования ЭС достигается в следующих случаях: 1) сложные задачи имеют множество возможных решений и надо выбрать одно наиболее верное (предпочтительное или исключить неверные); 2) в решении задачи участвует большое количество переменных, которые трудно объединить одной детерминированной или другой адекватной моделью, поэтому приходится опираться на опыт и интуицию специалистов в рассматриваемой предметной области; 3) используемая для решения задач информация имеет неопределенный или нечеткий характер.

6.3. Комплексные интеллектуальные САПР

В настоящее время проявляются два основных направления, в которых развиваются электронные САПР: первое связано с интеграцией САПР с другими информационными системами, а второе — с интеллектуализацией решаемых задач. Рассмотрим кратко эти направления.

На большинстве предприятий электронного профиля для проектирования РЭС и технологической подготовки производства используют САПР, а для управления финансово-хозяйственной деятельностью — системы класса ERP (Enterprise Resource Planning — планирование ресурсов предприятия). Во многих случаях оба вида систем развиваются независимо друг от друга. В определенной степени это связано с тем, что САПР и ERP создают разные разработчики, а сами системы предназначены для решения разных задач. САПР ориентированы на создание информации об изделии и технологии его изготовления, а ERP — на управлении бизнес-процессами (планирование, производство, менеджмент, финансовый учет и т. д.).

В наиболее передовых организациях к САПР добавляют системы PDM (Product Data Management — системы управления данными об изделии), которые должны содержать сведения не только о новых изделиях, но и о тех, которые выпускались ранее.

Важным резервом достижения основных стратегических целей предприятия (снижение затрат и себестоимости продукции, сокращение сроков выпуска новых изделий, повышение конкурентоспособности и управляемости) является интеграция САПР и ERP в комплексную объединенную систему с единым информационным пространством.

Интеграция САПР и ERP обеспечивает для предприятия следующие преимущества:

- однократный ввод данных в систему, что позволяет существенно сократить число ошибок, связанных с неправильной входной информацией (например, ручное внесение состава спроектированного изделия в ERP приводит к ошибочному вводу до 30 % информации), значительно сокращаются издержки, связанные с ручным переносом информации из одной системы в другую, а также издержки из-за ошибок в спецификациях, которые можно создавать один раз;
- появляется возможность на стадии приема заказа определить конфигурацию изделия, технологию изготовления, рассчитать стоимость заказа и сроки его изготовления;

- уменьшается стоимость товарно-материальных запасов, так как проектировщики оперативно получают информацию об элементной базе, имеющейся на складе, и используют ее при создании новых версий изделий.

Для реализации интеграции САПР и ERP используются разные методы, в том числе обмен файлами импорта/экспорта в соответствии с заранее разработанными и согласованными форматами, организация связи через API-интерфейсы, «бесшовный» метод непосредственного доступа из одной системы в другую, например через общие протоколы. Выполнение работ по интеграции САПР и ERP требует преодоления ряда серьезных трудностей. К этим трудностям прежде всего относятся:

- проблемы организационного характера, связанные с непониманием важности интеграции систем для обеспечения конкурентоспособности предприятия;
- необходимость четкого определения целей проекта интеграции и корректной постановки задач, которые предстоит решить;
- необходимость создания единого информационного пространства, учитывающего корпоративные интересы различных служб и подразделений;
- отсутствие хорошей методологии решения задач интеграции;
- недостаточный опыт у специалистов и нехватка грамотных кадров;
- необходимость поддержки высшего руководства и заинтересованности конечных пользователей.

С увеличением сложности проектируемых систем, возрастанием числа задаваемых параметров и переменных, повышением важности и ответственности задач, решаемых разрабатываемым объектом, актуальным направлением развития САПР становится интеллектуализация, т. е. внедрение в САПР технологий искусственного интеллекта, придание им способности качественно и эффективно выполнять отдельные проектные процедуры на уровне высококвалифицированного специалиста-эксперта. Интеллектуальные САПР особенно необходимы разработчикам, когда возникают проектные задачи, для решения которых отсутствуют достаточно проработанные методы или в изделии используется новый принцип действия, создаются новые устройства и требуются большие затраты творческого труда.

Основу интеллектуальной САПР составляет интеллектуальное ядро в виде БЗ по конкретной предметной области, что дает возможность автоматизированного, а в отдельных случаях автоматического решения задач структурно-параметрического синтеза.



Рис. 6.5. Схема интеллектуальной САПР

При построении интеллектуальных САПР обычно используется объектно-ориентированный подход, что позволяет выполнять проектные работы специалистами с различными уровнями квалификации, так как задание на проектирование может вводиться с помощью естественно-языкового (интеллектуального) интерфейса. Далее задание при необходимости уточняется у пользователя и затем переводится в специальное внутреннее представление.

В структуре интеллектуальных САПР для выполнения проектных заданий имеется две взаимодействующие части — обычная («классическая» САПР) и интеллектуальная в виде экспертной системы (рис. 6.5). Если задание может быть выполнено стандартными проектными процедурами, то оно реализуется «классической» частью. В случаях, когда выполнить задание стандартными методами не представляется возможным, логический блок передает решение задачи в экспертную систему, которая ищет «нестандартный» эвристический способ выполнения задания.

Использование интеллектуальных САПР дает следующие возможности:

- расширяется круг решаемых проектных задач;
- интенсифицируется творческая активность разработчиков;
- повышаются качество и производительность труда проектировщиков различных категорий;
- сокращаются сроки проектирования;
- увеличивается число просматриваемых альтернативных вариантов, возрастает глубина их проработки, что ведет к снижению риска в выполнении сложных проектов.

6.4. Автоматизированные системы технологической подготовки производства

Автоматизация технологической подготовки производства является важным звеном в решении задач интеграции проектирования и производства, обеспечении тесного взаимодействия инжене-

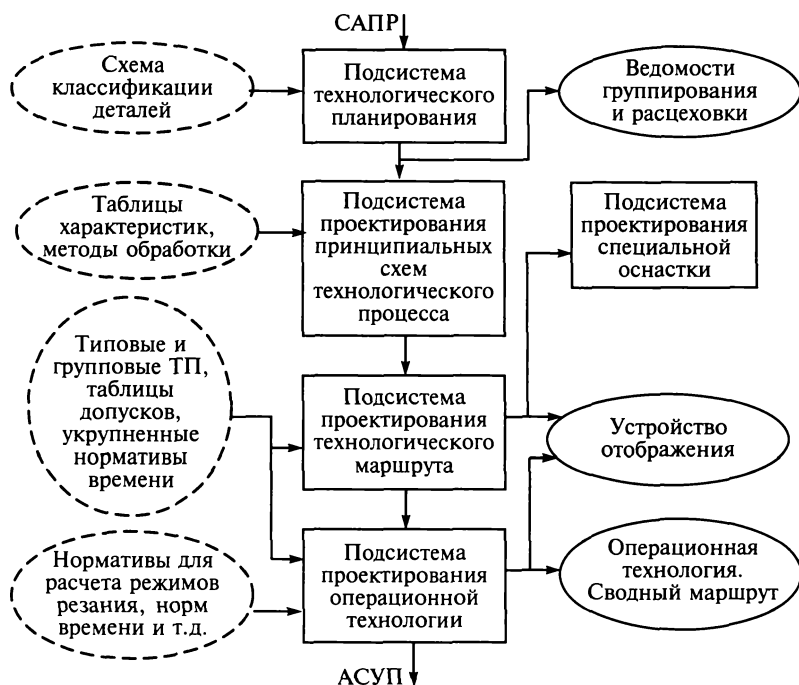


Рис. 6.6. Структурная схема АС ТПП

ров-проектировщиков и инженеров-технологов, при освоении новых образцов РЭС, повышении их технического уровня и качества.

Автоматизированная система технологической подготовки производства (АС ТПП) представляет собой информационную систему, включающую математическое и программное обеспечение, средства — вычислительной и организационной техники, а также другие виды обеспечений, присущие всем ИС. Система имеет иерархическую структуру, позволяющую последовательно переходить от решения общих задач ТПП к частным. Для описания АС ТПП используются информационные и функциональные модели. Информационная модель отражает информационные связи между подсистемами и преобразования входной и справочно-нормативной информации в выходную в соответствии со схемой, представленной на рис. 6.6 [32]. Следует учитывать, что подсистемы АС ТПП используются на предприятии различными подразделениями, поэтому автоматизированная система обычно имеет сетевую архитектуру, в ее состав входят устройства, обеспечивающие связь с обрабатывающими центрами и другими технологическими устройствами.

Основными целями АС ТПП являются разработка документации для организации и ведения технологических процессов, системы контроля качества, создание необходимых приспособлений и специальной оснастки. Для этого в автоматизированном режиме решаются следующие задачи: выбор технологии, синтез технологического маршрута и его оптимизация, выбор оборудования, анализ статических и динамических режимов ТП, анализ чувствительности и точности, математическое моделирование процессов, планирование и обработка экспериментов. Математическое обеспечение АС ТПП в основном базируется на методах математического программирования и принятия решений, рассмотренных в главе 5. Кроме того, применяются методы теории расписаний и решения задач энергетической эффективности, в частности синтеза энергосберегающего управления. При решении задач оптимизации в качестве критериев оптимальности обычно используют приведенные затраты, технологическую себестоимость, производительность, точностные показатели и др.

В результате важно определить рабочий технологический режим, который в наименьшей степени нуждается в адаптации при изменении условий окружающей среды, неоднородности сырья и других возмущающих воздействий, неизбежных при производстве. Во многих случаях выполнение задач ТПП связано с реинжинирингом бизнес-процессов.

Функциональные модели системы устанавливают логическую связь между отдельными подсистемами и направление хода проектирования в каждом конкретном случае.

В задачах проектирования технологических процессов и средств технологической оснастки наряду с моделями, рассмотренными в главе 4, применяют табличные, сетевые и перестановочные модели [32]. Табличная модель задает одну конкретную структуру ТП, а сетевая описывает множество структур ТП, отличающихся количеством и составом элементов при неизменном отношении порядка. Сетевые модели обычно представляют в виде ориентированных графов, не имеющих циклов. Табличные и сетевые модели широко используются для описания групповых ТП, а также стандартного и унифицированного технологического оснащения. Перестановочная модель используется для описания множества структур ТП, отличающихся количеством и составом элементов структуры при изменении отношения порядка. Структура элементов перестановочной модели задается с помощью ориентированного графа, содержащего циклы. Эти модели применяются при разработке единичных ТП и специализированной оснастки.

В настоящее время задачи ТПП решаются в рамках целевых комплексных (интегрированных) систем, ориентированных на конкретный вид РЭС, т.е. САПР/ АСТПП / ГАП. Комплексные системы обеспечивают оптимальное проектирование конструкций и технологических процессов, получение необходимой электронной технической документации на программы для станков с ЧПУ и роботов, решение задач организации производства и управления им.

Многие важные и трудоемкие задачи ТПП в автоматизированном режиме решаются с применением SCADA-систем и CASE-технологий. В основном эти задачи связаны с проектированием автоматизированных систем управления технологическими процессами и автоматизацией разработки программного обеспечения для контроллеров и других систем.

SCADA (Supervisor Control And Data Acquisition) — системы представляют собой сложные программные комплексы, предназначенные для разработки, настройки и запуска АСУТП. Программные модули SCADA обеспечивают создание мнемосхемы технологической системы, совмещенной с различными формами динамического отображения текущей информации, разработку математической основы для автоматического и супервизорного управления ТП, визуализацию состояния ТП и управления им в реальном времени. Для этого в системах SCADA предусмотрены средства сбора первичной информации от устройств нижнего уровня АСУТП, средства управления и регистрации сигналов об аварийных ситуациях, средства визуализации информации в виде графиков, гистограмм и других форм, средства хранения информации в архивах с возможностью ее последующей обработки.

В настоящее время широко используются SCADA-системы In Touch, Factory Lint, Genesis, WinCC, Trace Mode, КРУГ и др.

CASE-технология в широком смысле представляет собой совокупность методологий анализа, автоматического проектирования, разработки и сопровождения сложных систем программного обеспечения. Технология CASE применительно к задачам ТПП используется в двух направлениях. Первое — Computer Aided System Engineering — направлено на решение задач концептуального проектирования сложных слабоструктурированных систем. CASE-технологии этого направления называют системами CASE для концептуального проектирования. Второе направление — Computer Aided Software Engineering решает задачи автоматизированного проектирования программного обеспечения. Эти CASE-системы называют инструментальными средами разработки ПО (инструментальными CASE-системами).

Среди CASE-систем первого направления выделяют системы функционального и информационного (поведенческого) проектирования. Наиболее распространенной методикой функционального проектирования сложных систем является методика SADT (Structured Analysis and Design Technique). Эта методика стала основой стандарта IDEF0 (Integrated Definition 0). Программные средства информационного проектирования реализуют методики инфологического проектирования баз данных. Широкое распространение получила методика создания информационных моделей IDEF1X. Применение инструментальных CASE-систем позволяет сократить затраты на разработку ПО за счет уменьшения числа итераций и числа ошибок, а также улучшить качество ПО вследствие лучшего взаимопонимания разработчика и заказчика. При этом облегчается сопровождение готового программного продукта [21].

CASE-средства представляют собой программные продукты, используемые как для автоматизированной разработки определенных видов моделей, например функциональных или информационных, так и для автоматизированного создания программного обеспечения информационных и других систем. В последнем случае CASE-средства поддерживают все этапы проектирования прикладного программного обеспечения и баз данных от формулировки требований до генерации кода, тестирования документирования и сопровождения в процессе эксплуатации [24].

CASE-технологии широко применяются для моделирования систем большинства предметных областей. Исключительно большое значение CASE-технологии имеют для разработки моделей деятельности предприятий, в частности функциональных и информационных, которые необходимы для решения задач системного анализа, проектирования, реинжиниринга и др.

Большинство CASE-средств основано на парадигме методология — метод — нотация — средство [13]. Методология определяет руководящие указания для оценки и выбора проекта разрабатываемого ПО, шаги работы и их последовательность, а также правила распределения и назначения методов. В данном случае метод — это систематическая процедура или техника генерации описаний компонент ПО, например проектирование потоков и структур данных. Нотация представляет собой формат описания структуры системы, элементов данных, этапов обработки; нотации обычно включают графы, диаграммы, таблицы, блок-схемы, формальные и естественные языки. Средства — инструментарий для поддержки и усиления методов, они поддерживают работу пользователей при создании и редактировании графической части проекта в интерак-

тивном режиме, способствуют организации проекта в виде иерархии уровней абстракции, выполняют проверки соответствия компонентов.

Основными достоинствами CASE-технологий для моделирования технологических систем являются следующие:

- значительно сокращается время на разработку моделей;
- исследователь (разработчик, проектировщик) освобождается от рутинной работы, связанной с оформлением, представлением и хранением результатов моделирования за счет автоматизации соответствующих процессов, это позволяет ему основное внимание уделять творческой части разработки;
- разрабатываемые модели соответствуют действующим нормативным документам, их описание пригодно для широкого использования без дополнительных пояснений;
- улучшается качество создаваемых моделей за счет средств автоматического контроля;
- автоматизирован процесс развития и сопровождения результатов моделирования.

Примеры наиболее распространенных CASE-систем рассмотрены в подразд. 3.5.

Для большинства современных CASE-средств характерны следующие особенности [24].

1. Единство графического языка описания проекта. Все участники проекта, использующие CASE-технологии, обеспечиваются единым, наглядным и понятным графическим языком, в соответствии с которым документации представляется двумерными схемами. Это позволяет заказчику и разработчикам, в том числе экспертам предметной области, системным аналитикам, программистам и другим участникам проекта, быстро вносить необходимые изменения и облегчает выполнение проекта, сопровождение систем при эксплуатации.

2. Единство базы данных проекта, которая составляет основу CASE-технологии. База данных (репозиторий) содержит всю информацию о выполняемом и предыдущих проектах. Она включает информационные объекты различных типов, отношения между их компонентами, правила использования и обработки этих компонентов. В репозитории хранятся объекты самых различных типов, в том числе структурные диаграммы, описания и модели данных, отчеты проектов, исходные коды и т. п.

3. Интеграция всех используемых средств и разделение системной информации между участниками проекта в соответствии с правами доступа. CASE-средства предусматривают несколько уровней

интеграций, охватывающих общий пользовательский интерфейс, передачу данных между средствами, интеграцию этапов, разработку через единую систему представления стадий ЖЦ проекта, передачу данных между различными платформами компьютерных систем.

4. Поддержка коллективной работы над проектом и управления проектом. CASE-средства обеспечивают возможность работы в режиме удаленного доступа, экспорт-импорт фрагментов проекта по сети для их развития или модификации, планирование, контроль и обеспечение безопасности и руководство проектом.

5. Автоматическая генерация документации по проекту. При этом документация выполняется в соответствии с требованиями действующих стандартов и всегда соответствует текущему состоянию дел, так как любые изменения в проекте автоматически без запаздывания отражаются в репозитории.

6. Возможность макетирования разрабатываемой системы. Это позволяет заказчику на ранних стадиях ЖЦ проекта оценить эффективность системы при реальной эксплуатации.

7. Автоматическая генерация программного кода, что позволяет построить до 80—90 % текстов на языках высокого уровня в автоматическом режиме.

8. Автоматическая верификация и контроль проекта на полноту и состоятельность на ранних этапах разработки, благодаря чему снижается риск неудачного завершения работ и повышается конкурентоспособность создаваемого изделия.

9. Сопровождение проекта и реинжиниринг архитектуры системы. Это позволяет интегрировать получаемые модели в проект, автоматически обновлять документацию при изменении кодов и изменять спецификации при редактировании кодов [24].

Повышение эффективности работ в результате автоматизации ТПП достигается за счет оптимизации технологических процессов, выбора наиболее рациональных средств технологического оснащения и лучшей организации работы; освобождения от ручного тиражирования технологических документов при многократном использовании ранее разработанных процессов и заполнения бланков маршрутно-операционных карт [32].

6.5. Эффективность САПР

Эффективность представляет собой наиболее общее комплексное свойство САПР и других информационных систем, определяет качество функционирования систем для достижения намеченных

целей с учетом затрат ресурсов и времени. Термин «эффективность» рекомендуется увязывать с процессом использования системы по целевому назначению. Поэтому, говоря об эффективности САПР, следует подразумевать эффективность автоматизированного решения всего комплекса задач проектирования РЭС, которые удовлетворяют требованиям качества и конкурентоспособности. В ряде случаев выделяют технико-экономическую эффективность, т.е. способность системы получать определенный эффект с минимальными затратами ресурсов, и техническую эффективность, т.е. степень приспособленности САПР к выполнению задач проектирования систем с заданными характеристиками.

Количественно эффективность оценивается системой показателей, характеризующих степень достижения полезных результатов при использовании САПР. Различают частные и комплексные (обобщенные) показатели эффективности. В качестве показателей эффективности САПР обычно используются годовая экономия, годовой экономический эффект, коэффициент экономической эффективности, срок окупаемости капитальных вложений и др.

Годовой экономией называется суммарная экономия текущих затрат Θ_r , руб./год, получаемая в сферах проектирования Θ_1 , изготовления Θ_2 и эксплуатации Θ_3 продукции за год, т.е.

$$\Theta_r = \Theta_1 - \Theta_2 - \Theta_3.$$

Годовой экономический эффект (Θ) определяется как разность полных (текущих и капитальных) затрат до и после внедрения САПР на производство годового объема продукции, руб./год:

$$\Theta = [(C_{11} - E_n K_{11}) - (C_{12} - E_n K_{12})]B,$$

где C_{11} и C_{12} , K_{11} и K_{12} — текущие и капитальные затраты на единицу продукции соответственно до и после внедрения САПР, руб./шт.; B — годовой объем производства продукции, шт./год; E_n — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений. Если система автоматизированного проектирования внедряется на предприятии впервые, то в базовом варианте (до внедрения САПР) капитальные вложения отсутствуют.

Коэффициент экономической эффективности представляет собой отношение годовой экономии к среднегодовым капитальным затратам при разработке и внедрении САПР, руб./год:

$$K_\Theta = \frac{\Theta_r}{K_{cr}}, \quad K_{cr} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l K_i,$$

где l — продолжительность (число лет) разработки и внедрения САПР; K_i — капитальные затраты на разработку и внедрение САПР в i -м году.

Если $K_3 < E_n$, то САПР считается неэффективной.

Срок окупаемости капитальных вложений $T_{ок}$, характеризующий период времени (в годах), в течение которого затраты на создание и внедрение САПР возмещаются за счет годовой экономии,

$$T_{ок} = lK_{сг}/\Delta_r.$$

Максимально допустимое значение $T_{ок}$ для предприятий электронного профиля при $E_n = 0,2$ составляет

$$T_{ок\max} = 1/E_n = 5 \text{ лет.}$$

В качестве критерия (показателя) эффективности от внедрения САПР может использоваться производительность Π , которая определяется соотношением

$$\Pi = \frac{Y}{X},$$

где Y — суммарный «выход» проектной организации (стоимость выполненных проектов за определенный интервал времени); X — суммарный «вход» в виде стоимости использованных ресурсов [38].

В этом случае эффективность $E_{пр}$ САПР определяется по формуле

$$E_{пр} = \Pi_c/\Pi_0,$$

где Π_0 , Π_c — производительности до и после внедрения САПР соответственно.

Один из подходов оценки эффективности использует понятие «идеальной» САПР. В качестве «идеальной» может рассматриваться САПР, которая обеспечивает в реальном времени оптимальное решение всех задач конструкторского и технологического проектирования, имеет интерфейс и достаточное число рабочих мест, которые необходимы для мгновенной реализации замыслов проектировщиков. В этом случае показатель эффективности $E_{ид}$ рассчитывается по формуле

$$E_{ид} = c \frac{N}{N_{ид}} + (1 - c) \frac{T_{ид}}{E},$$

где N , $N_{ид}$ — числа решаемых задач реальной и идеальной САПР соответственно; T , $T_{ид}$ — затраты времени на решение задач реальной и идеальной САПР соответственно; c — весовой коэффициент для учета важности составляющих, $c \in (0; 1)$.

Другой подход основан на учете числа решаемых функциональных задач в автоматизированном режиме и их вкладе в общую эффективность предприятия. Показатель эффективности E_3 здесь имеет аддитивную структуру:

$$E_3 = \sum_{i=1}^n e_i p_i,$$

где e_i — эффективность выполнения i -й функциональной задачи; p_i — вероятность возникновения i -й функциональной задачи; n — число решаемых задач.

Для учета возможных ситуаций, которые могут возникать при эксплуатации САПР, используется показатель эффективности E_H , учитывающий множество состояний функционирования H . В этом случае показатель E_H рассчитывается по формуле

$$E_H = \sum_{h \in H} e(h) p(h),$$

где $e(h)$, $p(h)$ — эффективность системы в состоянии $h \in H$ и вероятность этого состояния соответственно.

В последние годы в ряде стран получает распространение подход оценки эффективности САПР на основе модели ITSM (Information Technology Service Management) [29]. Эта модель использует принципы ITIL (IT Infrastructure Library). В соответствии с данным подходом САПР рассматривается как информационная служба, которая обслуживает проектные подразделения, удовлетворяя их потребности в автоматизированном решении проектных задач. Решаемые задачи считаются услугами для эффективного выполнения бизнес-процессов, объем которых оценивается в стоимостной форме.

Для проектных служб достижение целей определяется набором задач (сервисов), решение которых должна обеспечивать САПР. Проектные задачи как сервисы характеризуются следующими параметрами [29]:

- содержание (функциональность), т. е. состав решаемых задач и набор средств для их решения;
- доступность, т. е. период времени, в течение которого САПР поддерживает соответствующий сервис;
- производительность, т. е. объем операций определенной категории в единицу времени;
- уровень, т. е. период времени, в течение которого гарантируется исправление возникшей проблемы; уровень определяет-

ся для определенной категории проблем, например время на устранение затора бумаги в принтере не может совпадать с временем, необходимым для замены сервера.

В общем случае показатели эффективности САПР должны учитывать:

- сроки (временные затраты) на решение проектных задач;
- полноту и комплексность решаемых задач в автоматизированном режиме, включая выдачу проектной документации;
- наличие вопросов по результатам решения задач;
- возможность практического использования результатов работы САПР в полном объеме.

6.6. CALS-технологии

Важным резервом повышения эффективности и качества РЭС является использование информационных технологий на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ). Интеграция новых автоматизированных информационных систем, применяемых на разных стадиях ЖЦ изделий, в единую многофункциональную систему выполняется на принципах CALS-технологий.

В соответствии со стандартами ISO жизненный цикл технических систем включает 12 этапов. Укрупненно эти этапы показаны на рис. 6.7 [20]. Здесь же приведены отечественные и англоязычные аббревиатуры автоматизированных информационных систем, которые используются на соответствующих этапах. Указанные на схеме линии связей между ИС и этапами ЖЦ условны, в зависимости от состава имеющихся систем конфигурация схемы может быть иной. Как видно из схемы, многие виды автоматизированных информационных систем охватывают несколько этапов ЖЦ продукции.

Начальные этапы выполняются с помощью систем: CAE (Computer Aided Engineering) — автоматизированные расчеты и анализ, CAD (Computer Aided Design) — автоматизированное конструирование, CAM (Computer Aided Manufacturing) — автоматизированная технологическая подготовка производства. Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения используются системы управления проектными данными — PDM (Product Data Management).

Функции управления производством и автоматизация бизнес-процедур возложены на системы: ERP — планирование и управление предприятием, MRP-2 (Manufacturing Requirement Planning) — планирование производства, MES (Manufacturing Execution Sys-

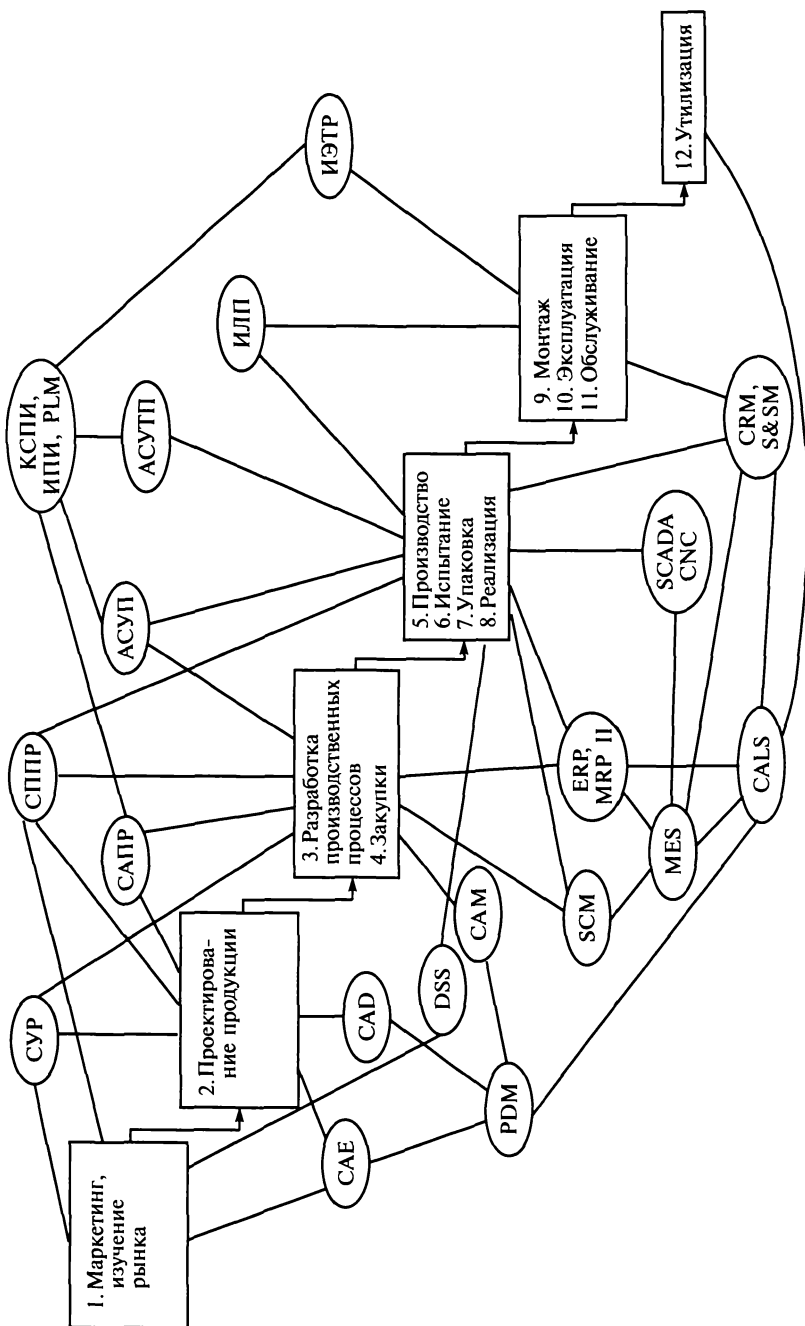


Рис. 6.7. Этапы ЖЦ изделий и соответствующие автоматизированные информационные системы

tem) — производственная исполнительная система, SCM (Supply Chain Management) — управление цепочками поставок, CRM (Customer Relationship Management) — управление взаимоотношениями с заказчиками, SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) — диспетчерское управление и сбор данных, CNC (Computer Numerical Control) — компьютерное числовое управление, S&SM (Sales and Service Management) — управление продажами и обслуживанием и др.

Многие задачи на начальных этапах решаются с помощью систем управления рисками (CYP) и систем поддержки принятия решений (СППР или DSS — Decision Support System). Система CPC (Collaborative Product Commerce — совместный электронный бизнес) является интегрирующей системой, которая управляет информацией, используемой другими автоматизированными системами предприятия, а именно системами ERP, SCM, CRM, PDM и др. В последнее время возрастает роль систем оперативного управления производственными процессами, в частности автоматизированных систем оперативно-диспетчерского управления (АСОДУ), управление производственными фондами (Enterprise Assets Management, EAM), систем контроля управления потребляемыми энергоресурсами и др. Это связано с необходимостью модернизации рабочих процессов на предприятиях в целях обеспечения их конкурентоспособности.

Так, EAM-системы предназначены для решения следующих задач:

- создание БД по технологическому оборудованию;
- автоматическое планирование регламентных работ;
- контроль технического состояния оборудования, выполнения плановых и внеплановых ремонтов;
- учет стоимости выполнения ремонтов, движения запасных частей и материалов;
- анализ результатов и принятия решений по улучшению процесса эксплуатации технологического оборудования предприятия.

В результате функционирования EAM-системы достигается сокращение времени внеплановых простоев и увеличение срока службы оборудования, уменьшение количества незапланированных ремонтов и стоимости материальных запасов; повышение производительности труда персонала и эффективности технологического оборудования.

В общем случае стратегию CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support — непрерывный сбор данных и поддержка (из-

деляя) в течение всего жизненного цикла) следует рассматривать как стратегию систематического повышения эффективности, производительности и рентабельности процессов хозяйственной деятельности предприятия за счет внедрения современных методов информационного взаимодействия участников жизненного цикла продукта. В «Проекте Руководства по применению CALS в НАТО» термин CALS определяется как «...совместная стратегия промышленности и правительства (государства), направленная на «реинжиниринг» существующих бизнес-процессов — в единый высокоавтоматизированный и интегрированный процесс управления жизненным циклом систем военного назначения». В данном контексте жизненный цикл включает в себя разработку, производство, применение и утилизацию изделий военного назначения [39].

Под непрерывностью сбора данных в технологии CALS подразумевается оптимизация процессов взаимодействия заказчиков и поставщиков в ходе разработки, проектирования и производства сложной продукции, срок жизни которой с учетом различных модернизаций может составлять десятки лет. Для обеспечения эффективности, сокращения материальных и временных затрат процесс взаимодействия заказчиков и поставщиков должен осуществляться непрерывно. Вторая часть определения CALS — «поддержка жизненного цикла» — предусматривает оптимизацию процессов обслуживания, ремонта, снабжения запасными частями и своевременную модернизацию изделий. Так как затраты на поддержку сложного наукоемкого изделия при эксплуатации в работоспособном состоянии соизмеримы (а иногда и существенно превышают) с затратами на его приобретение, то принципиальное сокращение «стоимости владения» необходимо обеспечивать инвестициями в создание системы поддержки жизненного цикла.

Сама аббревиатура CALS используется более 20 лет, и смысловое содержание этого термина претерпело значительную эволюцию: Computer Aided of Logistic Support — компьютерная поддержка логистических систем (1985 г.); Computer Aided Acquisition and Lifecycle — компьютерные поставки и поддержка жизненного цикла (1988 г.); Continual Aided Acquisition and Lifecycle — поддержка непрерывных поставок и жизненного цикла (1993 г.); Commerce at Light Speed — бизнес в высоком темпе (1995 г.); Continuous Acquisition and Lifecycle Support (1997 г.).

В основе развития CALS-технологии лежали следующие направления научно-технического прогресса: 1) TQM (Total Quality Management) — всеобщее управление качеством; 2) системный подход и системный анализ; 3) «островковая», или «лоскутная», авто-

матизация бизнес-процессов; 4) информационные (компьютерные) технологии, удовлетворяющие мировым стандартам и требованиям открытых систем; 5) системы углубленных знаний в конкретных областях.

В настоящее время CALS-технологии рассматриваются как ключ к обеспечению успеха предприятий на внутреннем и внешнем рынках, использование CALS-систем и логистики означает переход к новому образу и стилю ведения бизнеса в условиях рыночных отношений [39].

Целью применения CALS-технологий как инструмента организации и информационной поддержки всех участников создания, производства и пользования продуктом является повышение эффективности их деятельности за счет ускорения процессов исследования и разработки продукции, придания изделию новых свойств, сокращения издержек в процессах производства и эксплуатации продукции, повышения уровня сервиса в процессах ее эксплуатации и технического обслуживания. Стратегия CALS объединяет в себя: применение современных информационных технологий; реинжиниринг бизнес-процессов; применение методов «параллельной» разработки; стандартизацию в области совместного использования данных и электронного обмена данными.

До настоящего времени на ряде предприятий существуют разобщенные автоматизированные системы САПР, АРМ, АСУТП и др. Дальнейший количественный рост «островковой» автоматизации без интеграции информационных технологии мало перспективен. Вместе с тем замена всех используемых информационных систем требует огромных материальных затрат и обычно нецелесообразна. Разумнее создавать информационную инфраструктуру, в рамках которой существующие автоматизированные системы объединяются и интегрируются, а там, где необходимо, дополняются новыми технологиями. Построение такой информационной инфраструктуры начинается с анализа функционирования всех существующих автоматизированных систем. При этом определяется, на каком этапе развития в данный момент находятся автоматизированные системы, какие системы надо сохранить, какие заменить и какие заново разработать. В ходе анализа выясняется текущее состояние информационных технологий, используемых участниками предполагаемого виртуального предприятия, учитываются планы партнеров, их подходы к стандартизации. Обычно выявляется большой объем данных, сохраняемых на бумажных носителях, которые следует перенести в электронную среду. Рассматривается целесообразность подобных преобразований, определяет-

ся, какая информация, в каком объеме, в какой форме и каким способом будет передаваться в рамках единого информационного пространства.

На основе выполненного анализа решаются задачи проектирования архитектуры CALS-системы, в том числе определение аппаратных средств, сетевой инфраструктуры, ПО, необходимого для поддержки усовершенствованных процессов и нового стиля работы. При этом большое внимание следует уделять: 1) созданию корпоративных хранилищ данных с однократным вводом и многократным коллективным использованием данных; 2) стандартизации форматов данных и способов доступа к ним; 3) эффективности управления информацией.

Разрабатываемая архитектура должна учитывать высокие темпы развития ИТ и технологий коммуникаций. Примерно за четыре года меняется три поколения ПК и соответствующего ПО. Поэтому надо обеспечить максимальную гибкость архитектуры, например, путем применения технологий открытых систем и стандартных промышленных решений за счет отказа от сильно индивидуализированных специальных решений. Надо постоянно отслеживать и пересматривать архитектуру, чтобы учесть новые разработки с максимальной эффективностью.

Для достижения должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем требуется создание единого информационного пространства не только в рамках отдельных предприятий, но и в рамках объединения предприятий. Единое информационное пространство обеспечивается благодаря унификации как формы, так и содержания информации о конкретных изделиях на различных этапах их жизненного цикла.

Унификация формы достигается использованием стандартных форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при документировании. Унификация содержания, понимаемая как однозначная правильная интерпретация данных о конкретном изделии на всех этапах его жизненного цикла, обеспечивается разработкой онтологии (метаописаний) приложений, закрепляемых в прикладных протоколах CALS.

Управление данными требуется не только в процессах проектирования и производства, но и в эксплуатации изделий. Минимизация затрат на обслуживание должна быть предусмотрена и обеспечена учетом логистических требований на этапах проектирования и изготовления изделий. С этой целью создаются системы интегрированной логистической поддержки (ИЛП) изделий. Основными задачами ИЛП являются: определение функций и

моделей средств поддержки основных изделий на этапе их эксплуатации, разработка этих средств в виде интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР), расчет надежности, в частности показателей безотказной работы изделий, определение состава и объема запасных частей, упаковка и транспортировка изделий, документирование, расчет всех видов затрат, обучение персонала.

Наиболее важными аспектами при рассмотрении научно-методической, программно-технической и нормативно-правовой сторон CALS-технологий являются функциональное моделирование бизнес-процессов, технологии анализа и реинжиниринга, виртуальные предприятия и многопрофильные коллективы, информационная инфраструктура, нормативная документация.

Основу системы CALS-стандартов составляют стандарты ISO 10303, разработанные Международной организацией стандартизации (ISO). Эти стандарты получили название STEP (Standard for Exchange of Product data), они определяют средства описания изделия на всех стадиях его жизненного цикла.

Стандарты ISO 10303 состоят из серии томов, в которых описаны основные принципы STEP, правила языка Express и методы его реализации, модели, прикладные протоколы, отражающие специфику информационных моделей в конкретных предметных областях, методы тестирования моделей и т. д. В настоящее время разработано более сотни томов. В томе 1 стандарта ISO 10303-1 приводятся аннотации всех томов, а также вводится ряд базовых терминов — продукт (product), приложение (application), проектные данные (product data), модель (model), прикладной протокол (AP), интегрированный ресурс (integrated resource), элементы функциональности (Unit of functionality — UoF) и др.

Важное место в стандартах STEP занимает язык Express, используемый для унифицированного представления данных и обмена данными в компьютерных средах. Язык Express инвариантен к приложениям. Методам описания моделей на языке Express (Description methods) посвящены тома 11—14. В томе 11 содержатся также описания расширения Express-C базового языка и графического варианта языка Express-G. В других томах этой группы описаны дополнения к языку Express. Тома 21—29 содержат способы обмена Express-описаниями между системами.

В STEP стандартах широко используются следующие важные понятия:

- AAM — Application Activity Model, представляет собой функциональную модель IDEF0 для определенного приложения;

- ARM — Application Requirements Model, т.е. модель данных с точки зрения пользователя;
- SDAI — Standard Data Access Interface, является программным интерфейсом к источникам данных прикладных систем (в том числе к моделям систем CAD/CAM) с переводом моделей в STEP-файлы, интерфейс используется для организации обменов между приложениями через общую базу данных STEP;
- AP — Application Protocol, т.е. стандарт, отражающий специфику конкретного приложения и др.

Прикладной протокол в STEP представляет собой информационную модель определенного приложения, которая с высокой степенью полноты описывает множество сущностей вместе с их атрибутами и выражена средствами языка Express. Прикладные протоколы позволяют однозначно понимать спецификации приложений разными пользователями информационных моделей. Прикладные протоколы содержатся в томах ISO 10303, начиная с номера 201, их принято обозначать аббревиатурой AP с указанием номера, например AP203, AP214.

Многие тома STEP переведены на русский язык и представлены в виде национальных стандартов РФ. Например, ГОСТ Р ИСО 10303-1—99 посвящен обзору и основополагающим принципам STEP; ГОСТ Р ИСО 10303-11—99 — справочное руководство по языку Express; ГОСТ Р ИСО 10303-41—99 — описание общих (родовых) интегрированных ресурсов и другие [20].

В настоящее время ведутся работы по созданию стандартов для обеспечения взаимодействия приложений и организаций, использующих разные стандарты интеграции данных и моделей, получаемых из различных информационных систем. В стандартах должна быть предусмотрена возможность согласования моделей, выраженных с помощью разных языков моделирования и форматов, например, таких, как SGML, XML, EXPRESS и др.

Наиболее часто применяют следующие подходы к построению корпоративных ИС.

1. Разработка корпоративной системы на основе существующих локальных автоматизированных ИС собственными силами. При этом могут приобретаться готовые или выполненные по заказу программные средства других организаций. Создаваемая таким образом корпоративная ИС в полной мере учитывает специфику работы и потребности организации. Кроме того, важным достоинством данного подхода являются умеренные материальные затраты, связанные с развитием корпоративной системы.

2. Создание корпоративной ИС на базе готового программного продукта, охватывающего все структурные подразделения и выполняемые организацией функции. Современные информационные системы корпоративного типа имеют модульную структуру. Поэтому такая система может внедряться поэтапно и сочетаться с работами по реинжинирингу организации. На первых этапах вводятся модули, позволяющие автоматизировать наиболее важные виды работ.

3. Развитие информационных технологий корпоративных систем на основе типовых требований к программным продуктам. Это обеспечивает компонентную «сборку» ИС из программ различных фирм-производителей на различных программно-аппаратных платформах. Данный подход «конструирования» ИС из наборов компонентов от различных производителей обеспечивает гибкость в выборе необходимых элементов корпоративной системы, создание системы требуемой конфигурации и др.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности систем поддержки принятия решений?
2. Назовите основные этапы процесса принятия решений.
3. Что понимается под экспертной системой?
4. Назовите основные компоненты (части) экспертной системы.
5. В чем различия экспертных систем, основанных на правилах и моделях?
6. Какие вы знаете модели представления знаний?
7. Приведите примеры задач, решаемых с использованием экспертных систем.
8. С какими информационными системами целесообразна интеграция САПР?
9. Что понимается под интеллектуальной САПР?
10. Какие задачи решают автоматизированные системы технологической подготовки производства?
11. Какие подсистемы выделяют в составе АС ТПП?
12. Каково назначение SCADA-систем?
13. Каковы функциональные возможности CASE-средств?
14. Какие показатели используются для оценки эффективности САПР?
15. Что означает аббревиатура CALS?
16. Каковы цели применения CALS-технологий?
17. В чем заключается стратегия CALS?
18. Какие подходы используются при построении корпоративных информационных систем?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение информационных технологий в проектировании, производстве и эксплуатации РЭС необходимо для создания новой конкурентоспособной продукции, обеспечения все возрастающих требований к точности, надежности, быстродействию, энергетической эффективности и другим характеристикам изделий. Информационные технологии стали важнейшей составной частью радиосистем. Широкое применение в системах радиосвязи вычислительных средств сопровождается смещением процесса проектирования от аппаратного обеспечения к алгоритмическому и программному обеспечению, внедрением новых подходов решения проектных задач.

Непрерывное развитие ИТ проявляется во всех аспектах их использования. Наблюдается тенденция создания ИТ для слабоподготовленных пользователей, расширяются возможности математического обеспечения, аппаратных средств и других компонентов.

Большие возможности в применении ИТ открывают новые направления в области моделирования. К этим направлениям прежде всего относятся: множественное моделирование, позволяющее учесть различные состояния функционирования при эксплуатации изделий; когнитивное моделирование, повышающее актуализацию знаний и облегчающее решение интеллектуальных задач; мягкое моделирование, учитывающее размытость (нечеткость) исходных данных; автоматизация моделирования и др.

Методология автоматизированного проектирования и производства РЭС представляет собой совокупность принципов, методов, методики и схемы исследований, которыми руководствуются разработчики новых изделий с использованием современных компьютерных технологий. В соответствии с существующей методологией все проектные задачи решаются как оптимизационные, основой решения которых являются системный подход и методы исследования операций. Знание методологии автоматизированного проектирования РЭС позволяет правильно сформулировать решаемую задачу, выбрать необходимый метод ее решения и модель, эффективно использовать программно-технические средства САПР.

Важное место в методологии отводится концепциям интеграции, т. е. созданию единого информационного пространства, обес-

печивающего автоматизированное выполнение всех этапов проектно-конструкторско-технологической деятельности; интеллектуализации, предусматривающей применение развитых методов работы со знаниями (их представлением, хранением, использованием и т. д.); индивидуализации, т. е. ориентированности на максимальное использование возможностей и знаний разработчиков [11].

Все бóльшую роль в расширении возможностей ИС приобретают использование достижений в области телекоммуникаций. Глобальные персональные системы связи дают возможность сотрудникам, находящимся вне рабочего места, получать необходимую информацию (звуковую, текстовую, графическую), оперативно принимать управленческие и проектные решения по возникающим вопросам. Современные системы радиосвязи с подвижными объектами обеспечивают надежность и конфиденциальность связи, защиту от несанкционированного доступа в систему. Все это позволяет повысить производительность труда, обеспечить автоматизированный контроль выполняемых работ и технологических процессов, добиваться экономии материально-трудовых ресурсов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АА — автоматизированный архив
АИВС — автоматизированные информационно-вычислительные системы
АИС — автоматизированная информационная система
АИСС — автоматизированная информационно-справочная система
АПД — аппаратура передачи данных
АРМ — автоматизированное рабочее место
АРС — автоматические радиосистемы
АС — автоматизированный справочник
АСД — автоматизированная система документооборота
АСНИ — автоматизированная система научных исследований
АСО — автоматизированная система обучения
АСОДУ — автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления
АСТПП — автоматизированная система технологической подготовки производства
АСУ — автоматизированная система управления
АСУП — автоматизированная система управления предприятием
АСУТП — автоматизированная система управления технологическим процессом
АСУТС — автоматизированная система управления техническими средствами
АЦП — аналого-цифровой преобразователь
ВД — база данных
ВЗ — база знаний
ВОВ — выбор оптимального варианта
ВПП — выбор предпочтительных вариантов
ГМ — геометрическое моделирование
ГЭС — гибридная экспертная система
ДИМ — дискретная имитационная модель
ДПП — двухслойная печатная плата
ДС — дискретная система
ЕИП — единое информационное пространство
ЖЦ — жизненный цикл
ЗКП — задачи конструкторского проектирования
ЗППР — задача принятия проектного решения
ЗСС — задача структурного синтеза
ИБ — информационные возможности

ИИ — искусственный интеллект
 ИИС — интеллектуальная информационная система
 ИПИ — информационная поддержка (жизненного цикла) изделий
 ИРС — информационно-расчетная система
 ИС — информационная система
 ИСАПР — интеллектуальная САПР
 ИСУП — интегрированная система управления предприятием
 ИТ — информационная технология
 ИЭТР — интерактивное электронное техническое руководство
 КИАСПУР — комплекс информационно-аналитических средств принятия управленческих решений
 КОС — компьютерная обучающая система
 КСПИ — компьютерное сопровождение и поддержка (жизненного цикла) изделий
 КТПП — конструкторско-технологическая подготовка производства
 ЛИС — логическая информационная система
 ЛП — лингвистическая переменная
 ЛПР — лицо, принимающее решения
 МГ — машинная графика
 МКП — монтажно-коммутационное пространство
 МКР — метод конечных разностей
 МКЭ — метод конечных элементов
 ММ — математическая модель
 МО — математическое обеспечение
 МЦ — моделирующий центр
 МШВ — модель (метод) Шортлифа и Вьюкенена
 НИР — научно-исследовательские разработки
 НТД — нормативно-техническая документация
 ОКР — опытно-конструкторские разработки
 ООД — окончное оборудование данных
 ОП — оптимальное проектирование
 ОС — операционная система
 ПД — принцип действия
 ПК — персональный компьютер
 ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема
 ПМК — программно-методический комплекс
 ПН — показатель надежности
 ПО — программное обеспечение
 ПП — печатная плата
 ППМ — приемно-передающий модуль
 ППП — пакет прикладных программ
 ПФ — передаточная функция
 РГ — рабочая группа

РЭС — радиоэлектронное средство
 САПР — система автоматизированного проектирования
 САПР-К — САПР конструктора
 САПР-Т — САПР технолога
 САР — система автоматического распознавания
 СВИС — сверхбольшая интегральная схемы
 СМО — система массового обслуживания
 СОИ — система обработки информации
 СППР — система поддержки принятия решений
 СУБД — система управления базами данных
 СУР — система управления рисками
 СУП — система управления проектами
 СЭД — система электронного документооборота
 ТДШ — теория Демпстера – Шафера
 ТЗ — техническое задание
 ТП — технологические процессы
 ТПП — технологическая подготовка производства
 ТТХ — тактико-технические характеристики
 УСО — устройство сопряжения с объектом
 ФП — функция принадлежности
 ЦН — целевое назначение
 ЦАП — цифро-аналоговые преобразователи
 ЦАС — цифровые автоматические системы
 ЦВД — цифровые временные дискриминаторы
 ЦСЧ — цифровые синтезаторы частот
 ЦФ — цифровые фильтры
 ЦФД — цифровые фазовые детекторы
 ЦЧД — цифровые частотные дискриминаторы
 ЭК — экспертная комиссия
 ЭС — экспертная система
 ЭСМ — ЭС, основанная на моделях
 ЭСО — ЭС, основанная на опыте
 ЭСП — ЭС, основанная на правилах
 ARM — Application Requirements Model — модель данных, представленная обычными средствами приложения
 AP — Application Protocol — прикладной протокол
 B2A — Business-to-Administration — бизнес для администрации
 B2B — Business-to-Business — бизнес для бизнеса
 B2C — Business-to-Customer — бизнес для клиента
 B2P — Business-to-Public — бизнес для общества
 C2C — Consumer-to-Consumer — клиент для клиента*
 CAD — Computer Aided Design — системы автоматизированного проектирования

* Схемы взаимодействия в электронной коммерции.

- CAE — Computer Aided Engineering — автоматизированная подготовка производства
- CALS — Continuous Acquisition and Lifecycle Support — непрерывный сбор данных и поддержка жизненного цикла (изделий)
- CAM — Computer Aided Manufacturing — система автоматизированного производства
- CASE — Computer Aided Software Engineering — автоматизированная разработка программного обеспечения
- CE — Concurrent Engineering — параллельное проектирование
- CNC — Computer Numerical Control — система ЧПУ с компьютерным управлением
- COM — Common Object Model — общая объектная модель
- CPC — Collaborative Product Commerce — совместный электронный бизнес
- CRM — Customer Requirement Management — система управления взаимоотношениями с заказчиками
- DCOM — Distributed Common Object Model — распределенная общая объектная модель
- DFD — Data Flow Diagram — диаграмма потока данных
- DSS — Decision Support System — системы поддержки принятия решений
- EAM — Enterprise Asset Management — управление активами предприятия
- ECAD — Electronic Computer Aided Design — машинное проектирование электронных компонентов
- e-CRM — electronic CRM — управление взаимоотношениями с клиентами в электронной коммерции
- EDI — Electronic Data Interchange — электронный обмен данными
- ERP — Enterprise Resource planning — планирование ресурсов предприятия
- ES — Expert Systems — экспертная система
- HTML — Hypertext Markup Language — язык разметки гипертекстов
- ICAM — Integrated Computer-Aided Manufacturing — интегрированная система автоматизированного производства
- IDE — Integrated Development Environment — интегрированная среда разработки
- IDEF — Integrated DEFinition — интегральные определения (наименование методологий, например: IDEF/1X — построение реляционных баз данных; IDEF/O — построение моделей бизнес-процессов)
- IP — Internet Protocol — интернет-протокол

- ISO — International Standard Organization — Международная организация стандартизации
- LAN — Local Area Network — локальная вычислительная сеть
- MCAD — Mechanical CAD — машинное проектирование механических структур
- MES — Manufacturing Execution System — производственная исполнительная система
- MRP — Material Requirements Planning — планирование материальных ресурсов
- OLAP — On-Line Analytical Processing — аналитическая обработка в реальном времени
- OSA — Object-Oriented System Analysis — объектно-ориентированный анализ систем
- PDM — Product Data Management — менеджмент спецификаций выпускаемой продукции
- QS — Quality System — система качества
- RAD — Rapid Application Development — быстрая разработка приложений
- SADT — Structured Analysis and Design Technique — метод структурного анализа и проектирования
- SCADA — Supervisory Control and Data Acquisition — система диспетчерского управления и сбора данных
- SCM — Supply Chain Management — системы управления цепочками поставок
- STEP — Standard for Exchange of Product data — стандарт обмена данными в моделях продуктов
- S&SM — Sales and Service Management — управление продажами и обслуживанием
- UML — Unified Modeling Language — унифицированный язык моделирования
- WAN — Wide Area Network — территориальная сеть
- WWW — World Wide Web — «всемирная паутина» (служба Интернета)
- XML — eXtensible Markup Language — расширяемый язык разметки текста

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Функциональное моделирование бизнес-процессов в программе Allfusion Process Modeler — BPwin

Реорганизация деятельности предприятия, вызванная внедрением корпоративных информационных систем, связана с серьезным риском. Существующие методики и инструментальные средства позволяют минимизировать риски и решать ключевые вопросы, возникающие на различных этапах реорганизации бизнес-процессов предприятия.

AllFusion Process Modeler — ранее BPwin — инструмент для моделирования, анализа, документирования и оптимизации бизнес-процессов, который помогает четко документировать важные аспекты любых бизнес-процессов: действия, которые необходимо предпринять, способы их осуществления и контроля, требующиеся для этого ресурсы, а также визуализировать получаемые от этих действий результаты.

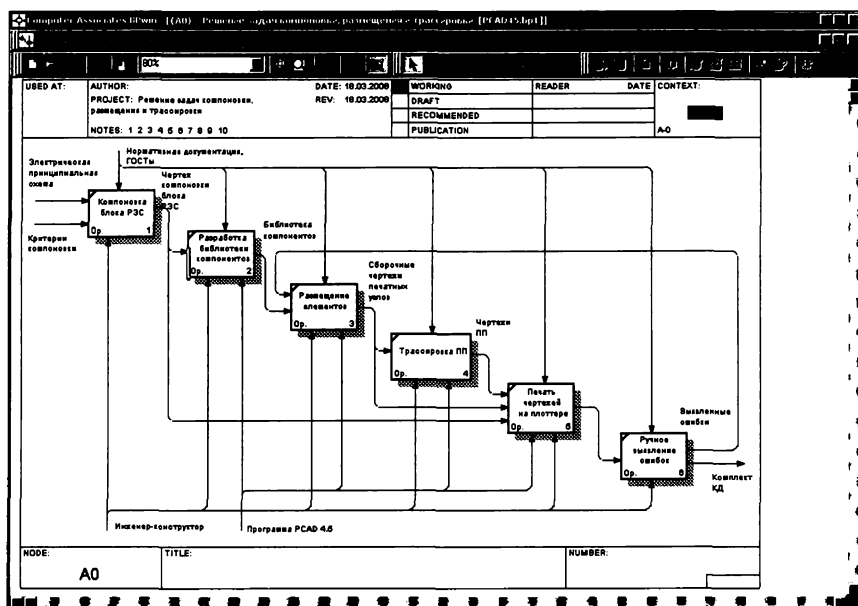


Рис. П1.1. Функциональная модель «Как есть»

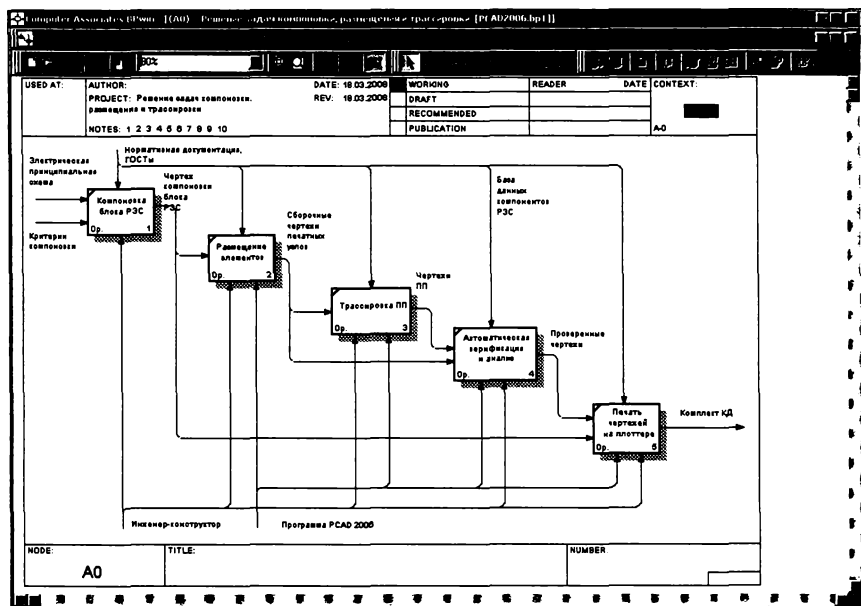


Рис. П1.2. Функциональная модель «Как должно быть»

AllFusion Process Modeler поддерживает три стандартные нотации — IDEF0 (функциональное моделирование), DFD — моделирование потоков данных и IDEF3 (моделирование потоков работ), полностью поддерживает методы расчета себестоимости по объему хозяйственной деятельности — функционально-стоимостной анализ, содержит собственный генератор отчетов. В результате обследования предприятия строится функциональная модель существующей организации бизнес-процессов — модель «Как есть» «As-is». Эта модель позволяет выяснить «что мы делаем сегодня», чтобы потом перейти к тому «что мы будем делать завтра». Анализ функциональной модели «Как есть» позволяет понять, где находятся наиболее слабые места, в чем будут состоять преимущества новых бизнес-процессов и насколько глубоким изменениям подвергнется существующая структура организации процесса. Детализация бизнес-процессов позволяет выявить недостатки организации даже там, где функциональность на первый взгляд кажется очевидной. Признаком неэффективной деятельности могут быть бесполезные, неуправляемые и дублирующие работы, неэффективный документооборот. Например, нужный документ не оказывается в нужном месте в нужное время, отсутствие обратных связей по управлению — на проведение работы не оказывает влияния ее результат и входу — объекты или информация используются нерационально и т. д.

Пример модели «Как есть» применительно к процессам решения задач проектирования печатных плат приведен на рис. П1.1.

Найденные в модели «Как есть» недостатки, например действия, связанные с разработкой библиотеки компонентов и ручным выявлением ошибок, можно исправить при создании модели «Как должно быть» — «To-be» — модели новой организации бизнес-процессов. Пример функциональной модели «Как должно быть» приведен на рис. П1.2.

Модель «Как должно быть» позволяет оценить последствия изменений процессов и выполнить анализ альтернативных/лучших путей выполнения работы и документирования того, как предприятие будет функционировать в будущем.

Приложение 2. Использование САПР P-CAD при проектировании РЭС

Система P-CAD — Personal Computer Aided Design широко используется для автоматизированного проектирования печатных плат. Данный пакет включает в себя средства, позволяющие пользователю создавать описания радиоэлектронных компонентов, электрических

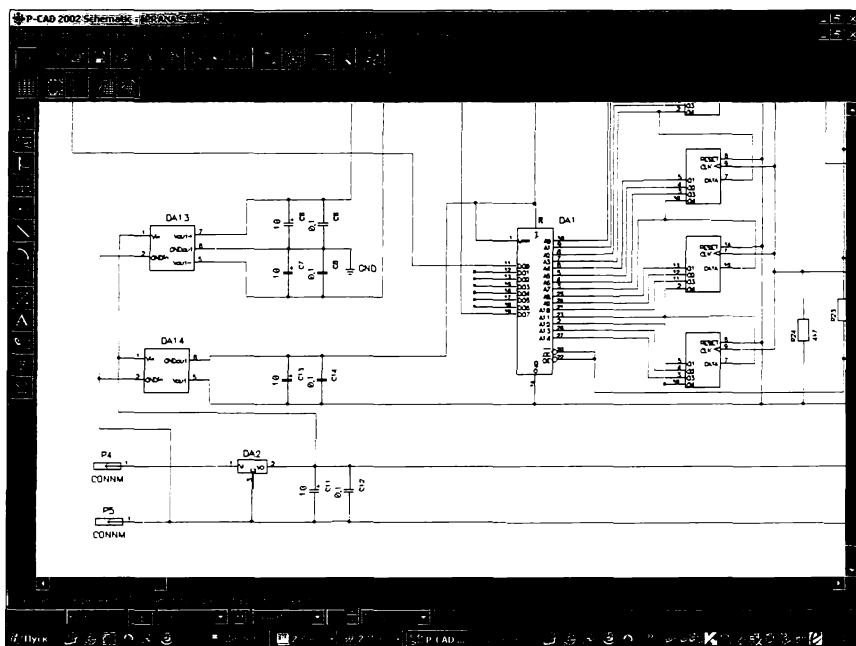


Рис. П2.1. Окно графического редактора электрических схем системы P-CAD с фрагментом электрической принципиальной схемы

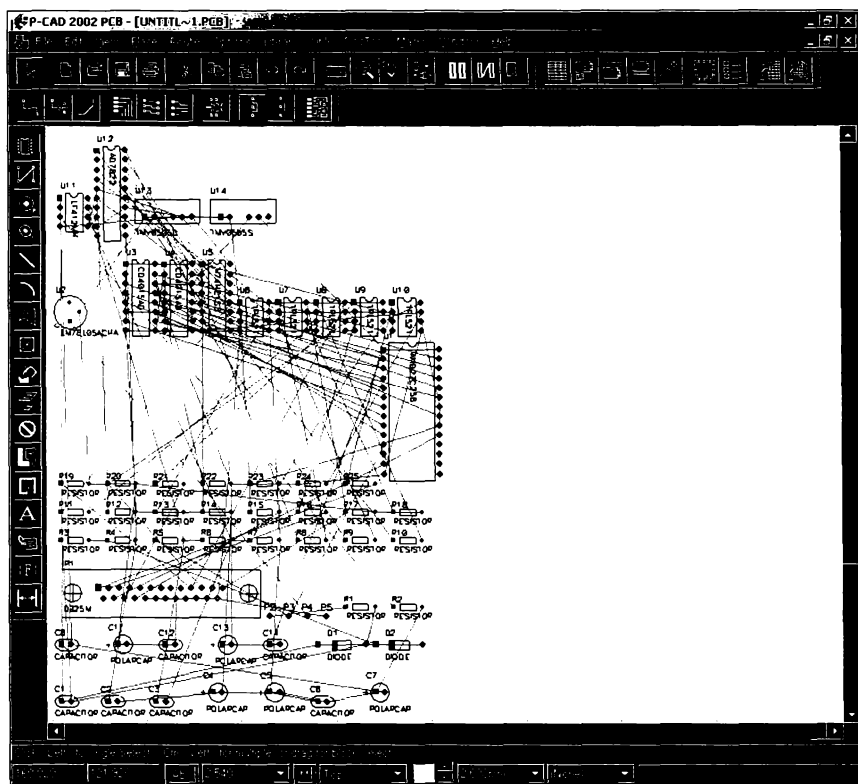


Рис. П2.2. Графический редактор печатных плат системы P-CAD и представление корпусов электрорадиоэлементов

принципиальных схем, задавать форму печатной платы, размещать электронные компоненты на плате, а также выполнять трассировку печатной платы. Результаты могут выдаваться на принтер, плоттер и фототаблон.

Используя возможности схемного редактора программы P-CAD, можно создать заново или перевести уже имеющуюся электрическую принципиальную схему в электронный вид. Пример фрагмента электрической принципиальной схемы представлен на рис. П2.1.

С помощью электронных библиотек и утилит системы P-CAD информация об электрической принципиальной схеме передается в графический редактор печатных плат (рис. П2.2) для графического представления корпусов электрорадиоэлементов и связей между ними.

Далее возможно размещение элементов вручную на монтажно-коммутационном поле или использование других программных продуктов для автоматического решения задачи размещения, в част-

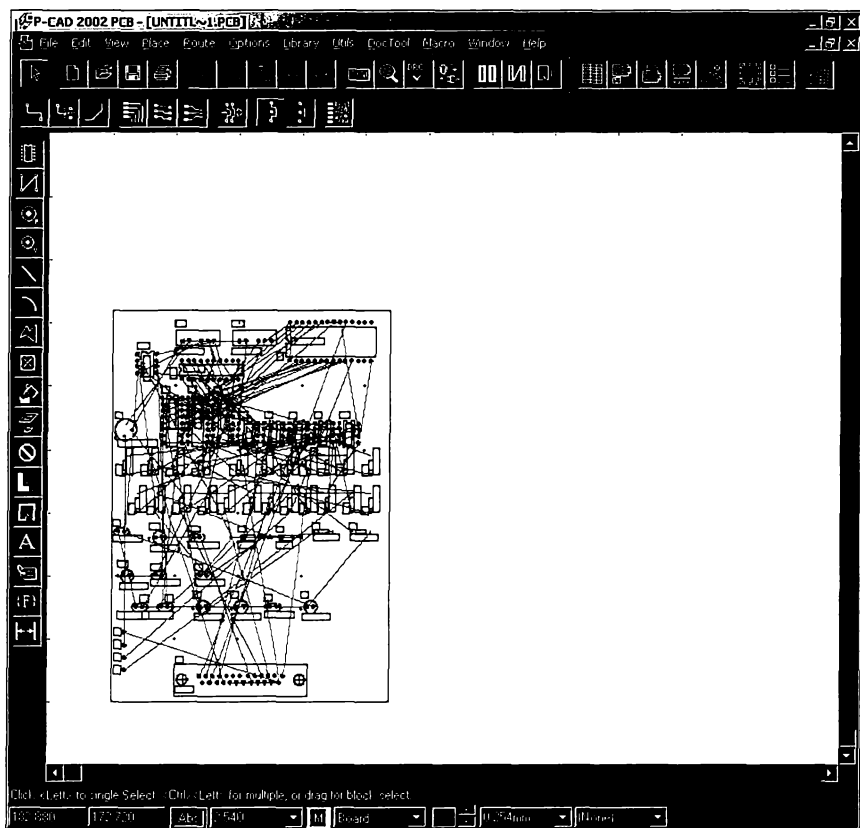


Рис. П2.3. Пример ручного размещения элементов на поверхности печатной платы

ности программы SPECCTRA. Пример ручного размещения представлен на рис. П2.3.

Для выполнения трассировки печатной платы имеются следующие возможности:

- ручная или интерактивная трассировка с использованием программы P-CAD;
- автоматическая трассировка с использованием системы P-CAD; возможно использование четырех встроенных автоурутеров;
- автоматическая трассировка с использованием сторонних программных продуктов.

В качестве примера на рис. П2.4 показан результат автоматической трассировки с использованием встроенного автоурутера P-CAD Shape-Based Router. В данном примере трассировка выполняется в двух слоях при ширине дорожки 2 мм.

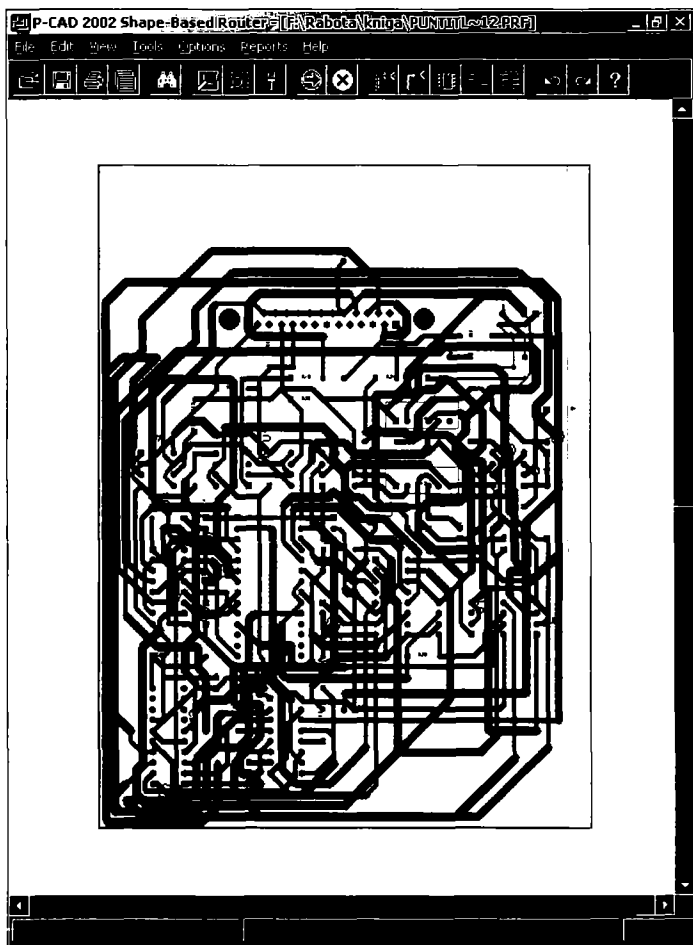


Рис. П2.4. Пример автоматической трассировки с использованием встроенного бессеточного трассировщика P-CAD Shape-Based Router

Для решения задач трассировки программа P-CAD обладает большими возможностями, она позволяет работать с числом слоев до 99 и шириной дорожки до 10 мм, имеется широкий набор правил для учета особенностей решаемых задач.

Приложение 3. Применение программы System View

Программа SystemView предназначена для проектирования компонентов радиосистем, выполняющих функции аналоговой, цифровой и аналого-цифровой обработки сигналов. Программа позволяет созда-

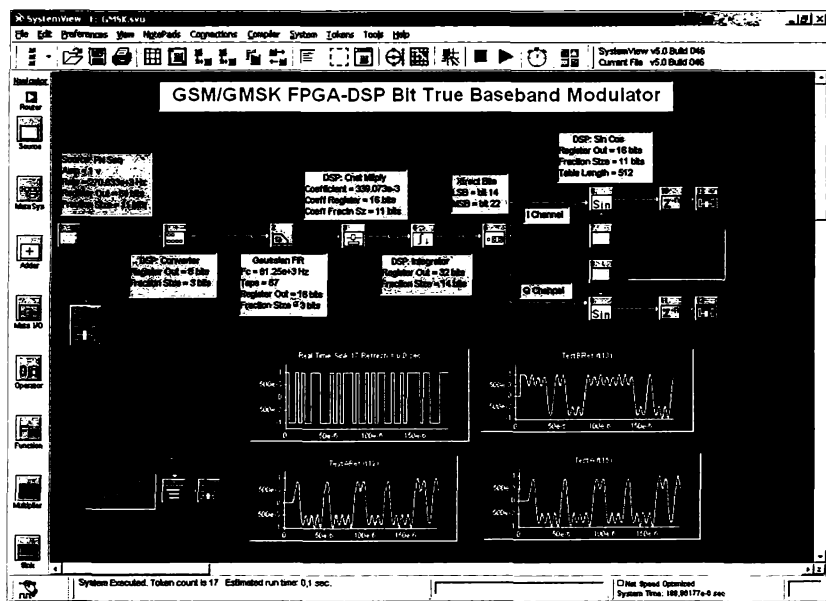


Рис. ПЗ.1. Окно с результатами моделирования GSM/GMSK модулятора

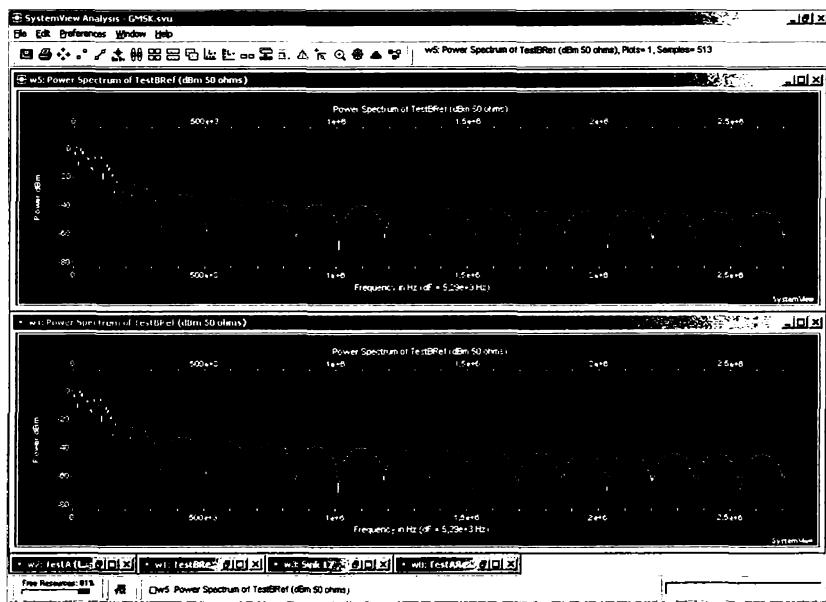


Рис. ПЗ.2. Окно отображения результатов анализа

вать функциональные схемы устройств из стандартных библиотечных элементов, моделировать их работу при воздействии различных сигналов и помех. SystemView позволяет использовать библиотеки пользователей, модели, созданные в программе MATLAB, описания цифровых процессов обработки сигнала на языках VHDL и Verilog, созданные с помощью программы Expressive и др.

В качестве примера на рис. ПЗ.1, ПЗ.2 приведены результаты моделирования GSM-модулятора. По завершении этапа моделирования цифрового устройства данные о его структуре могут быть переданы в программу синтеза программируемых логических схем — ПЛИС фирмы Xilinx. К достоинствам программы SystemView следует отнести наличие большого количества специализированных библиотек, которые позволяют оперативно решать задачи анализа функционирования широкого класса РЭС.

Приложение 4. Разработка и оформление конструкторской документации в среде sPlan

Программа **sPlan** используется для оформления электрических схем, она позволяет легко переносить символы из библиотеки элементов на схему и привязывать их к координатной сетке. Программа

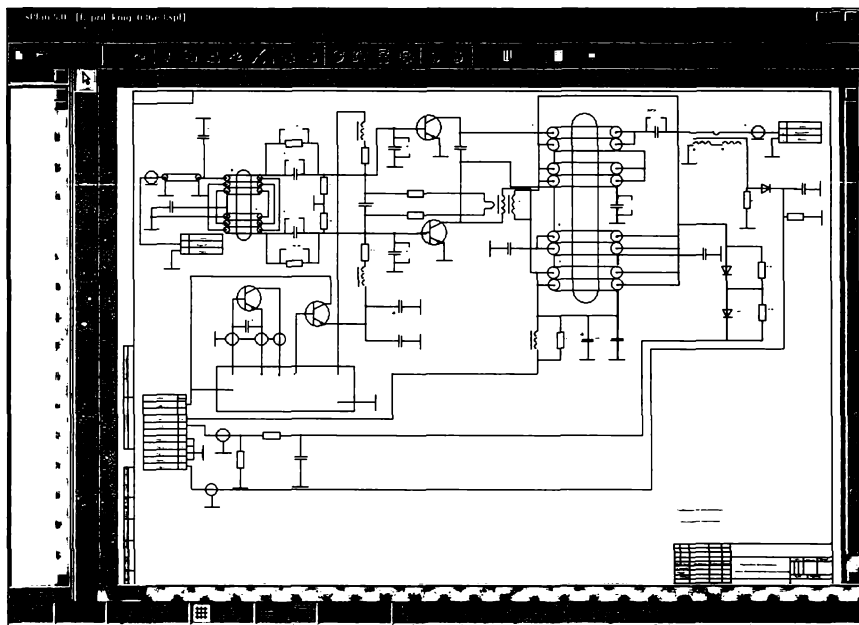


Рис. П4.1. Схема электрическая принципиальная оконечного УМ КВ диапазона

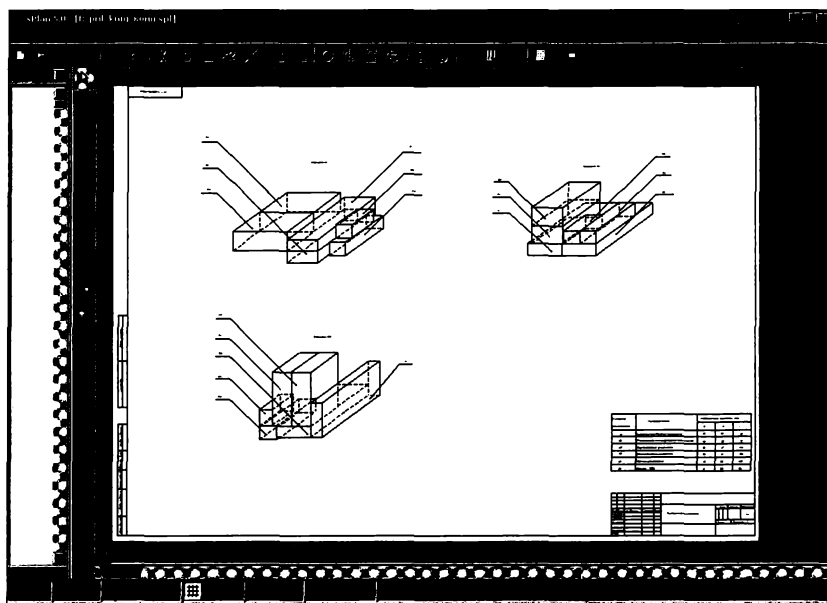


Рис. П4.2. Чертеж компоновочный усилителя мощности КВ диапазона (три варианта компоновки блока РЭС)

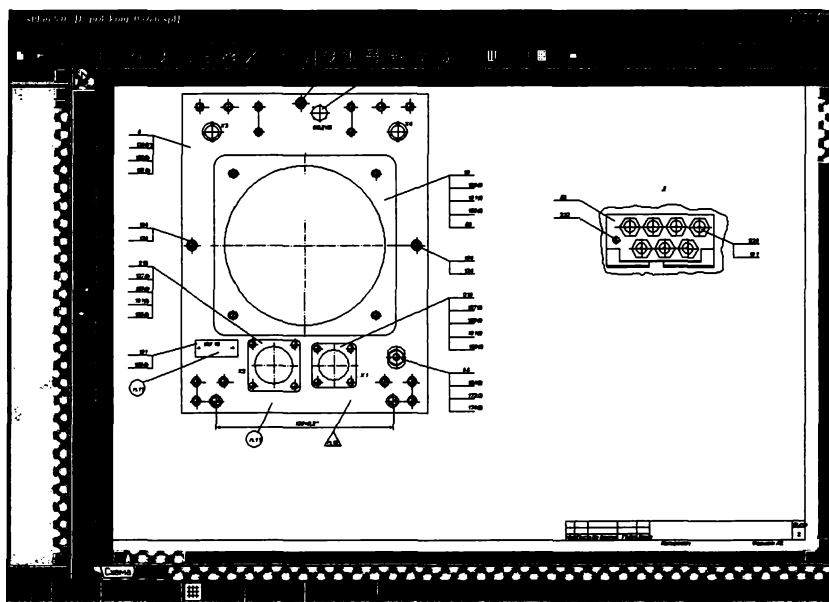


Рис. П4.3. Фрагмент сборочного чертежа несущей конструкции блока

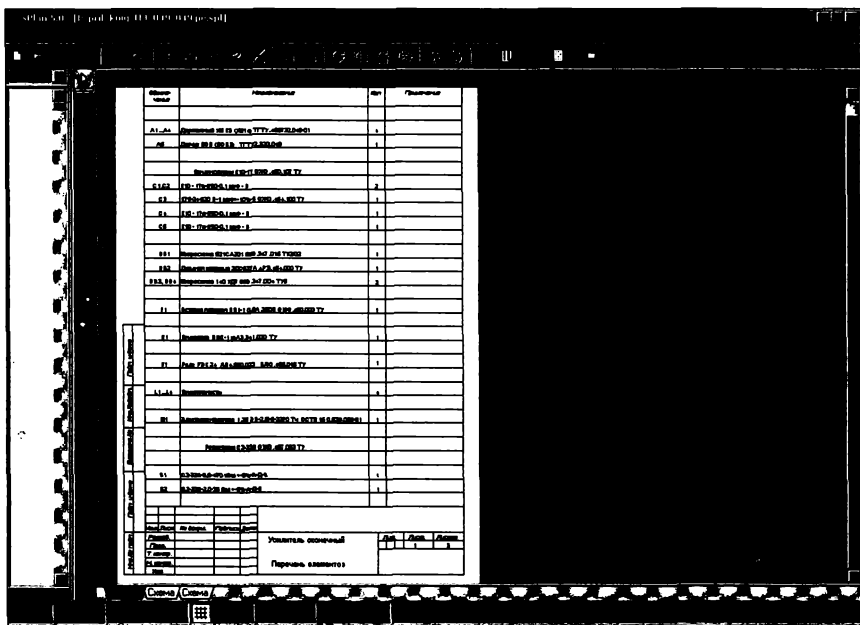


Рис. П4.4. Фрагмент перечня элементов оконечного УМ КВ диапазона

содержит инструменты для черчения и редактирования, предусмотрены автонумерация элементов, составление списков элементов и т. п. Создаваемые файлы для печати могут быть предварительно просмотрены, имеется возможность изменения масштаба и расположения схемы на листе. Программа содержит хорошо организованные и богатые библиотеки элементов, которые легко редактировать. Для создания собственных элементов предусмотрен специальный редактор. Это существенно облегчает работу пользователей.

На рис. П4.1—П4.4 приведены примеры разработки конструкторских документов в программе **sPlan**.

Приложение 5. Разработка и оформление конструкторской документации в среде Microsoft Visio

В настоящее время для разработки и оформления различной графической конструкторской документации — схем, чертежей, диаграмм и т. п. — находит применение пакет Microsoft Visio. Достоинствами пакета являются простой интуитивно понятный интерфейс, совместимость с векторными форматами DWG, DXF, WMF, с растровыми форматами JPG, TIFF, BMP, GIF и другими, а также возможность

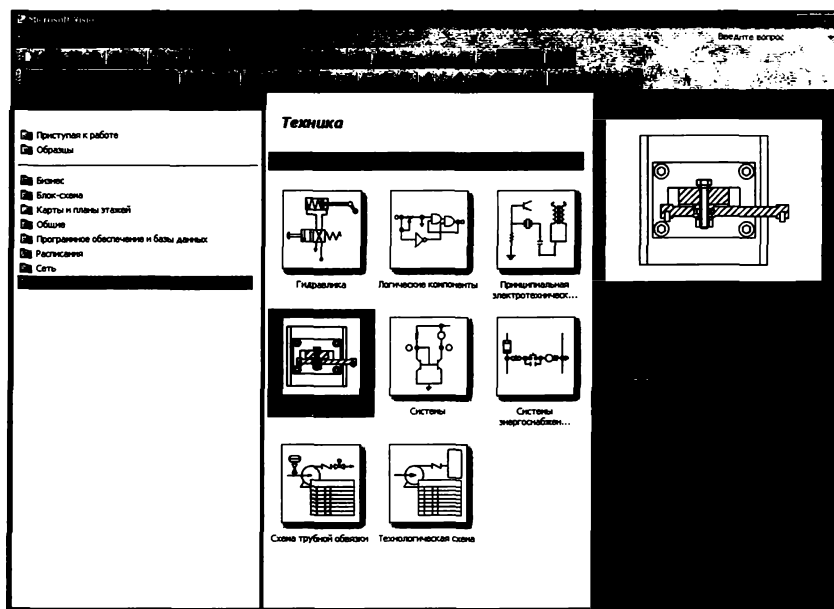


Рис. П5.1. Главное окно программы Microsoft Visio 2007

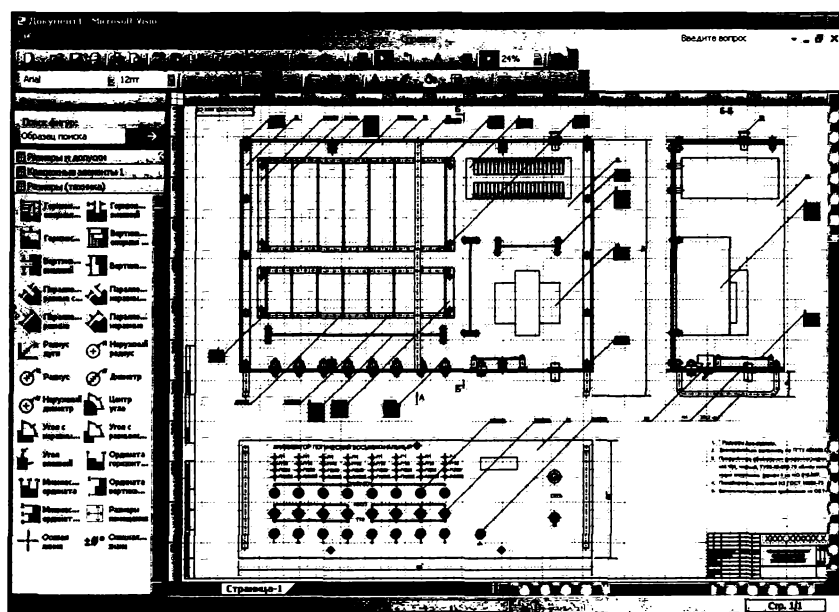


Рис. П5.2. Разработка сборочного чертежа

импорта чертежей из различных САПР. Наличие интерактивной справочной системы облегчает получение необходимой информации.

Последней на сегодняшний день версией пакета является Microsoft Visio 2007. На рис. П5.1 приведено главное окно программы, в котором необходимо для начала работы выбрать нужный шаблон из соответствующей категории.

Пакет Visio содержит обширную подборку библиотек готовых образов условно-графических обозначений электрорадиоэлементов. Коллекцию библиотек можно пополнять, создавая новые элементы или редактируя имеющиеся в соответствии с требованиями ЕСКД. На рис. П5.2 в качестве примера показан сборочный чертеж блока РЭС, созданный в среде Microsoft Visio.

Доступность пакета, относительно невысокая стоимость и неплохие функциональные возможности позволяют рекомендовать студентам Microsoft Visio в качестве рабочей среды, для оформления курсовых и дипломных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация проектирования систем и средств управления / А.Ф. Иванько, М.А. Иванько, В.Г. Сидоренко, Г.В. Фалк. — М.: Изд-во МГУП, 2001. — 148 с.
2. Алексеев О.В. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров и др.; под ред. О.В. Алексеева. — М.: Высшая школа, 2000. — 479 с.
3. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / Под ред. В.Е. Дулевича. — М.: Радио и связь, 1984. — 248 с.
4. Андрейчиков А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчиков. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 368 с.
5. Арчибальд Р. Управление высокотехнологичными программами и проектами [пер. с англ.] / Р. Арчибальд. — М.: ДМК Пресс, 2002. — 464 с.
6. Верхоплатский П.Д. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры / П.Д. Верхоплатский, В.С. Латинский. — Л.: Судостроение, 1983. — 232 с.
7. Гаскаров Д.В. Интеллектуальные информационные системы / Д.В. Гаскаров. — М.: Высшая школа, 2003. — 431 с.
8. Гель П.П. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры / П.П. Гель, Н.К. Иванов-Есипович. — Л.: Энергия, 1972. — 232 с.
9. Всеобщее управление качеством / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров, Ю.В. Зорин; под ред. О.П. Глудкина. — М.: Радио и связь, 1999. — 600 с.
10. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств / Л.С. Гуткин. — М.: Радио и связь, 1986. — 288 с.
11. Евгениев Г.Б. Системология инженерных знаний / Г.Б. Евгениев. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 376 с.
12. Информационные технологии управления / Под ред. проф. Г.А. Титоренко. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. — 280 с.
13. Калянов Г.Н. CASE-технологии. Консалтинг в автоматизации бизнес-процессов / Г.Н. Калянов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2002. — 320 с.
14. Корячко В.П., Норенков И.П. Теоретические основы САПР / В.П. Корячко, И.П. Норенков. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 400 с.
15. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР / В.М. Курейчик. — М.: Радио и связь, 1990. — 352 с.
16. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB fuzzy TECH / А.В. Леоненков. — СПб.: ВХВ-Петербург, 2003. — 736 с.

17. Люггер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем [пер. с англ.] / Дж. Ф. Люггер. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. — 864 с.
18. Малин А.С. Исследование систем управления / А.С. Малин, В.И. Курейчик. — М.: ГУ ВШЭ, 2002. — 400 с.
19. Нейлор К. Как построить свою экспертную систему [пер. с англ.] / К. Нейлор. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 286 с.
20. Норенков И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 320 с.
21. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 336 с.
22. Основы систем автоматизированного проектирования / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.В. Кожевникова. — Изд-во Казанского университета, 1988. — 353 с.
23. Отраслевой стандарт Госкомвуза РФ. Информационные технологии в высшей школе. Термины и определения. 01.002-95.
24. Петров В.Н. Информационные системы / В.Н. Петров. — СПб: Питер, 2003. — 688 с.
25. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества / А.И. Половинкин. — М.: Машиностроение, 1988. — 368 с.
26. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект — основа новой информационной технологии / Г.С. Поспелов. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
27. Пупков К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. — 348 с.
28. Романов В.П. Интеллектуальные информационные системы в экономике / В.П. Романов; под ред. д-ра экон. наук, проф. Н.П. Тихомирова. — М.: Экзамен, 2003. — 496 с.
29. Скрипкин К.Г. Экономическая эффективность информационных систем / К.Г. Скрипкин. — М.: ДМК Пресс, 2002. — 256 с.
30. Советов В.Я. Моделирование систем / В.Я. Советов, С.А. Яковлев. — М.: Высшая школа, 2005. — 343 с.
31. Таха Х.А. Введение в исследование операций / Х.А. Таха. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 912 с.
32. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры / И.П. Вушминский, О.Ш. Даутов, А.П. Достанко и др.; под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. — М.: Радио и связь, 1989. — 624 с.
33. Томаси У. Электронные системы связи / У. Томаси. — М.: Техносфера, 2007. — 1360 с.
34. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам [пер. с англ.] / Д. Уотермен. — М.: Мир, 1989. — 388 с.
35. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагучи / Пер. с англ. и научное редактирование д-ра техн. наук, проф. А.М. Талалая. — М.: Сейфи, 2002. — 384 с.
36. Уткин В.В. Информационные системы и технологии в экономике / В.В. Уткин, К.В. Валдин. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. — 335 с.

37. *Хаммер М.* Реинжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе [пер. с англ.] / М. Хаммер, Дж. Чампи. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2006. — 304 с.

38. *Чейз Р.Б.* Производственный и операционный менеджмент [пер. с англ.] / Р.Б. Чейз, Н.Дж. Эквилайн, Р.Ф. Якобс. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 704 с.

39. CALS. Поддержка жизненного цикла продукции. Руководство по применению. — М.: Мин-во экономики РФ, НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», ГУП «ВИМИ», 2000. — 44 с.

40. Delphi 7 / А.Ф. Иванько, М.А. Иванько, В.Г. Сидоренко, Г.Б. Фалк. — М.: Изд-во МГУП, 2001. — 148 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	6
1.1. Роль информационных технологий в современном обществе	6
1.2. Основные определения	12
1.3. Состав информационных технологий и систем	20
1.4. Классификация информационных технологий и систем . .	24
1.5. Свойства автоматизированных информационных техноло- гий и систем	27
1.6. Принципы и методология развития ИТ	32
Контрольные вопросы . .	39
Глава 2. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЭС	40
2.1. Задачи проектирования	40
2.2. Особенности РЭС как объектов автоматизированного про- ектирования	43
2.3. Стадии процесса проектирования	46
2.4. Особенности проектирования конструкции РЭС	48
2.5. Автоматизация технологической подготовки производства РЭС.	51
2.6. Принципы автоматизации проектирования	53
Контрольные вопросы . .	61
Глава 3. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ .	63
3.1. Математическое обеспечение САПР	68
3.2. Программное обеспечение САПР	73
3.3. Лингвистическое обеспечение САПР	76
3.4. Информационное обеспечение САПР	85
3.4.1. Базы данных и системы управления ими	85
3.4.2. Реляционные базы данных . .	92
3.5. Техническое обеспечение САПР	101
3.6. Другие виды обеспечения САПР	108
3.7. Примеры САПР	109
3.7.1. САПР схемотехнического проектирования	109
3.7.2. САПР для проектирования печатных плат	111

3.7.3. САПР для геометрического моделирования и компьютерной графики	112
Контрольные вопросы...	113
Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.	115
4.1. Требования к математическим моделям РЭС..	115
4.2. Математические модели на микроуровне	126
4.3. Математические модели на макроуровне	130
4.4. Моделирование цифровых устройств	135
4.5. Графовые модели конструкций РЭС	145
4.6. Математические модели на системном уровне	154
4.7. Модели массового обслуживания	158
4.8. Модели надежности	175
4.9. Информационные технологии для решения задач моделирования	201
Контрольные вопросы...	205
Глава 5. МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	207
5.1. Состав и принципы систем автоматизированного проектирования	207
5.2. Задачи системотехнического проектирования	213
5.3. Методы принятия решений в условиях полной неопределенности	220
5.4. Методы принятия решений в условиях частичной неопределенности	232
5.5. Методы, позволяющие учитывать дополнительную информацию	242
5.6. Методы нечеткой логики	262
5.7. Задачи схемотехнического проектирования	268
5.7.1. Задачи структурного синтеза	271
5.7.2. Задачи параметрического синтеза	275
5.8. Задачи конструкторского проектирования	279
5.9. Алгоритмы решения задач компоновки	283
5.10. Алгоритмы решения задач размещения	301
5.11. Алгоритмы решения задач трассировки	311
Контрольные вопросы..	321
Глава 6. НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ..	323
6.1. Информационные системы поддержки принятия решений	323
6.2. Экспертные системы	328
6.3. Комплексные интеллектуальные САПР	336
6.4. Автоматизированные системы технологической подготовки производства	338

6.5. Эффективность САПР	344
6.6. CALS-технологии	348
Контрольные вопросы..	356
Заключение.....	357
Список сокращений.....	359
Приложения	364
Список литературы	376

10'00V ZAL

100000-111

Учебное издание

Муромцев Юрий Леонидович

Муромцев Дмитрий Юрьевич

Тюрии Илья Вячеславович

Кольтюков Николай Александрович

Белоусов Олег Андреевич

**Информационные технологии проектирования
радиоэлектронных средств**

Учебное пособие

Редактор Ю. Н. Чернышов

Технический редактор Н. И. Горбачева

Компьютерная верстка: Ю. Н. Чернышов

Корректоры А. П. Сизова, Е. В. Кудряшова

Изд. № 101112935. Подписано в печать 22.01.2010. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,0.
Тираж 1 500 экз. Заказ № 29813.

Образовательно-издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
125252, Москва, ул. Зорге, д. 9А, стр. 2, пом. 95.
Адрес для корреспонденции: 129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1, а/я 48.
Тел./факс: (495)648-0507, 616-0029.
Санитарно-эпидемиологическое заключение №77.99.60.953.Д.007831.07.09 от
06.07.2009.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленных издательством
электронных носителей в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат».
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. www.sarpk.ru



Издательский центр «Академия»

Учебная литература
для профессионального
образования

Наши книги можно приобрести (оптом и в розницу)

Москва:

129085, Москва, пр-т Мира, д. 101 в, стр. 1
(м. Алексеевская)
Тел.: (495) 648-0507, факс: (495) 616-0029
E-mail: sale@academia-moscow.ru

Филиалы:

ООО ОИЦ «Академия-Северо-Запад»
190020, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала,
д. 211-213, литер «В»
Тел./факс: (812) 251-9253, 575-3229
E-mail: fspbacad@peterstar.ru

Приволжский

603101, Нижний Новгород, пр. Молодежный,
д. 31, корп. 3
Тел./факс (831) 259-7431, 259-7432, 259-7433
E-mail: pf-academia@bk.ru

Уральский

620144, Екатеринбург, ул. Щорса, д. 92а, корп. 4
Тел.: (343) 257-1006
Факс: (343) 257-3473
E-mail: academia-ural@mail.ru

Сибирский

630108, Новосибирск, ул. Станционная, д. 30
Тел./факс: (383) 300-1005, 341-8515
E-mail: academia_sibir@mail.ru

Дальневосточный

680014, Хабаровск, Восточное шоссе, д. 2а
Тел./факс: (4212) 27-6022
E-mail: filialdv-academia@yandex.ru

Южный

344082, Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская,
д. 10/65
Тел.: (863) 203-5512
Факс: (863) 253-8566
E-mail: academia-UG@mail.ru

Представительства:

в Республике Татарстан
420034, Казань, ул. Горсоветская,
д. 17/1, офис 36
Тел./факс: (843) 562-1045
E-mail: academia_kazan@mail.ru

в Республике Дагестан
Тел.: 8-928-982-9248

www.academia-moscow.ru



**Предлагаем
вашему вниманию
следующие книги:**

Г. Ф. БАКАНОВ, С. С. СОКОЛОВ,

В. Ю. СУХОДОЛЬСКИЙ

**ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Под ред. И. Г. Мироненко

Объем 368 с.

В учебном пособии рассмотрены основы системного подхода к проектированию конструкций и технологий радиоэлектронных средств. Изложены методы и средства обеспечения их устойчивости к воздействию факторов условий эксплуатации и технологические процессы производства.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

С. А. КУРИЦЫН

**ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И СИСТЕМЫ**

Объем 304 с.

В учебном пособии рассмотрены принципы организации телекоммуникационных технологий, построение систем, сетей и каналов связи. Изложены вопросы формирования, передачи и обработки сигналов в аналоговых и цифровых системах передачи.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.