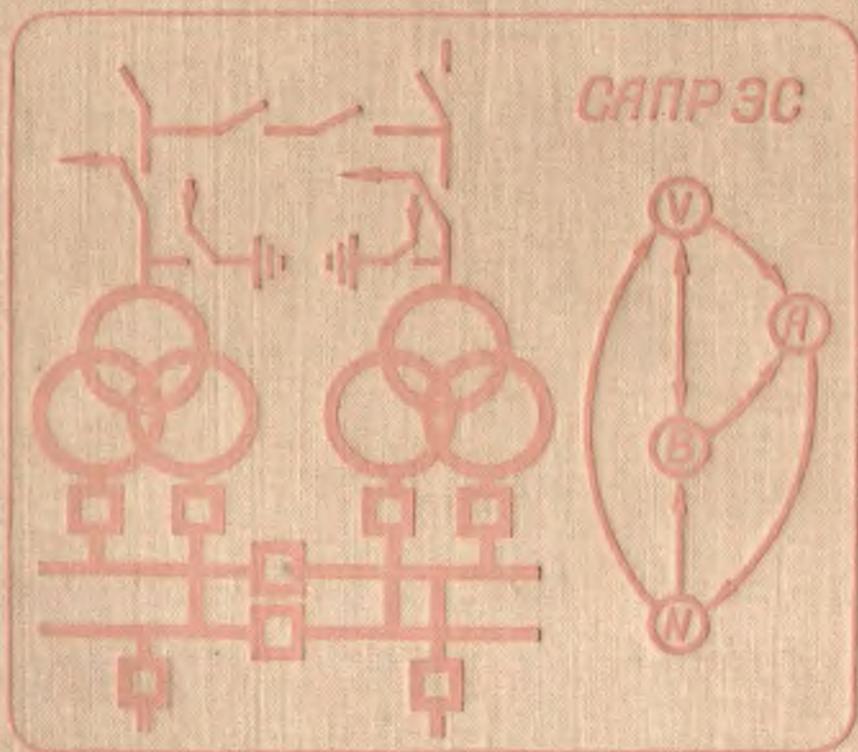


В. Н. Винославский, В. И. Тарадай,  
У. Бутц, Д. Хайнце

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ



# AUTOMATISIERUNG DER PROJEKTIERUNG VON ELEKTROENERGIEVERSOR- GUNGSSYSTEMEN

---

Von Doz. Dr.— Ing. habil. Ulrich Butz  
Doz. Dr.— Ing. Dieter Heinze  
Technische Hochschule Leipzig  
Prof. Kand. techn. Wiss. Wassili N. Winoslawskiy  
Doz. Kand. techn. Wiss. Victor I. Taradaj  
Kiewer Polytechnisches Institut

[www.energobook.ru](http://www.energobook.ru)

МОРЕ КНИГ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКА

BERLIN  
VEZ DEUTSCHER VERLAG  
FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE  
1988

KIEW  
VERLAGSVEREINIGUNG  
„VYŠČA SKOLA“  
1988

В.Н. Винославский, В.И. Тарадай,  
У. Бутц, Д. Хайнце

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

---

*Допущено Министерством  
высшего и среднего специального образования УССР  
в качестве учебного пособия  
для студентов вузов,  
обучающихся по специальности  
«Электроснабжение»*

КИЕВ  
ГОЛОВНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «ВЫЩА ШКОЛА»  
1988

ЛЕЙПЦИГ  
НЕМЕЦКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ОСНОВНЫХ ВИДОВ ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
1988

УДК 658.26:621.311.1

Рецензенты:

канд. техн. наук, доц. П. Ф. Гоголюк (Львовский политехнический институт),  
канд. техн. наук, доц. Е. П. Фомичев (Одесский политехнический институт)

Редакция литературы по информатике и автоматике

Редактор Л. Н. Чмилъ

**А22** Автоматизация проектирования систем электроснабжения/  
В. Н. Винославский, В. И. Тарадай, У. Бутц, Д. Хайнце.— К. :  
Выща шк. Головное изд-во, 1988.— 208 с., 95 ил.— Библиогр. :  
41 назв.

ISBN 5—11—000236—3

В учебном пособии изложены принципы и методология построения САПР электроснабжения на основе системного подхода к моделированию процесса проектирования. Рассмотрены методика последовательного перехода от таблиц решений к таблицам и графам абстрактных конечных автоматов с использованием алгебры логики, а также к построению диалоговых САПР электроснабжения.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроснабжение».

Совместное издание издательского объединения «Выща школа» (Киев) и  
Немецкого издательства основных видов тяжелой промышленности (Берлин)

А  $\frac{2302050000-271}{M211(04)-88}$  КУ—№3—103—1988

ISBN 5—11—000236—3

ББК 31.27—02—5—05я73

© Издательское объединение  
«Выща школа», 1988

© VEB Deutscher Verlag für  
Grundstoffindustrie, 1988

В настоящее время автоматизация проектирования является одним из основных способов повышения производительности труда инженеров-проектировщиков и конструкторов.

Практическая реализация целей, идей и методов автоматизированного проектирования возможна при создании и эксплуатации систем автоматизированного проектирования (САПР), что требует подготовки инженерных кадров разработчиков и пользователей САПР.

Опыт, накопленный при создании и эксплуатации САПР радиоэлектронной промышленности, вычислительной техники, машиностроения, строительства и других отраслей науки и техники, может быть использован в САПР электроснабжения, однако специфические особенности систем электроснабжения (ЭС) как сложных технико-эргатических систем требуют разработки новой методологии их проектирования.

Выполнить проект современной высокоэффективной ЭС с учетом требований Государственных стандартов к качеству электрической энергии при ограниченной численности проектировщиков и в приемлемые сроки можно только за счет внедрения систем автоматизированного проектирования электроснабжения (САПР ЭС).

В процессе неавтоматизированного проектирования преимущественно используются экспериментальные методы исследования и оценки качества проектных решений, получаемых на основе опыта и интуиции инженеров, эмпирическим путем, без привлечения формальных методов [29]. Развитие вычислительной математики и информатики позволило алгоритмизировать и автоматизировать ряд проектных процедур, имеющих однозначную математическую интерпретацию.

Однако для большинства традиционных проектных процедур математическая постановка не очевидна, а их последующая (прямая) алгоритмическая реализация известными математическими методами зачастую неэффективна [20]. Поэтому формализация задач, разработка и выбор математических моделей, методов и алгоритмов выполнения проектных процедур существенно определяют содержание как общей теории автоматизированного проектирования, так и теории автоматизации проектирования систем электроснабжения. При этом ведущая роль в процессе проектирования и принятия проектных решений в САПР сохраняется за человеком, поскольку существуют функции, невыполнимые формальными методами с приемлемыми затратами времени и средств. В результате процесс автоматизированного проектирования сводится к решению конечной последователь-

ности задач приемлемой сложности в режиме взаимодействия человека и ЭВМ.

Специфика проектных задач и требование взаимодействия человека и ЭВМ выдвигают дополнительные требования к техническим средствам САПР — требуются устройства оперативного обмена информацией, документирования и архива проектных решений, создание базы знаний, сохраняющей накопленный опыт проектирования. Поэтому автоматизация проектирования как научно-техническая дисциплина включает:

методологию проектирования и математическое обеспечение; программно-информационное обеспечение, базы данных, пакеты прикладных программ, операционные системы ЭВМ;

технические средства, автоматизированные рабочие места проектировщиков (АРМ-П) с учетом специфики СЭС как объекта проектирования.

Существующие системы проектирования СЭС, использующие вычислительную технику, ориентированы в основном на автоматизацию отдельных процедур или этапов процесса проектирования. Это объясняется сложившейся технологией проектирования, методами и последовательностью выполнения проектных операций, предполагающими участие большого числа специалистов различного профиля и обуславливающими невозможность эффективной оценки руководителем проекта текущего состояния процесса проектирования.

При развитии САПР ЭС и переходе от решения отдельных проектных задач к автоматизированному проектированию СЭС в целом возникает ряд проблем:

совершенствование существующей или разработка новой технологии проектирования СЭС, ориентированной на методы и средства комплексной автоматизации проектирования;

разработка идеологии, методологии, теории таких САПР;

приведение в соответствие с требованиями и возможностями САПР Государственных (ГОСТ) и отраслевых (ОСТ) стандартов, руководящих технических и инструктивных материалов (РТМ), строительных норм и правил (СНиП), нормалей;

реорганизация существующих информационно-архивных служб применительно к новой технологии проектирования и возможностям САПР.

В настоящее время в области автоматизации проектирования электроснабжения не получили должного развития научные обоснования анализа и декомпозиции процесса проектирования и разработки инженерного подхода к программированию проектных процедур. Это является причиной разнотипного подхода проектных организаций к созданию САПР ЭС, что затрудняет взаимный обмен реализованными прикладными программами и пакетами программ. Следствием такого положения является существенное удорожание САПР ЭС при их внедрении в проектную практику.

Таким образом, автоматизацию проектирования систем электроснабжения следует рассматривать как научно-техническую дисциплину, находящуюся в стадии становления. Дальнейшее развитие общей теории автоматизированного проектирования, вычислительной тех-

ники и математики, а также теоретических основ электроснабжения промышленных предприятий позволит существенно сократить сроки проектирования СЭС и повысить их надежность и эффективность.

В связи с этим в учебные планы многих специальностей вузов вводятся дисциплины, способствующие изучению общих принципов, методологии построения, методов и средств автоматизированного проектирования.

Опыт показывает, что проще и эффективнее обучить специалистов по электроснабжению одной новой дисциплине — аппаратным и программным средствам вычислительной техники и САПР, чем специалистам-разработчикам САПР и программного обеспечения овладеть многими электротехническими дисциплинами, составляющими основное содержание специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства». А без этого невозможны разработка и скорейшее внедрение эффективных САПР электроснабжения. Это положение подкрепляется современной тенденцией развития средств вычислительной техники — ориентацией на массовый выпуск и широкое внедрение персональных ЭВМ. При этом пользователь не только получает возможность непосредственного общения с ЭВМ на основе стандартного программного обеспечения, но и приходит к необходимости разработки собственного прикладного программного обеспечения, ориентированного на проблематику его специальности. Поэтому существующее разделение на инженеров-разработчиков и инженеров-пользователей САПР в условиях повсеместного внедрения персональных ЭВМ в проектную практику становится в значительной степени условным. Именно эти обстоятельства и предопределили содержание и порядок изложения учебного материала в данном учебном пособии. При этом учитывалась предварительная подготовка студентов в области вычислительной техники и программирования, полученная в курсах «Вычислительная техника и программирование», «Основы микропроцессорной техники», «АСУ и оптимизация систем электроснабжения».

В основу настоящего учебного пособия положены материалы совместных исследований по автоматизации проектирования систем электроснабжения, проводившихся кафедрой электроснабжения Киевского политехнического института и секцией электроэнергетических установок Высшей технической школы г. Лейпцига (ГДР) и материалы лекций по курсу «Автоматизация проектирования систем электроснабжения», прочитанных в вузах-партнерах.

Изложение отдельных разделов учебного пособия базируется на современных понятиях и методах дискретной математики, особенностью которой является отсутствие непрерывности и предельного перехода, характерных для классической математики. Поскольку в процессе подготовки инженеров в области электроснабжения требуются углубленные знания дискретной математики, приводятся необходимые сведения по отдельным разделам этой дисциплины и предусматривается их изучение в процессе самостоятельной подготовки.

## Глава 1

# ПРИНЦИПЫ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

---

### 1.1. УРОВНИ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ТИПОВЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

Проектирование систем электроснабжения (СЭС) как технического объекта связано с созданием, преобразованием и представлением в принятой форме образа этого объекта. Под проектированием понимается процесс составления описания, необходимого для создания еще не существующего объекта, путем преобразования первичного описания (технического задания), оптимизации заданных характеристик объекта, устранения некорректности исходного описания с последовательным представлением описаний на различных языках для различных этапов проектирования.

Результат проектирования — полный комплект технической документации, содержащий необходимые сведения для сооружения и эксплуатации СЭС в заданных условиях. Эта документация, являясь окончательным описанием объекта проектирования, по сути знаковая модель СЭС, представленная в схемах, чертежах, таблицах и текстовых описаниях, созданных коллективом проектировщиков на основе логического анализа, расчетов и сопоставления вариантов [26].

В процессе преобразования исходного описания в окончательное возникают промежуточные описания, которые называются *проектными решениями* и являются предметом анализа для выбора путей дальнейшего проектирования или определения его окончания.

Процесс проектирования, в котором проектные решения получают взаимодействием пользователей-проектировщиков и ЭВМ, называют *автоматизированным*.

В теории проектирования сложных технических объектов разработаны принципы проектирования, основными из которых являются: декомпозиция и иерархичность описаний объектов; многоэтапность и итерационный характер процесса проектирования; типизация и унификация проектных решений и средств проектирования.

Эти принципы являются следствием ограниченности человеческого восприятия и возможностей средств проектирования при оперировании описаниями сложных систем. Сложность этих описаний должна соответствовать как возможности их восприятия и оценки человеком, так и возможностям их преобразования с помощью имеющихся средств проектирования [29]. Современные технические системы характеризуются столь высокой степенью сложности, что это требование не может быть выполнено в рамках некоторого единого описания объекта и появляется необходимость в структурировании описаний и соответствующем расчленении представлений о проектируемых объектах на иерархические уровни и аспекты.

Разделение описаний по степени детализации отображаемых свойств и характеристик объекта служит основой блочно-иерархического подхода к проектированию [21] и приводит к появлению иерархических уровней абстрагирования в представлениях о проектируемом объекте.

На каждом иерархическом уровне используются свои понятия системы и элементов.

*Системой* называется объект любой природы или совокупность взаимодействующих объектов, обладающих выраженными системными свойствами, т. е. такими, которыми не обладает ни одна из частей системы и не выводимыми из свойств этих частей [13].

Элементом системы является ее часть с однозначно определенными известными свойствами, существенными для поставленной цели (анализа или синтеза системы). На верхнем уровне (уровень 1) подлежащий проектированию объект рассматривается как система  $S$  из  $n$  взаимосвязанных и взаимодействующих элементов  $S_i$  (рис. 1.1). Каждый из объектов  $S_i$  также является довольно сложным объектом, что заставляет рассматривать его на уровне 2 как систему с элементами  $S_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, m_i$ ), где  $m_i$  — число элементов в описании системы  $S_{ij}$ . Обычно выделение элементов  $S_{ij}$  производится по функциональному признаку и продолжается до получения на некотором базовом уровне описаний элементов, которые более не конкретизируются. Части системы, имеющие аналогичные свойства, называются *подсистемами*.

Применительно к системам электроснабжения по функциональному принципу можно выделить следующие подсистемы:

1-й уровень — система электроснабжения;

2-й уровень — подсистемы внешнего электроснабжения, подстанции, распределительные устройства, электрические сети.

Дальнейшее структурирование представлений показано на рис. 1.2, где отображена иерархия функций подсистем в соответствии с иерархической структурой СЭС промышленных предприятий [27]. По функциональному признаку на базовом уровне должны быть выделены элементы СЭС, описание которых в процессе проектирования принимается окончательным. Функциям, выделенным на рисунке, соответствуют элементы:

$T$  (транспортировка электроэнергии из точки  $A$  в точку  $B$ ) — электрические сети внешнего электроснабжения, распределительные сети 6—10 кВ, цеховые сети всех классов напряжения;

$K$  (коммутация) — разединители, отделители, короткозамыкатели, выключатели мощности, выключатели нагрузки, рубильники, автоматы, контакторы;

$P$  (распределение энергии) — распределительные устройства всех типов и классов напряжения;

$ППЭ$  (преобразование параметров потока энергии) — главные и цеховые трансформаторные подстанции, силовые преобразовательные

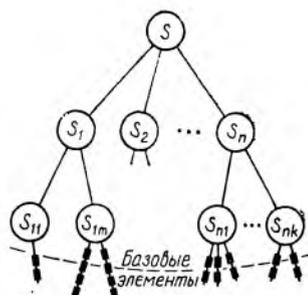


Рис. 1.1. Иерархические уровни описания систем.

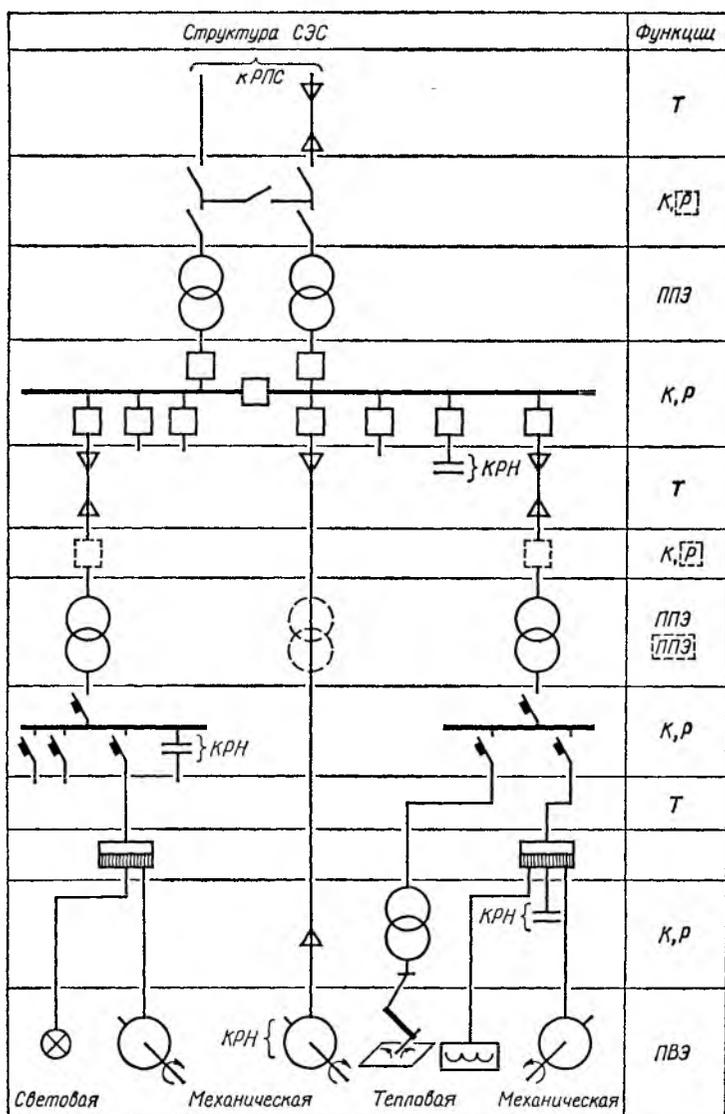


Рис. 1.2. Иерархия функций и уровни структуры систем электроснабжения.

подстанции, преобразовательные агрегаты, трансформаторные подстанции специального назначения (для питания дуговых сталеплавильных печей, электролизных установок, сварочных постов);

ПВЭ (преобразование вида энергии) — электроприемники технологических механизмов, агрегатов, блоков, преобразующие электрическую энергию в другие виды энергии (тепловую, механическую, энергию электрохимических реакций, световую), необходимые в технологических процессах промышленного производства;

*КРН* (компенсация реактивных нагрузок) — синхронные двигатели, конденсаторные установки, источники реактивной мощности.

На рис. 1.2 показана также степень сложности СЭС как объекта проектирования, поскольку последовательность функций на пути потока энергии от источников питания (районные понизительные подстанции — РПС или собственные ТЭЦ предприятия) до конкретного потребителя неодинакова для различных электроприемников (ЭП). Поэтому обозначения некоторых функций, которые могут и не включаться в эту последовательность, отмечены штриховой линией.

Таким образом, если принцип иерархичности означает структурирование описаний объектов по степеням их детальности, то принцип декомпозиции (блочности) — разбиение представлений на каждом уровне на ряд частей (блоков) с возможностью поблочного проектирования объектов  $S_i$  на уровне 1, объектов  $S_{ij}$  на уровне 2 (рис. 1.1) и так далее [29].

Базовыми элементами СЭС при проектировании являются трансформаторы, комплектные устройства, коммутационные электрические аппараты, элементы электрических сетей (кабельные и воздушные линии, токопроводы, шинопроводы, троллеи, специальные электрические сети), силовые щиты, шкафы, сборки, конденсаторные установки и источники реактивной мощности, а также приемники электрической энергии.

При моделировании СЭС, кроме последовательности описаний по степени полноты отражения одного из свойств объекта, используют декомпозицию по характеру различных свойств. Такая декомпозиция обуславливает ряд аспектов, к которым, в первую очередь, относятся функциональные, конструкторские и технологические аспекты.

Функциональный аспект связан с отображениями основных принципов функционирования, характера физических и информационных процессов, протекающих в объекте, и выражается в функциональных, структурных и принципиальных схемах и сопровождающих их документах.

Конструкторский аспект связан с реализацией результатов функционального проектирования, т. е. с определением геометрических характеристик объектов  $i$ -го уровня с учетом их взаимного расположения в пространстве с учетом ограничений, накладываемых другими системами, например компоновка распределительного устройства из комплектных шкафов.

Технологический аспект относится к реализации результатов конструкторского проектирования и связан с описанием методов и средств изготовления объектов, например способ и средства агрегирования секций шинопроводов на стройплощадке для индустриализации монтажных работ.

Проектирование как информационный процесс, развивающийся во времени, расчленяется на стадии, этапы, проектные процедуры и операции.

В настоящее время принято, что по всем намеченным к проектированию предприятиям и сооружениям промышленности должны разрабатываться технико-экономические обоснования (ТЭО) строитель-

ства или реконструкции. При разработке ТЭО сметная стоимость проектируемого объекта достаточно точно определяется по отраслевым укрупненным показателям стоимости. Для СЭС предприятий самостоятельные ТЭО, как правило, не разрабатываются, а основные технические решения и капитальные вложения в СЭС являются составной частью ТЭО предприятия, намечаемого к проектированию и строительству [26].

Для большинства объектов проектирование, осуществляемое на основе ТЭО, выполняется в одну стадию — технорабочий проект. При этом подразумевается широкое применение типовых проектных решений и типовых рабочих чертежей отдельных сооружений и устройств, входящих в состав проектируемой СЭС. В одностадийных технорабочих проектах СЭС используются проверенные на практике схемные и конструктивные решения, типовые рабочие чертежи деталей и узлов электроустановок. Такой подход отвечает принципу типизации и унификации проектных решений, упомянутому выше, и позволяет сократить стоимость и сроки проектирования.

Однако высокие темпы научно-технического прогресса, внедрение новых технологических процессов и гибких автоматизированных производств, дальнейшее развитие теоретических основ электроснабжения зачастую приводят к недостоверности типовых проектных решений в новых условиях. Поэтому проектирование крупных и сложных промышленных комплексов с применением новой технологии требует двухстадийного проектирования СЭС: технический проект и рабочие чертежи.

Рассмотрим основные стадии проектирования СЭС.

На стадии ТЭО описываются все существующие источники электроэнергии, которые могут быть использованы для электроснабжения проектируемого предприятия. На основе опытных данных определяются (приближенно) электрические нагрузки предприятия на период пуска, набора проектной производительности с перспективой развития на ближайшие 10 лет. Одновременно проводится анализ электроприемников и определение группы по бесперебойности электроснабжения.

Далее определяются примерное число и мощность трансформаторов главных подстанций (ГПП) предприятия, предполагаемая рациональная мощность и число цеховых комплектных трансформаторных подстанций (КТП), а также общая протяженность кабельных линий 6...10 кВ.

В виде эскиза разрабатываются предполагаемый вариант схемы сетей высшего (330...110 кВ) напряжения и возможная конфигурация сетей 6...10 кВ с оценкой необходимости сооружения подстанций глубокого ввода (ПГВ) и ориентировочной потребности в магистральных шинпроводах и силовых кабелях в сетях 0,4...0,66 кВ для всего предприятия. На основе укрупненных показателей стоимости объектов электроснабжения определяется общая стоимость СЭС, которая включается в сметную стоимость данного предприятия.

Таким образом, несмотря на то что ТЭО обычно не считается самостоятельной стадией проектирования СЭС, оно по сути, охватывает три начальные стадии проектирования сложных систем [29]:

предпроектные исследования;  
техническое предложение (задание);  
эскизный проект.

Дальнейшая разработка новой технологии проектирования, ориентированная на его автоматизацию, потребует выделения ТЭО электропитания в самостоятельную стадию процесса проектирования (ПП), поскольку уже на самых начальных этапах проектирования требуется правильно выбрать основные параметры СЭС и оценить характеристики ее эффективности. Ошибка, допущенная на самых ранних этапах проектирования, зачастую не может быть исправлена ни совершенными инженерными расчетами, ни современной вычислительной техникой, ни чертежными автоматами [20].

На основе ТЭО для предприятий, имеющих аналоги, разрабатывается технорабочий проект, состоящий из двух частей: технической и рабочих чертежей.

Техническая часть технорабочего проекта утверждается и должна содержать:

- краткую пояснительную записку с изложением основных исходных данных, результатов сравнения вариантов электроснабжения, описанием характерных особенностей принятой схемы СЭС, конструктивных решений и примененного электрооборудования;

- план предприятия с указанием размещения ГПП (ПГВ), цеховых КТП, воздушных и кабельных линий (ВЛ и КЛ), токопроводов, а также зон загрязнения атмосферы промышленными газами, пылью;

  - схемы электрических сетей 330...110 кВ и сетей 10...6 кВ;

  - схемы распределительных сетей напряжением до 1000 В;

- описания и схемные решения мероприятий по компенсации реактивных нагрузок;

- описания и схемные решения по повышению качества электрической энергии в сетях предприятия;

  - оценку надежности электроснабжения объекта;

- основные конструктивные решения распределительных (РУ) и сетевых устройств;

- перечень основного электрооборудования, примененного в проекте с краткой технической характеристикой;

- перечень кабельной продукции с ориентировочной оценкой количества;

- технико-экономическую часть с указанием расхода цветных металлов и потерь электроэнергии в проектируемой СЭС.

В технорабочем проекте должны содержаться заказные спецификации для размещения заказов на типовое электрооборудование, требующее длительного изготовления, а также на специальное электрооборудование (трансформаторы электрических печей, сварочные трансформаторы, крупные преобразовательные агрегаты, специальные токопроводы).

Технический проект, как результат стадии ПП, является основным документом, в котором решаются все технические вопросы и в полном объеме разрабатывается экономическая часть проекта. Его итогом являются заказные спецификации на основное электрооборудование и кабельную продукцию, а также сводная смета.

Технический проект начинают разрабатывать с этапа изучения взаимных связей и влияния отдельных технологических процессов и агрегатов, последствий перерывов в электроснабжении и их допустимой продолжительности для всего предприятия, а также для отдельных цехов и агрегатов.

Далее определяют расчетные значения электрических нагрузок крупных технологических агрегатов, производственных участков, цехов и всего предприятия. Для предприятий, сооружаемых в несколько очередей, определяют электрические нагрузки по годам. Оценивается также характер графиков нагрузки предприятия (резкопеременный, переменный, ровный) и выбираются возможные точки присоединения предприятия к энергосистеме по согласованию с ней на основании действующих правил пользования электрической энергией.

Проектирование электроснабжения ведется параллельно с проектированием технологической, строительной, теплотехнической и других частей комплексного проекта предприятия, и все вопросы, решаемые в техническом проекте СЭС, должны быть согласованы со всеми заинтересованными организациями.

Дальнейшее проектирование СЭС производится с обязательным учетом технических условий на присоединение к энергосистеме, в которых указываются:

необходимая мощность собственной электростанции предприятия и условия ее связи с энергосистемой (если предприятию требуются ТЭЦ или имеются в значительном количестве вторичные энергоресурсы);

данные о других потребителях в районе строительной площадки предприятия, которые также необходимо обеспечить электроэнергией; характеристика точки подключения к энергосистеме (электростанция, подстанция или линия электропередачи);

напряжения, при которых возможно выполнить питающие линии, а также ожидаемые уровни напряжения и средства его регулирования; дополнительные требования к трассам линий электропередачи (ЛЭП), учитывающие перспективы развития электропотребления в районе строительства;

необходимость работ по усилению существующих сетей энергосистемы и проектированию вариантов исполнения ЛЭП или кабельных линий (КЛ) от точки присоединения до приемных подстанций предприятия;

расчетные значения токов и мощностей короткого замыкания в точке присоединения;

требования к режиму реактивных нагрузок предприятия, который должен быть обеспечен проектными решениями;

требования к изоляции, защите от перенапряжения, к релейной защите и автоматике на участке от точки подключения до ГПП предприятия, включая сторону высшего напряжения;

требования к организации учета расхода электроэнергии и контроля режимов электропотребления.

На основе технико-экономических расчетов и сопоставления вариантов технический проект определяет число и расположение ГПП, схемы их коммутации, число и мощность КТП, схему электроснабже-

ния с номинальными напряжениями сетей. Оцениваются уровни отклонений и колебаний напряжения, выбираются средства регулирования напряжения и повышения коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ).

Важным элементом технического проекта являются задания на проектирование строительной части предприятия, разрабатываемые проектировщиками-электриками и как исходный материал для разработки проектов строительной части подстанций, эстакад, кабельных каналов, туннелей и других сооружений электросетевого хозяйства.

В дальнейшем технический проект уточняется и при разработке рабочих чертежей, которые являются составной частью одностадийного технорабочего проекта или самостоятельной частью проекта СЭС при двухстадийном проектировании.

Разработка рабочих чертежей, в отличие от технического проекта, может выполняться поэтапно, отдельными частями, в соответствии с очередями строительства предприятия.

Рабочие чертежи для строительных и монтажных работ разрабатываются на основании уточненных данных о потребителях электроэнергии, получаемых после подтверждения заказов на технологическое и другое оборудование заводами-поставщиками после детальной проработки размещения технологического оборудования внутри цехов и решения вопросов отопления, вентиляции, водоснабжения и очистных сооружений всех типов.

Для разработки рабочих чертежей получают подтверждения от заводов-изготовителей по техническим характеристикам основного электрооборудования, заказанного на основе спецификаций технического проекта.

Проект рабочих чертежей СЭС состоит из пяти основных разделов:

1. Технические материалы и принципиальные чертежи (схемы, планы размещения подстанций, трассы сетей, расчеты, пояснительные записки) спецификации электрооборудования.

2. Чертежи-задания заводам для изготовления комплектного крупноблочного электрооборудования и элементов сетей (КТП, комплектные РУ, токопроводы).

3. Чертежи-задания на разработку рабочих чертежей строительной части электротехнических устройств (помещения подстанций, фундаменты под трансформаторы, туннели и эстакады для КЛ).

4. Электромонтажные чертежи для производства работ на стройплощадке и в монтажно-заготовительных мастерских (участках), чертежи на установку закладных частей и деталей, спецификации на оборудование и материалы.

5. Сметы, определяющие затраты на сооружение СЭС.

Рабочие чертежи разрабатываются применительно к существующему методу выполнения электромонтажных работ. В настоящее время осуществляется двухстадийный монтаж: предварительные и собственно монтажные работы. На стадии предварительных работ укрупняются монтажные узлы оборудования, устанавливаются закладные детали в строительных конструкциях для последующего крепления электрооборудования, подготавливаются трассы для электропроводок, изготавливаются в мастерских отдельные установочные элементы, детали, узлы.

На стадии собственно монтажных работ устанавливаются крупноблочные узлы электрооборудования, трансформаторы, электрические машины и аппараты, монтируются укрупненные секции электрических сетей, прокладываются и подключаются к электрооборудованию ВЛ, кабели и провода. Далее выполняются проверка правильности электрических соединений, регулировка устройств и аппаратов, предварительная наладка смонтированных электроустановок и их апробация.

В состав рабочих чертежей проекта входят уточненные технические материалы и принципиальные чертежи, необходимые для организации строительства, монтажа, наладки и эксплуатации электроустановок:

пояснительные записки к проекту;

ситуационный план предприятия с размещением источников питания, основных подстанций и ЛЭП;

генеральный план предприятия с расположением подстанций и трасс межцеховых сетей;

планы цехов с размещением КТП, основных трасс сетей и распределительных пунктов;

схемы электроснабжения и размещения защит в сетях;

принципиальные однолинейные схемы подстанций, схемы управления, схемы защит трансформаторов, линий;

уточненные спецификации электрооборудования, проводниковых материалов, токопроводов и изоляторов;

уточненные сметы, включающие стоимость электрооборудования, материалов и строительно-монтажных работ.

Таким образом, рабочие чертежи представляют собой комплекс графических и текстовых материалов, разработанных с применением типовых рабочих чертежей монтажных узлов, готовых электромонтажных изделий и крупногабаритного комплектного электрооборудования.

Принципиальные схемы и уточненные расчетные данные являются основным материалом для пусконаладочных работ.

После уточнений, дополнений и корректировки на основании строительства, монтажа и пусконаладочных работ эти документы проекта служат основными материалами для эксплуатации систем электроснабжения.

Каждую стадию можно разделить на более мелкие структурные единицы процесса проектирования: этапы, проектные процедуры и проектные операции.

Этапом проектирования называют часть процесса проектирования, включающую формирование всех требующихся описаний объекта, относящихся к одному или нескольким иерархическим уровням и аспектам [29]. Например, этапы схемотехнического и функционально-логического проектирования СЭС связаны с решением задач двух иерархических уровней функционального аспекта. Этап проектирования топологии цеховой электрической сети включает задачи, относящиеся ко всем иерархическим уровням конструкторского аспекта.

Проектная процедура — часть этапа проектирования, выполнение которой заканчивается получением проектного решения. Каждой

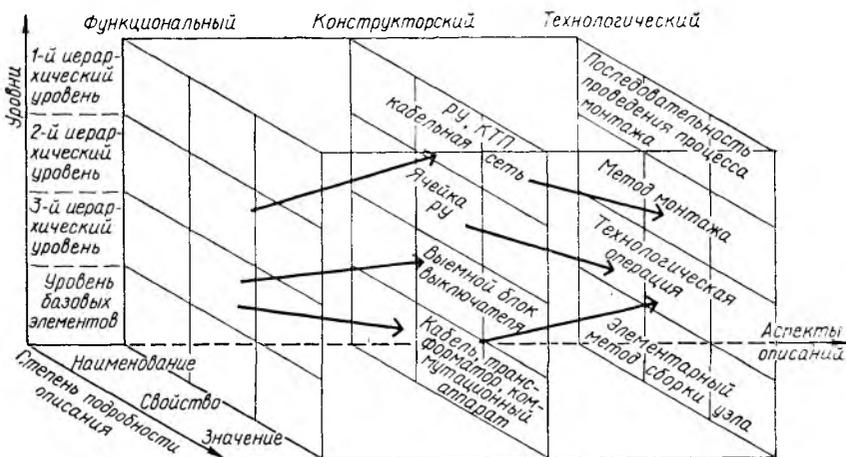


Рис. 1.3. Структуризация описаний объекта проектирования.

проектной процедуре соответствует некоторая задача проектирования, решаемая в рамках данной процедуры. Так, расчет оптимальной мощности и числа цеховых КТП можно считать оптимизационной проектной процедурой, а расчет токов короткого замыкания — расчетной процедурой.

Проектными операциями называют более мелкие составные части ПП, входящие в состав проектных процедур. Например, проектными операциями при проектировании СЭС можно считать решение системы уравнений узловых напряжений в процедуре расчета токов короткого замыкания или вычерчивание рамки и штампа чертежа.

Таким образом, понятия иерархического уровня и аспекта относятся к структурированию представлений об объекте проектирования, а понятия стадии, этапа, процедуры, операции — к структурированию процесса проектирования.

Однако на каждом уровне и аспекте может требоваться различная степень подробности описания объекта (рис. 1.3). Например, составляя принципиальную схему распределительного устройства, достаточно оперировать наименованиями (условными обозначениями) элементов и их функциональными свойствами (выключатель вводной, секционный, отходящей линии, обходная система шин). При решении чертежа компоновки РУ (конструкторский аспект) требуется знать численные значения каких-то свойств элементов, например геометрические размеры ячеек РУ используемого типа.

Многообразие базовых элементов, функциональных и структурных связей между ними в подсистемах СЭС и системе в целом, разнообразие аспекты и степени детализации описаний порождают и многообразие проектных процедур. Процедуры, предназначенные для многократного использования при проектировании многих типов объектов, называются *типовыми процедурами*. Их классификация приведена на рис. 1.4. Можно выделить два основных типа процедур: синтез и анализ.

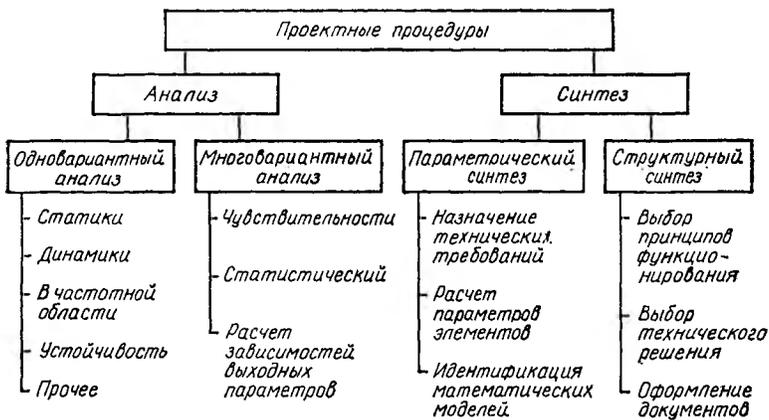


Рис. 1.4. Классификация типовых проектных процедур.

Синтез заключается в создании описания объекта, а анализ — в исследовании работоспособности объекта по его описанию и в определении его свойств.

Процедуры синтеза подразделяют на процедуры структурного и параметрического синтеза. Целью структурного синтеза является определение структуры СЭС-перечня элементов, составляющих систему, и способа связи этих элементов между собой в системе.

Параметрический синтез заключается в определении числовых значений параметров элементов при заданных структуре и условиях работоспособности на выходные параметры объекта.

Среди свойств объектов, отражаемых на определенном иерархическом уровне, различают свойства систем, свойства их элементов и внешней среды, в которой должен функционировать объект. Количественное выражение этих свойств осуществляется при помощи величин, называемых *параметрами*. Величины, характеризующие свойства системы, ее элементов и внешней среды, называют соответственно выходными, внутренними и внешними параметрами [29]. Количество и мощность трансформаторов ГПП в СЭС следует считать внутренними параметрами, а условия присоединения объекта к энергосистеме — внешними.

Учитывая множество параметров, описывающих СЭС, обозначим:  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  — вектор выходных параметров;  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  — вектор внутренних параметров и  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_k)$  — вектор внешних параметров СЭС. Очевидно, свойства системы зависят от внутренних и внешних параметров, что означает функциональную зависимость

$$Y = F(X, Z). \quad (1.1)$$

Система соотношений (1.1) является обобщенной математической моделью СЭС (рис. 1.5), однако размерность векторов  $X$ ,  $Z$  столь велика, что построить описание этой модели в явном относительно вектора  $Y$  виде не удастся. Практически, решая каждую проектную задачу приходится считать, что некоторые выходные параметры  $y_i$

с практически достаточной точностью зависят лишь от небольшого числа существенных внутренних и внешних параметров [20].

При этом векторы параметров  $X, Z$  можно разбить на группы:

$$X = (\tilde{x}, \hat{x});$$

$$Z = (\tilde{z}, \hat{z}),$$

где  $\tilde{x}, \tilde{z}$  — векторы существенных для данной задачи параметров;  $\hat{x}$  и  $\hat{z}$  — векторы остальных параметров. Тогда (1.1) запишем в виде частной системы соотношений

$$Y_i(X, Z) \approx F_i(\tilde{x}, \tilde{z}, \varepsilon), \quad (1.2)$$

где  $\varepsilon$  — малый параметр, обеспечивающий приближенное равенство (1.2) с практически достаточной точностью.

Возможность построения (1.2) не с идеальной, а с практически достаточной точностью и выявляет суть блочно-иерархического подхода.

Выделим следующие особенности параметров в моделях проектируемых объектов [29]:

внутренние параметры (параметры элементов) в моделях  $k$ -го иерархического уровня становятся выходными параметрами в моделях более низкого ( $k + 1$ )-го уровня;

выходные параметры в модели одной из подсистем часто оказываются внешними параметрами в описаниях других подсистем или в других аспектах;

большинство выходных параметров объекта являются функциональными, например, в моделях вида

$$MV(Q) = v(Q), \quad (1.3)$$

где  $M$  — некоторый оператор;  $Q$  — вектор независимых переменных, в общем случае включающий пространственные координаты и время;  $v(Q)$  — заданная функция независимых переменных;  $V(Q)$  — вектор фазовых переменных. Поэтому для определения выходных параметров объекта  $Y$  необходимо решить (1.3) при заданных значениях  $X$  и  $Z$ , а по полученным результатам решения определить расчетным путем  $Y$ . При решении задач синтеза описания объекта используют процедуры одно- и многовариантного анализа. При одновариантном анализе заданы значения внутренних  $X$  и внешних  $Z$  параметров, требуется определить значения выходных параметров. Многовариантный анализ заключается в исследовании свойств модели объекта в некоторой области пространства внутренних параметров и требует многократного решения систем уравнений (1.1) или (1.2), т. е. многократного выполнения одновариантного анализа.

Опыт проектирования показал, что несмотря на все многообразие проектных процедур и моделей объектов различной природы, могут рассматриваться и типичные последовательности проектных процедур (рис. 1.6). Например, если на предыдущем этапе решались задачи

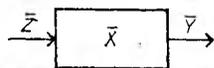


Рис. 1.5. Обобщенная модель СЭС.

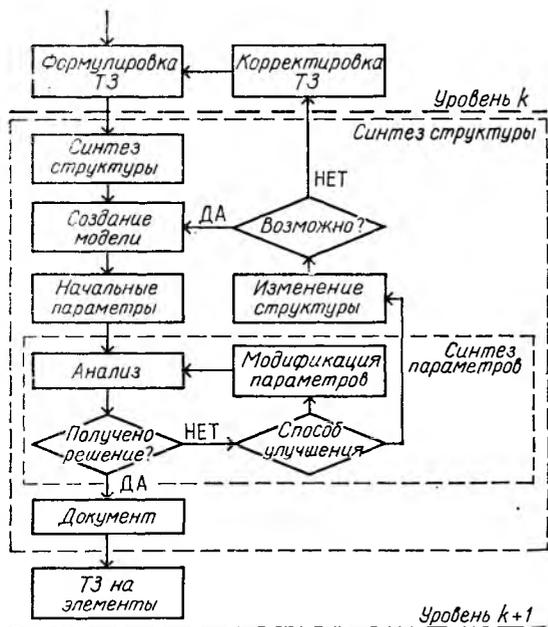


Рис. 1.6. Типичная последовательность проектных процедур.

$k$ -го уровня, то одним из результатов их решения является формулировка ТЗ на проектирование систем  $(k + 1)$ -го уровня. Проектирование системы начинается с синтеза исходного варианта ее структуры; далее выполняются параметрический синтез и анализ варианта, оценивающий условия работоспособности или (и) требуемый уровень эффективности. Если цель достигнута, то система  $(k + 1)$ -го уровня описывается в принятой форме и выдается ТЗ на проектирование элементов данного уровня. В случае неудовлетворительного проектного решения приходится возвращаться к процедурам параметри-

ческого или структурного синтеза, модифицируя ранее полученный вектор  $X$ . Целенаправленная модификация  $X$ , подчиненная некоторой стратегии поиска наилучшего значения показателя качества, свидетельствует об оптимизационной процедуре параметрического синтеза. На рис. 1.6 показана особенность взаимосвязи проектных процедур синтеза и анализа: процедура одновариантного анализа выполняется внутри многовариантного анализа, вложенного, в свою очередь, в процедуру параметрического синтеза. Все процедуры включены в структурный синтез. Это подтверждает сложность и трудоемкость процесса проектирования, имеющего характер итераций между процедурами.

Выделяют также понятие маршрута проектирования объекта как последовательности этапов и (или) проектных процедур. Маршрут называют типовым, если он применяется при проектировании многих объектов данного класса.

## 1.2. СЭС ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Системы электроснабжения как объект проектирования обладают рядом свойств, позволяющих классифицировать их как сложные технико-эргатические системы [13]:

уникальностью — каждая СЭС не имеет полных аналогов по числу и составу элементов, структуре и поведению;

слабопредсказуемостью — никакое самое подробное знание функций элементов и структуры сети не позволяет формально описать функцию системы, а сколь угодно точное описание поведения СЭС на временном интервале  $(-T, 0]$  не позволяет точно предсказать поведение системы на произвольном интервале  $[0, \tau]$ ;

целенаправленностью — способность СЭС устранять последствия внешних и внутренних воздействий, осуществлять достижение определенной цели.

Признаком сложной системы является свойство слабой предсказуемости поведения, которое для СЭС промышленных предприятий заключается в проблеме соответствия расчетных электрических нагрузок их фактическим значениям. Как известно, иногда наблюдается недостаточная (менее 20 %) загрузка цеховых КТП, трансформаторов ГПП и ПГВ. В ряде случаев расхождение между расчетными и фактическими значениями электрических нагрузок достигают 200...400 %. Поскольку синтез схемы и определение оптимальных параметров элементов СЭС полностью основывается на расчетных значениях электрических нагрузок, достаточная достоверность методов их определения может оказаться сдерживающим фактором в развитии методов оптимизации в САПР ЭС.

В системотехнике существует три принципа, на которых основаны исследования, создание и использование сложных систем: физичность, моделируемость, целенаправленность.

Принцип физичности опирается на постулат целостности, который гласит: сложная система должна рассматриваться как единое целое, причем ни при композиции, т. е. объединении подсистем в систему, ни при декомпозиции, т. е. при любом из вариантов членения системы, недопустима потеря понятий. Одним из аспектов постулата целостности является неразрывность во времени процессов производства и потребления электрической энергии, обусловленная отсутствием способов и средств аккумулирования энергии в промышленных масштабах. Это приводит к тому, что параметры режима СЭС, определяющие ее поведение: активные и реактивные мощности, токи, напряжения в узлах, частота и т. п., характеризуются высокой скоростью изменения во времени и зависят от параметров режима питающей энергосистемы. Особенностью поведения СЭС является чрезвычайно малая ее инерционность в переходных режимах, например при коротких замыканиях. Причем скорость изменения режима намного превосходит скорость реакции человека-диспетчера, что вынуждает использовать автоматические устройства противоаварийной автоматики и управления с высоким быстродействием.

В то же время, при отсутствии ЭП с резкопеременным характером нагрузки и стабильном производственном процессе, режимы СЭС изменяются значительно медленнее и позволяют выявить устойчивые и характерные суточные, недельные, декадные и годовые компоненты в графиках нагрузок  $P(t)$  и  $Q(t)$ .

Таким образом, СЭС предприятий следует рассматривать как сложные технические системы кибернетического типа, выделяемые из более сложных систем промышленного производства (СПП) по функциональному признаку и из электроэнергетической системы (ЭС) по

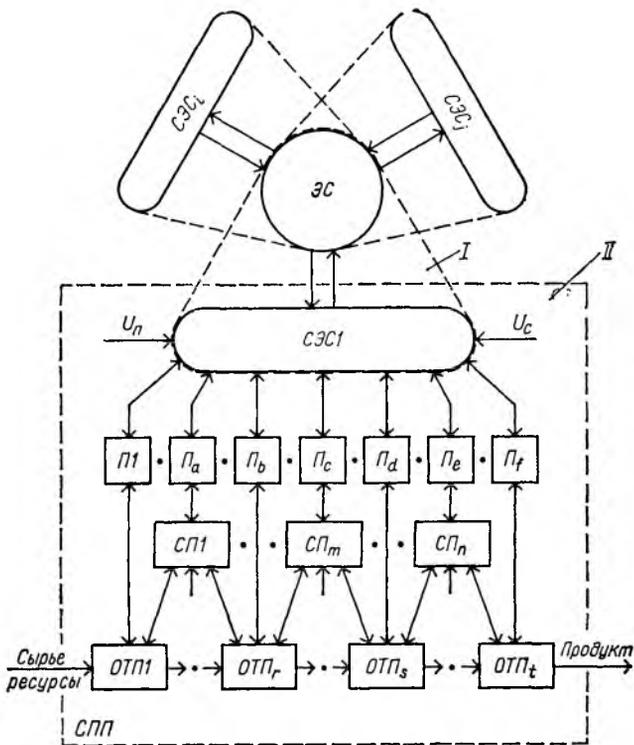


Рис. 1.7. ЭС промышленного предприятия как подсистема системы энергетики (ЭС, контур I) и систем промышленного производства (СПП, контур II).

территориально-экономическим признакам (рис. 1.7). ЭС промышленного предприятия находится под влиянием двух групп управляющих факторов:  $U_n$  — от производственных подсистем;  $U_c$  — от энергосистем. С позиций СПП можно рассматривать ЭС как поставщика, а СЭС как техническую транспортную систему одного из видов производственных ресурсов, а именно — электроэнергии.

Граница раздела ЭС и подсистем СПП проходит на уровне преобразователей вида энергии ( $П_1...П_f$ ) из электрической в механическую, тепловую, электрохимическую в соответствии с потребностями технологического процесса. В СПП помимо основных технологических процессов ( $ОТП_1...ОТП_t$ ), выполняющих непосредственную переработку сырья или исходного продукта в конечный, существует также ряд сервисных (обслуживающих) технологических процессов ( $СП_1...СП_n$ ). Такие процессы, как производство сжатого воздуха, кислорода, играют вспомогательную роль в СПП, но также требуют электроснабжения. В реальных СПП число  $ОТП$ ,  $СП$  и взаимосвязей между ними столь велико, что проследить за изменением во времени электропотребления отдельных  $П_f$  не представляется возможным. Это во многом определяет проблему слабой наблюдаемости СЭС.

В условиях напряженных энергетических балансов цели ЭС и СПП становятся конфликтными [25]. ЭС стремится обеспечить свою устойчивость введением ограничений по мощности в период максимума ее нагрузки и в предаварийных ситуациях и по потребляемой электроэнергии. При этом предприятия вынуждены отключать часть своих  $\Pi_i$ , что изменяет как характер электропотребления, так и структуру СЭС.

В настоящее время расчет электрических нагрузок в СЭС начинают от уровня электроприемников ( $\Pi_1 \dots \Pi_r$ ), описывая их среднее электропотребление статическими оценками коэффициентов использования ( $K_{и}$ ), а неравномерность группового электропотребления — предельными моделями коэффициентов формы ( $K_{ф}$ ) и максимума ( $K_{м}$ ). Структура технологических процессов и взаимосвязи между ОТП и СП при этом игнорируются.

На характер процессов, протекающих в СЭС, оказывают влияние как обобщенные временные характеристики трудовой деятельности групп людей, так и организационные и социальные факторы. Так, введение пятидневной рабочей недели в ряде отраслей и установление летнего и зимнего времени в стране привело к изменению характера электропотребления промышленных объектов.

Для СЭС сложной технической системы дополнительно выделяют следующие свойства: общие, структурные и режимные. К основным общим свойствам относятся иерархичность (см. рис. 1.2), управляемость, наблюдаемость, идентифицируемость, многообразие возмущений.

Группу структурных свойств составляют: многосвязность, многомерность, неоднородность и дискретность структуры, непрерывность развития структуры.

Режимные свойства СЭС — это непрерывность процесса электропотребления, случайность, динамичность, нестационарность и нелинейность параметров режима.

Все эти свойства должны найти отражение в различных описаниях СЭС при ее проектировании, что отвечает принципу моделируемости [13]. Сложную систему представляют конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань сущности этой системы. Модель — это условный образ объекта проектирования, выявляющий его основные свойства (взаимосвязи, характеристики, параметры) [10]. Модель, ориентированная на определенную группу свойств сложной системы, всегда проще самой системы. Создание полной модели для сложной системы вообще бесполезно, так как, в силу теоремы Тьюринга, такая модель будет столь же сложной, как и система. Математической моделью объекта называют систему математических объектов (чисел, переменных, матриц, множеств, графов) и отношений между ними, отражающую группу свойств объекта.

Принцип целенаправленности, понимаемый как тенденция, направленная на достижение системой некоторого состояния, проявляется для СЭС, в первую очередь, посредством постулата выбора. СЭС, благодаря наличию средств резервирования, управления и автоматики, способны к выбору поведения, и однозначно предсказать их действие и состояние невозможно ни при каком априорном знании свойств системы и ситуации [13].

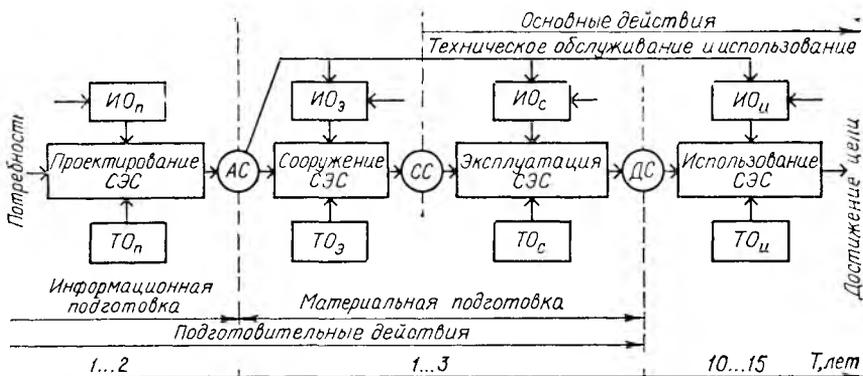


Рис. 1.8. «Жизненный цикл» СЭС и место процесса проектирования в процессе технологической подготовки производства.

«Жизненный цикл» любой СЭС состоит из следующих этапов: проектирования, сооружения, эксплуатации, использования (рис. 1.8). В результате общественной потребности возникает задание на проектирование СЭС, которое осуществляется на базе имеющегося технического (ТО<sub>п</sub>) и информационного (ИО<sub>п</sub>) обеспечения процесса проектирования. Результатом проектирования является абстрактная система (АС) в виде проекта, причем АС должна содержать информацию, входящую в состав информационного обеспечения последующих этапов (ИО<sub>с</sub>, ИО<sub>з</sub>, ИО<sub>и</sub>). Иными словами, проект должен содержать необходимые и достаточные указания, как соорудить, эксплуатировать и использовать СЭС. Результатом реализации этапа сооружения является статическая система (СС), т. е. физически существующий, но не функционирующий объект. Эксплуатация (наладка, пуск и поддержание в работоспособном состоянии) приводит СС в действие, результатом чего является динамическая система (ДС), которую можно использовать для достижения поставленной цели.

Проектирование, сооружение и эксплуатация являются подготовительными действиями и их реализация занимает значительную часть времени «жизненного цикла» СЭС, причем проектирование рассматривается как информационная подготовка действий по созданию объекта.

Рассмотрим структуру СЭС, позволяющую определить класс САПР электроснабжения.

Иерархическая структура СЭС может быть описана графом типа дерево (прил. 4). При наличии  $p$  вершин графа общее число деревьев, которые могут быть построены на этих вершинах, составляет [22]:

$$N = p^{(p-2)}.$$

Многие из этого числа деревьев отличаются друг от друга только нумерацией вершин, т. е. являются изоморфными. Так, для  $p = 10$  можно построить  $N = 10^8$  различных деревьев, однако лишь  $N_n = 106$  из них будут неизоморфными.

Число неизоморфных вершин  $N_n$  растет с увеличением  $p$  (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Число неизоморфных деревьев графа

$p$	10	15	20	25
$N_n$	106	7741	823065	104636890

Если учесть, что число висячих вершин дерева сети (электроприемников) для промышленных предприятий составляет более 10 000, то САПР ЭС следует классифицировать как САПР объектов очень высокой сложности.

### 1.3. ПРИНЦИПЫ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЭС

Известны следующие основные принципы проектирования технических систем:

сверху вниз (нисходящее проектирование), когда решение задач более высоких иерархических уровней предшествует решению задач низших уровней;

снизу вверх (восходящее проектирование), при котором ранее выполняются этапы низших уровней.

При нисходящем проектировании система разрабатывается в условиях, когда ее элементы еще не определены и системные функции определяют требования к элементам. При восходящем проектировании элементы проектируются раньше системы и их функциональные возможности определяют и ограничивают возможности системы. Процесс первого типа позволяет проектировать эффективные системы, но требует широкой номенклатуры электротехнических аппаратов, изделий и материалов. Во втором случае наблюдается обратное: можно обойтись узкой номенклатурой элементов, но при этом снижается общая эффективность системы. В любом случае ПП имеет многоэтапный итеративный характер, что также является одним из принципов проектирования.

На практике обычно сочетают нисходящее и восходящее проектирование, причем целью любой методологии проектирования является снижение возможного числа итераций в ПП. Поэтому различают стратегию проектирования — поиск и определение последовательности процедур и операций, необходимых и достаточных для решения сформулированной технической задачи в приемлемые (возможно минимальные) сроки с приемлемыми трудозатратами.

Технологией проектирования называют опробованную последовательность процедур и операций, приводящую к цели, определяемой стратегией при проектировании объектов некоторого класса.

Теорией и практикой проектирования СЭС выработан ряд специфических принципов, не всегда поддающихся строгой формализации: дробления подстанций; объединения линий; минимальной разомкнутой сети; дополнительных узлов; кратчайшей сети. Поэтому первоочередной задачей теории проектирования СЭС следует считать разработку

стратегии проектирования, ориентированной на автоматизацию, на основе анализа и моделирования ПП.

Для ранних периодов применения ЭВМ в проектировании электро-снабжения характерным был механический перенос стратегии ручного проектирования в условия автоматизированного. Так, для вычисления эффективного числа электроприемников исходным является выражение

$$n_3 = \left( \sum_{i=1}^n P_{ni} \right)^2 / \sum_{i=1}^n (P_{ni}^2),$$

где  $P_{ni}$  — номинальная мощность  $i$ -го электроприемника.

Уже при  $n > 10$  вычисление  $n_3$  вручную становится затруднительно и, для упрощения ручных расчетов был предложен ряд упрощений, например:

$$1. n_3 = 2 \sum_{i=1}^n P_{ni} / P_{\max},$$

где  $P_{\max}$  — мощность наибольшего электроприемника в группе;  $K_n \geq 0,2$  — коэффициент использования активной нагрузки электроприемников.

$$2. n_3 = n; \quad P_{\max} / P_{\min} \leq 3,$$

где  $P_{\min}$  — мощность наименьшего электроприемника в группе. При этом из  $n$  исключаются все ЭП, мощность которых менее 5 % мощности всей группы.

Эти упрощения снижают точность расчетов и создают неудобства при алгоритмизации и программировании расчета электрических нагрузок, требуя, например, поиска  $P_{\max}$ . Тем не менее в ряде проектных организаций в основу программ расчета нагрузок положены не исходное выражение для  $n_3$ , а именно упрощенные модификации.

Основные цели автоматизации проектирования следующие [34]: повышение качества и технико-экономического уровня проектируемых систем, в том числе при их сооружении, эксплуатации и использовании;

повышение производительности труда инженеров-проектировщиков и стабилизации их численности;

сокращение сроков и уменьшение стоимости и трудоемкости проектирования.

Достижение этих целей возможно лишь при комплексной автоматизации ПП на основе его анализа и моделирования.

Необходимость анализа и моделирования ПП заключается в требовании оптимального разделения проектных работ между проектировщиком (или их группой) и ЭВМ, причем с одной стороны следует использовать эвристические способности, опыт и интуицию инженера, а с другой — возможности ЭВМ как эффективного средства хранения и обработки больших информационных массивов [6].

Задача состоит в создании человеко-машинной системы, в которой человек и машина взаимно дополняют друг друга. ЭВМ решает задачи, легко поддающиеся математической формализации, задачи трудоемкие, требующие многократного выполнения однотипных опе-

раций, значительных затрат времени, запоминания и обработки больших информационных массивов. Задачи, которые удается математически формализовать и алгоритмизировать:

хранение и переработка информации — организация библиотек моделей и параметров элементов, библиотек прикладных программ, представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме, организация архива схемных решений и т. д.;

расчет параметров СЭС в случаях, для которых существует алгоритмируемая методика такого расчета;

анализ (расчет характеристик) схем;

поиск лучшего решения по формальным критериям.

Развитие средств вычислительной техники и математики, электрообеспечение потребует периодического пересмотра концепций, лежащих в основе той или иной стратегии проектирования. Однако в любом случае разработка стратегии проектирования должна опираться на принцип моделируемости объекта и процесса проектирования, в основе которого лежит следующее [16, 18]:

формулирование целей исследования;

анализ проблемы и постановка задачи;

построение модели системы на уровне логической схемы решения стоящих перед ней проблем;

формализация модели;

оценка сложности и точности модели;

упрощение модели с позиций ее реализуемости;

выбор методов моделирования;

выбор средств моделирования;

моделирование и обработка результатов, идентификация системы;

применение результатов моделирования в реальном проектировании.

Модели, полученные таким образом, должны обеспечивать возможность многовариантной оптимизации проектных решений, требуя тем самым создания САПР высокоавтоматизированного проектирования.

Анализ проектной документации СЭС показывает, что в конструкторских и графических работах большой объем занимает техническая документация на разработку низковольтных (до 1000 В) комплектных устройств (НКУ), передаваемая заводам-изготовителям, и задания монтажно-заготовительным участкам (МЗУ) на закладные детали и монтаж секций шинопроводов.

На этапе конструкторской разработки решаются такие задачи: компоновка аппаратов и приборов НКУ по панелям и шкафам щита;

привязка аппаратов и приборов на плоскостях панелей и дверей с учетом геометрии элементов и ограничений (технологических и схемотехнических);

трассировка соединений электрических цепей;

изготовление графической документации (схем электрических соединений, конструктивных узлов и видов щитов, панелей, шкафов).

Это предопределяет наличие средств машинной графики в составе САПР ЭС и, следовательно, необходимость разработки и исследова-

ния оптимальных по времени (и другим характеристикам) алгоритмов машинной геометрии [36].

Особенности СЭС как объекта проектирования обуславливают необходимость создания в САПР ЭС специфической подсистемы автоматизации научных исследований (АСНИ) для формирования единой информационной базы характеристик электропотребления, динамика которых должна изучаться систематически [25].

По характеру и степени участия человека и использования ЭВМ в процессе проектирования различают следующие режимы [29]:

ручной;

автоматический, когда отдельный маршрут проектирования выполняется без вмешательства человека в ход решения;

автоматизированный, в случае выполнения части проектных процедур человеком, а части — ЭВМ;

диалоговый (интерактивный), при котором все проектные процедуры маршрута проектирования выполняются ЭВМ, а участие человека заключается в выборе пути решения и корректировке хода проектирования на основе оперативной оценки результатов процедур или операций.

Несмотря на необходимость повышения степени автоматизации проектирования, все режимы в САПР электроснабжения будут использоваться еще достаточно длительное время. По мере развития методологии САПР и теории электроснабжения будет изменяться доля каждого из режимов в едином процессе проектирования СЭС.

Таким образом, автоматизация проектирования СЭС — это систематическое применение ЭВМ в проектировании на основе научно обоснованных моделей объекта и процесса проектирования и научно обоснованного разделения функций между человеком и ЭВМ.

Для всех стадий создания САПР характерно следующее:

системное единство — связи между подсистемами САПР должны обеспечивать целостность системы;

развитие — САПР должна создаваться и функционировать с учетом пополнения, совершенствования и обновления подсистем;

совместимость — языки, символы, коды, информационные и технические характеристики структурных связей между подсистемами, средствами обеспечения и компонентами САПР должны обеспечивать совместное функционирование подсистем и сохранять открытую структуру системы в целом;

стандартизация, заключающаяся в унификации, типизации и стандартизации подсистем и компонентов, инвариантных проектируемым объектам и отраслевой специфике.

#### **1.4. СТРУКТУРА И СОСТАВ САПР ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

САПР представляет собой организационно-техническую систему, состоящую из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с подразделениями проектной организации и выполняющую автоматизированное проектирование. Их создание, внедрение и развитие регламентируется (15) и системой Государственных стандартов.

Комплекс средств автоматизации проектирования включает техническое, методическое, математическое, лингвистическое, информационное, программное и организационное обеспечение [29].

Техническое обеспечение (ТО) САПР представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств и делится на группы средств программной обработки, подготовки и ввода данных, отображения и документирования, архива проектных решений, передачи данных.

Математическое обеспечение (МО) САПР объединяет математические модели проектируемых объектов, методы и алгоритмы выполнения проектных процедур. В числе элементов МО имеются инвариантные (относительно объектов проектирования) методы численного решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений, постановки экстремальных задач, поиска экстремума.

Программное обеспечение (ПО) объединяет собственно программы для систем обработки данных на машинных носителях и программную документацию. ПО подразделяется на общесистемное, базовое и прикладное. Общесистемное ПО предназначено для планирования и управления вычислительным процессом, распределения имеющихся ресурсов и представлено совокупностью операционных систем ЭВМ и вычислительных средств. В базовое ПО входят обслуживающие программы, обеспечивающие правильное функционирование прикладных программ. Прикладное ПО реализует математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур и имеет форму пакетов прикладных программ (ППП), каждый из которых обслуживает определенный этап процесса проектирования или группу однотипных задач в рамках отдельных этапов.

Информационное обеспечение объединяет данные, представленные в виде документов на различных носителях, содержащие сведения справочного характера о типовых проектных решениях, параметрах элементов и комплектующих изделий, структурах и параметрах проектируемых объектов, состоянии текущих проектных разработок (промежуточные проектные решения). Основу ИО составляет банк данных, представляющий собой совокупность средств для накопления и коллективного использования данных в САПР. Банк данных (БНД) состоит из базы данных и системы управления ею. База данных (БД) — это собственно данные, находящиеся в запоминающих устройствах и структурированные в соответствии с принятыми в данном БНД правилами. Система управления базой данных (СУБД) представляет собой совокупность программных средств, обеспечивающих запись данных в БНД, их выборку по запросам пользователей или прикладных программ, защиту данных от искажений и несанкционированного доступа к ним.

Лингвистическое обеспечение (ЛО) — совокупность языков, применяемых для описания процедур автоматизированного проектирования; основа ЛО — языки общения пользователя с ЭВМ.

Методическое обеспечение (МТО) — совокупность документов, характеризующих состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования. При более широком толковании в состав МТО включают также математическое и лингвистическое обеспечение.

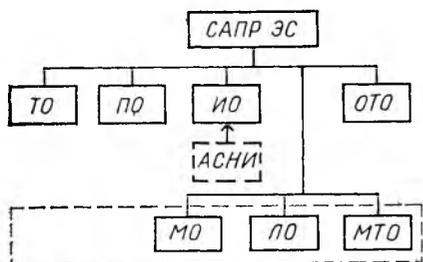


Рис. 1.9. Виды обеспечения САПР.

делены автоматизированная система научных исследований (АСНИ) и контур МТО.

Составными частями САПР являются подсистемы двух видов: проектирующие и обслуживающие.

К проектирующим относятся подсистемы, выполняющие проектные процедуры и операции. Обслуживающими являются подсистемы, предназначенные для поддержания работоспособности следующих проектирующих подсистем:

- графического отображения объектов проектирования;
- информационного поиска;
- документирования.

Существуют два вида проектирующих подсистем, различающихся отношением к объекту проектирования:

- объектные (объектно-ориентированные), выполняющие одну или несколько проектных процедур или операций, непосредственно зависящих от конкретного проектируемого объекта;
- инвариантные (объектно-независимые), выполняющие унифицированные проектные процедуры и операции.

Компонентом САПР называют элемент обеспечения, выполняющий определенную функцию в подсистеме, например, компонентами технического обеспечения являются устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных и другие устройства. Возможность широкого внедрения САПР в практику проектирования обеспечивается за счет тиражирования и использования при создании новых САПР комплексов средств и компонентов различных обеспечений. Виды компонентов и комплексов средств для САПР приведены на рис. 1.10. Комбинированные комплексы подразделяются на программно-методические (ПМК) и программно-технические (ПТК).

ПМК представляют собой взаимосвязанную совокупность методического, программного и информационного (а также, при необходимости, компонентов математического и лингвистического) обеспечения, предназначенную для получения законченного проектного решения по одной или нескольким частям, по всему объекту проектирования в целом или для выполнения унифицированных процедур. По назначению ПМК подразделяются на общесистемные и базовые; в составе последних выделяют объектно-ориентированные и проблемно-ориентированные.

ПТК представляют взаимосвязанную совокупность ПМК с комп-

Организационное (организационно-технологическое) обеспечение (ОТО) включает положения, инструкции, приказы и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений проектной организации и порядок взаимодействия комплексов средств между собой и подразделениями организации. На рис. 1.9 показаны виды обеспечения САПР, причем штриховыми линиями вы-

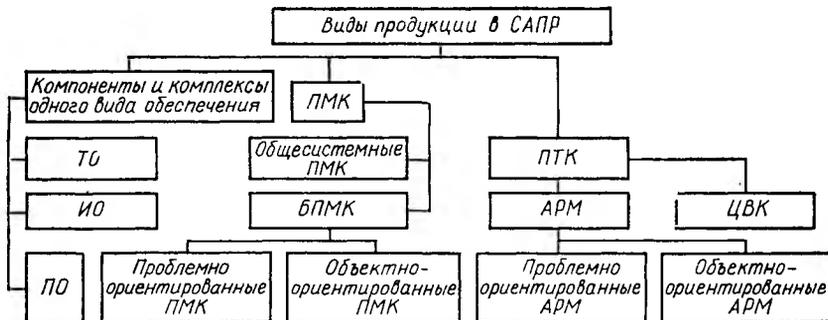


Рис. 1.10. Виды компонентов и комплексов средств САПР.

лексами и (или) компонентами технического обеспечения и подразделяются в зависимости от назначения на автоматизированные рабочие места (АРМ) и центральные вычислительные комплексы (ЦВК).

Комплексы средств САПР должны обеспечивать:

- автоматизацию проектирования СЭС;
- заданный научно-технический уровень проектных решений;
- документирование результатов проектирования с необходимой полнотой и в установленных формах;
- простоту и удобство работы пользователя в пакетном и диалоговом режимах с возможностью перехода с режима на режим на любом этапе проектирования.

ЦВК представляет собой ПТК, предназначенный для объединения действий совокупности АРМ в единый процесс проектирования, хранения и предоставления общесистемной информации и дополнения вычислительных мощностей отдельных АРМ при решении многомерных сложных задач. В свою очередь, АРМ представляет собой ПТК, предназначенные для выполнения функций:

- оперативного ввода, вывода, отображения, редактирования и преобразования текстовой и (или) графической информации;
- настройки, редактирования, исполнения и контроля программ пользователей в диалоговом режиме;
- формирования архива проектных решений и библиотеки стандартных процедур;
- осуществления взаимодействия с ЦВК и другими АРМ;
- пополнения архива проектных процедур.

Таблица 1.2. Характеристика АРМ

Характеристика	АРМ малой производительности	АРМ средней производительности	АРМ высокой производительности
Производительность процессора, млн. операций/с	0,3...1,0	1,0...1,5	1,5...4,0
Разрядность процессора, бит	8...16	16...32	32
Объем ОЗУ, Мбайт	0,064...0,5	0,5...4,0	4...8
Объем ВЗУ, Мбайт	1,0...10,0	10...50	50...100

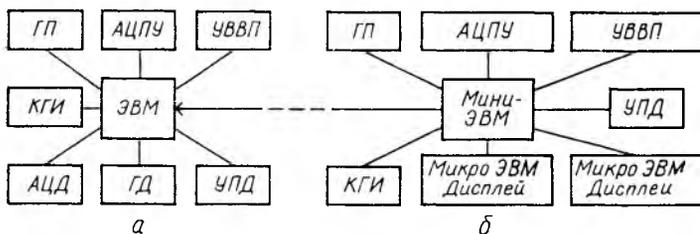


Рис. 1.11. Структура комплекса технических средств.

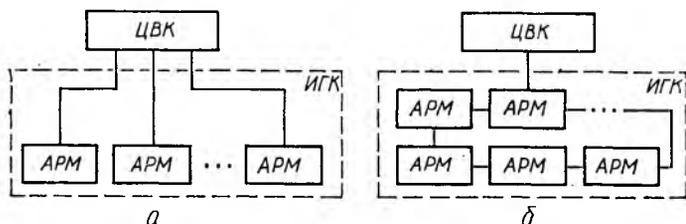


Рис. 1.12. Структура двухуровневых САПР:

а — радиальная; б — кольцевая

Основные характеристики трех классов АРМ — их процессоров, оперативных (ОЗУ) и внешних (ВЗУ) запоминающих устройств — приведены в табл. 1.2.

АРМ высокой и средней производительности должны обеспечивать мультипрограммный и многопользовательский режимы работы.

Поскольку структура САПР в значительной мере определяется составом используемых технических средств, возможны разные варианты структур, образующие САПР с различным числом уровней.

Основу комплекса составляет ЭВМ (рис. 1.11, а), образующая совместно с другими техническими средствами АРМ. В состав АРМ включают устройства обмена информацией:

алфавитно-цифровой дисплей (АЦД);

графический дисплей (ГД);

алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ);

устройство ввода данных с перфолент или перфокарт (УВВП);

кодировщик графической информации (КГИ);

графопостроитель (ГП) или чертежный автомат.

В настоящее время начинается переход к безбумажной информатике, поэтому УПД и УВВП теряют свое значение.

Основу АРМ составляют ЭВМ высокой или средней производительности (ЕС-1022, ЕС-1033, ЕС-1045), однако рост возможностей мини- и микроЭВМ приводит к предпочтительности построения АРМ по схеме рис. 1.11, б. При этом совмещение в одном дисплее возможностей АЦД и ГД делает все терминалы (рабочие места) графическими.

САПР, функционирующие по схемам рис. 1.11, называются одноуровневыми, поскольку их основу образуют одна или несколько ЭВМ высокой производительности, объединенных на одном уровне, называемом ЦВК. Эти комплексы позволяют эффективно выполнять

функции программной обработки данных при необходимости в высоких вычислительных ресурсах. Однако для более эффективной связи пользователя с САПР и решения большего числа относительно сложных задач целесообразно иметь в САПР второй уровень, называемый интерактивно-графическим комплексом (ИГК). В состав ИГК входит несколько АРМ, объединенных радиальной (рис. 1.12, а) или кольцевой структурой (рис. 1.12, б). При использовании в АРМ мини-ЭВМ недостаточной производительности применяют радиальную структуру, что позволяет передать функции управления ЦВК и там же организовать основную часть БНД и СУБД. Используя специализированные связанные процессоры, можно связать АРМ в кольцевую сеть, либо распределенную вычислительную сеть (при введении дополнительных связей в структуру ИГК на рис. 1.12, б). Для САПР ЭС в ее структуре целесообразно выделить группу вычислительного и периферийного оборудования для реализации АСНИ и БД по характеристикам режимов электропотребления.

Таким образом, в настоящее время имеется достаточно средств и возможностей реализации САПР электроснабжения.

# ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР

---

Повышение уровня компьютерной грамотности инженерно-технических работников, бурное развитие и широкое распространение персональных ЭВМ (ПЭВМ) создают предпосылки для самостоятельной разработки прикладных программ пользователями САПР. Поэтому знания состава, структуры и возможностей основных видов обеспечения САПР необходимы не только их разработчикам, но и пользователям.

### 2.1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР (ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА)

#### Современные ЭВМ

Основу технического обеспечения САПР составляют ЭВМ. Этот вид техники, благодаря значительным достижениям в области радиоэлектроники, развивается чрезвычайно быстро. Первые ЭВМ были созданы на рубеже 40—50 годов и за прошедшие годы сменилось четыре поколения вычислительных машин. Изменения в элементной базе, основу которой в первых ЭВМ составляли вакуумные радиоэлектронные лампы, затем транзисторы и далее интегральные схемы (ИС), большие (БИС) и сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), позволили в кратчайшие сроки повысить быстродействие и объем памяти ЭВМ на четыре—пять порядков. В табл. 2.1 отражены основные этапы развития вычислительной техники.

ЭВМ нового, пятого, поколения [28] будут принципиально отличаться от существующих машин по архитектуре, предусматривающей параллельную обработку данных. Предполагается, что новое поколение ЭВМ будет иметь быстродействие свыше  $10^{-10}$  операций в секунду и объем оперативной памяти  $10^{20}$ ...  $10^{25}$  бит. Эти ЭВМ проектируются как системы искусственного интеллекта и предполагают наличие базы знаний и максимально «дружелюбного» отношения к пользователю, предоставляя ему возможность общения на естественных языках посредством голоса и графики [28].

Многообразие существующих ЭВМ обуславливает создание САПР с различными структурой и эффективностью. Для правильного решения необходимо оценивать вычислительные возможности и относительную стоимость ЭВМ (рис. 2.1).

К техническим средствам ТО САПР предъявляются следующие специфические требования:

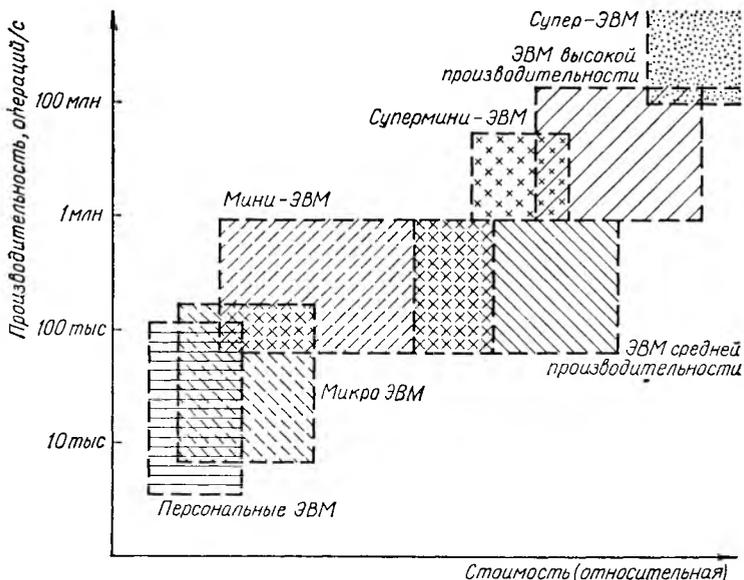


Рис. 2.1. Классификация современных ЭВМ.

производительность ЭВМ, измеряемая количеством операций в секунду, должна быть достаточна для решения всех проектных задач; возможность оперативного взаимодействия проектировщика с ЭВМ; открытость технических средств для развития и реконфигурации; широкое использование входной и выходной графической информации о проектируемом объекте;

приемлемое для проектировщика время реакции системы на его запросы.

Супер-ЭВМ, ЭВМ высокой и средней производительности используют в составе САПР в основном для решения сложных задач (имитационное моделирование, оптимизация); мини-ЭВМ служат основой для построения АРМ, инженерных рабочих станций и рабочих мест проектировщиков (РМП); персональные ЭВМ предназначены для повседневной работы инженера.

Возможности ЭВМ различных классов и сравнительная оценка выпускаемых ЭВМ представлены в табл. 2.2 и 2.3 (по данным [30]).

Таблица 2.1. Развитие средств вычислительной техники

Поколение ЭВМ	Годы создания	Элементная база	Быстродействие	Память, бит
1	1960	Транзисторы	$10^{-5}$	$10^9$
2	1963—1965	ИС	$10^{-6}$	$10^{11}$
3	1970—1975	БИС	$10^{-7}$	$10^{13}$
4	1975—1980	СБИС и опто-электроника	$10^{-8}$ и менее	$10^{16}$ и более

Таблица 2.2. Характеристики супер-ЭВМ и ЭВМ высокой и средней производительности

Характеристики ЭВМ	Тип ЭВМ										
	супер-ЭВМ		ЭВМ высокой производительности						ЭВМ средней производительности		
	V-205	X-МП	ПС-2000	«Эль-брус-2»	ПС-3000	IBM-3681	ЕС-1066	ЕС-1065	ЕС-1055 М	ЕС-1046	ЕС-1036
Производительность, млн. операций/с	420	100	200	120	30	14	5	6	0,45	1,2	0,4
Разрядность машинного слова	64	64	24	32	32	32	32	32	32	32	32
Емкость ОЗУ, Мбайт	—	64	6	4,5	8	32	16	16	4	8	4

Таблица 2.3. Характеристики супермини-, мини-, микроЭВМ и ПЭВМ

Характеристики ЭВМ	Тип ЭВМ														
	супермини-ЭВМ		мини-ЭВМ						микроЭВМ				ПЭВМ		
	11/780	32/87	«Электроника-79»	СМ-1420	«Электроника-100»	СМ-4	СМ-1210	СМ-2 М	«Электроника-60»	СМ-1800	СМ-50/60	«Ис-кра-226»	«Электроника-85»	ДВК-2 М	«Агат»
Производительность, млн. операций/с	1,1	4	3	0,23	0,8	0,8	1	0,5	0,8	0,5	0,15	0,1	0,6	0,5	0,3
Разрядность машинного слова	32	32	16	16	16	16	16	16	16	8	16	16	16	16	8
Емкость ОЗУ, байт	8М	—	4М	2М	256К	256К	4К	256К	256К	64К	128К	128К	2М	56К	128К

Таблица 2.4. Характеристики ПЭВМ семейства «Электроника»

Модель ПЭВМ	Тип процессора	Быстродействие, тыс. операций/с	Объем ОЗУ, Кбайт	Число команд	Системное программное обеспечение	Внешняя память	Устройство отображения информации
ДВК-2М (МС 0501.02)	K1801BM1	500	56	64	ОС: ОСДВК языки: Ассемблер, БЕЙСИК, ФОРТРАН	2×220 К НГМД типа «Электроника-6022»	Дисплей типа 15ИЭ-00-013.1
ДВК-3 (МС 0502)	K1801BM2	10 000	56	72	То же	2×440 К НГМД типа «Электроника-6021»	Дисплей алфавитно-цифровой; 25 строк × 30 с символов типа МС 6105.3
ДВК-3М2 (МС 0502.77)	То же	То же	То же	То же	ОС: ОСДВК язык Паскаль	2 × 220 К НГМД «Э»-6022	Видеомонитор алфавитно-цифровой и графический МС6105.01
«Электроника-85» (МС 0585)	K1811 K1818	600	512	138	ОС: Прос, Фодос — 2. Языки: БЕЙСИК, ФОРТРАН, Паскаль Макро Модуля — 2	2×400 К НГМД 5...10 М НМД	Монитор алфавитно-цифровой и графический; 25 строк × 80 символов 960×240 точек МС 6105.02
«Электроника ТЗ-29МК»	K589	500	256	139	ОС: Однопользовательская, резидентная. Языки: БЕЙСИК, Ассемблер	НГМД типа «Электроника ГМД 7012». Два кассетных ЗУ 200 Кбайт	Дисплей алфавитно-цифровой, графический; 25 строк × 80 символов 512×256 точек

Таблица 2.5. Характеристики ПЭВМ

Тип ПЭВМ	Тип процессо-ра	Быстродей-ствие тыс. операций/с	Объем ОЗУ, Кбайт	Системное программное обеспечение	Внешняя память	Устройства отображения информации
«Нейрон И9.66»	K1810BM86	10 000	256	ОС: Нейрон-ДОС1 Нейрон-ДОС2 Языки: БЕЙСИК, ПАСКАЛЬ	НГМД: 2×220 К НМД: ЕС 5323.320 К	АЦПУ: Нейрон 04.31 ГП: Нейрон ИС.61 Видеомонитор
ЕС-1840	То же	1000	640	ОС: М86 по типу CP/M—86 Языки: ПАСКАЛЬ, ФОРТРАН, СИ и др.	НГМД: 2×320 К	АЦД: 25 строк по 80 символов АЦПУ
«Искра 1030.11»	»	1000	—	ОС: АД ОС Языки: БЕЙСИК, ПАСКАЛЬ, СИ	НГМД: 2×220 К	АЦПУ: рулонного типа К6312М Видеомонитор
«Истра» (одно-платная ПЭВМ)	»	1000	1256М	ОС: по типу CP/M	НГМД: 2×220 кК	То же
ПК-11	KP1801BM2	1000	256 (до 16М)	ОС: БОС или РАФОС	НГМД 2×220 К	»
«Квант»	K581	250	4000	—	НГМД: 1×520 К	АЦД типа ДС-2000

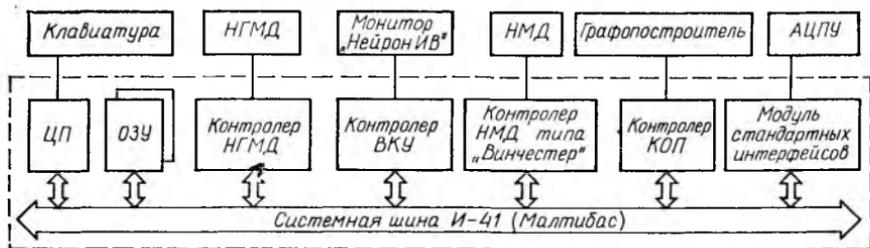


Рис. 2.2. Структурная схема ПЭВМ «Нейрон-И9.66».

Производительность ЭВМ во многом определяется характеристиками подсистемы памяти, реализуемой совокупностью запоминающих устройств (ЗУ), которые подразделяются на три уровня: сверхоперативная память (СОЗУ), оперативная память (ОЗУ) и внешняя память (ВЗУ). Такое деление памяти обусловлено невозможностью удовлетворить ряд требований (большая емкость, высокое быстродействие, малые габаритные размеры и стоимость хранения информации) в ЗУ одного уровня.

В настоящее время широко распространены ПЭВМ, основным достоинством которых является прямой доступ пользователя к ЭВМ и низкая стоимость, причем большинство ПЭВМ обладает достаточно мощными периферийными устройствами (ПУ).

На рис. 2.2 приведена структурная схема ПЭВМ типа «Нейрон И9.66», иллюстрирующая широкий спектр ПУ современных персональных компьютеров. В состав ПУ такой ЭВМ входят: накопитель на гибких магнитных дисках (НГМД); накопитель на жестких магнитных дисках (НМД); графопостроитель «Нейрон ИС.61» (цифровой); АЦПУ; алфавитно-цифровой и графический дисплей (видеомонитор), имеющий размеры поля 25 строк × 80 символов, а в режиме вывода графической информации 640 × 200 точек.

В табл. 2.4 и 2.5 отражены возможности современных ПЭВМ [19], указаны типы некоторых ПУ, а также типы операционных систем (ОС).

Сравнительный анализ показывает, что по вычислительным возможностям значительного расширения состава ПУ современные ПЭВМ не уступают многим ЭВМ средней производительности и пригодны для построения на их основе АРМ-проектировщика.

### Внешние запоминающие устройства

ВЗУ позволяют хранить объемы информации, превышающие десятки и сотни гигабайтов, что обеспечивает возможность построения БНД в САПР, оперирующих большими объемами справочной и проектной информации. В настоящее время в качестве основных средств ВЗУ большой емкости используются устройства с магнитными носителями информации, называемые накопителями на магнитной ленте, жестких дисках, сменных дисках, гибких дискетах и магнитных барабанах (соответственно НМЛ, НМД, НСМД, НГМД, НМБ). Во время вычислительного процесса ВЗУ реализуют двухсторонний обмен информацией с ОЗУ ЭВМ.

Таблица 2.6. Внешние запоминающие устройства ЕС ЭВМ

Марка, модель	Тип	Емкость, Мбайт	Скорость обмена информацией, Кбайт/с	Страна-изготовитель	Примечание
ЕС-5002.01	НМЛ	20	100	НРБ	Для работ с мини-ЭВМ
ЕС-5002.03	То же	20; 40	96; 189	ГДР	То же
ЕС-5017	»	20	64	СССР	
ЕС-5025	»	20; 40	64; 126	СССР	
ЕС-5050	НМД	7,25	156	СССР	Для одного пакета дисков
ЕС-5061	НСМД	29	312	НРБ	Сменные диски
ЕС-5066	То же	100	806	СССР	То же
ЕС-5067	»	200	806	НРБ	»
ЕС-5069.00	НСМД	3,125	156	НРБ	Сменные диски
ЕС-5074	НГМД	0,5	250	НРБ	Для мини-ЭВМ
ЕС-5089	НГМД	1,56·10 <sup>-3</sup>	1,56	ГДР	Минидискеты

Наиболее быстродействующими являются НМБ, однако они все более вытесняются НМД и НГМД, имеющими значительно большую емкость и практически одинаковое с НМБ быстродействие. НМЛ имеют более низкую стоимость хранения информации и надежность, однако являются быстродействующими и поэтому применяются для запоминания больших объемов архивной информации. В последнее время в составе ВЗУ мини- и микроЭВМ применяются кассетные НМЛ, которые при невысоких эксплуатационных характеристиках компактны и дешевы. Это обстоятельство объясняет их применение в числе периферийных устройств многих ПЭВМ.

Накопители НМД, НСМД, НГМД различают по числу дисков (однодисковые и с пакетом дисков), возможности смены дисков (стационарные и сменные), а также по размеру дискет (для ГМД).

Одно из последних достижений в области НМД — создание накопителей типа «Винчестер», которые при одинаковых с накопителями

Таблица 2.7. Внешние запоминающие устройства СМ ЭВМ

Марка, модель	Тип	Емкость, Мбайт	Скорость обмена информацией, Кбайт/с	Страна-изготовитель	Примечание
СМ-5205	НМЛ	0,312	—	ПНР	Кассетный
СМ-5206	То же	0,52	1,5	ГДР	То же
СМ-5208	»	0,35×2	4,0	СССР	2 кассеты
СМ-5211	»	0,56×2	1,25	СССР	2 кассеты
СМ-5300	»	11,35	10	НРБ	
СМ-5305	»	40	126	СССР	
СМ-5400.00	НМД	6,25	312,5	НРБ	2 диска
СМ-5402	То же	4,8	312,5	СССР	То же
СМ-5407	НСМД	29	312	СССР	
СМ-5408	То же	16	537,5	СССР	Двухдисковая кассета
СМ-5601	НГМД	0,39	31,25	ВНР	
СМ-5603	То же	0,5	40	СССР	
СМ-5608	»	1,025	31,25	ПНР	Для двух дисков
СМ-5616	»	0,5	64	СССР	То же

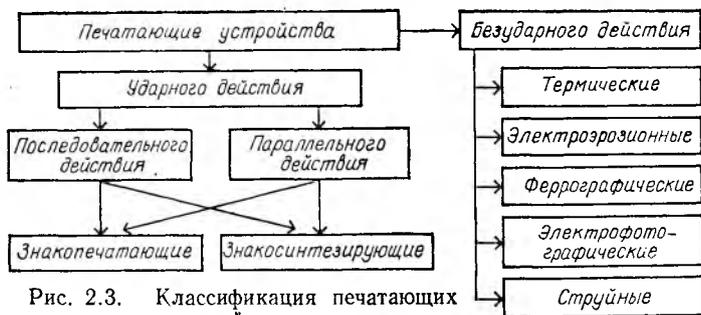


Рис. 2.3. Классификация печатающих устройств.

на ГМД размерах имеют в 5...60 раз больший объем памяти и примерно в четыре раза меньшее время доступа.

В табл. 2.6 приведены некоторые характеристики ВЗУ, применяемых в семействе ЕС ЭВМ, а в табл. 2.7 — применяемых в СМ ЭВМ. Как видно из таблиц, имеется большая номенклатура ВЗУ с широким спектром основных характеристик — емкости и скорости обмена информацией.

### Устройства вывода и документирования текстовой информации

Устройства этого класса предназначены для преобразования информации, выводимой из ЭВМ, в форму, пригодную для восприятия человеком, отвечающую требованиям стандартов на проектную документацию и удобную для последующего тиражирования, хранения и использования.

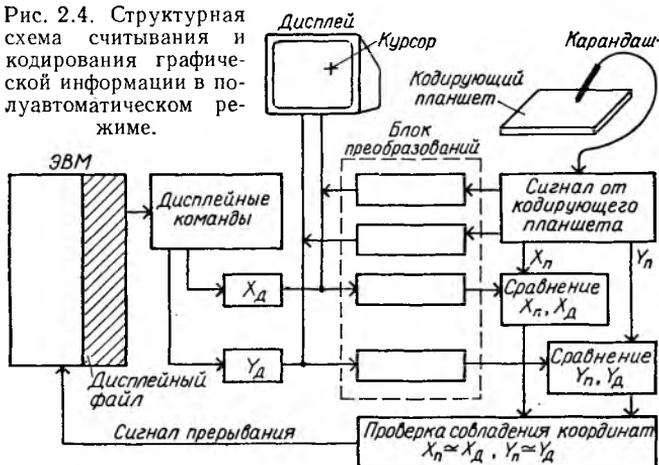
Выводимая для документирования информация представляется в виде текста и (или) таблиц.

Основную группу таких устройств составляют алфавитно-цифровые печатающие устройства, классификация которых по способам получения оттиска, формирования строки и знака и методу регистрации, приведена на рис. 2.3, а характеристики наиболее распространенных моделей — в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Алфавитно-цифровые печатающие устройства

Марка, модель	Принцип печати	Исполнение	Скорость печати, строк/мин	Число символов в строке	Ширина бумаги, мм
ЕС-7031	Печатающий цилиндр	3 копии	900; 1200	128	60...240
ЕС-7032	Знаковые колеса	Буферная память	900	128	80...420
ЕС-7037	Шрифтоноситель цепного типа	5 копий	700;1000	132	80...420
СМ-6300	Последовательная	Матрица 7×7	180 знаков/с	158	420
СМ-6305	Параллельная	96 знаков	500	132	420
СМ-6308	Знакосинтез	Матрица 7×5	100 знаков/с	128	420
СМ-6321	Параллельная	—	843	132	100...505
СМ-7108	Знакосинтез	Матрица 8×5	150 знаков/с	132	420

Рис. 2.4. Структурная схема считывания и кодирования графической информации в полуавтоматическом режиме.



К АЦПУ относятся также устройства ЕС-7036, ЕС-7038, СМ-6308, которые предназначены для документирования как цифровой, так и графической информации, а также электростатическое устройство вывода графической и алфавитно-цифровой информации типа СМ-6403. Устройство ЕС-7602 предназначено для вывода информации с помощью букв, цифр и специальных знаков на микрофиши и является связующим между ЭВМ и аппаратурой микрофильмирования, что позволяет автоматизировать архив проектной документации.

### Устройства ввода-вывода и документирования графической информации

В числе этих устройств выделяют кодировщики (КИ) и чертежные автоматы (ЧА).

Кодировщики как устройства ввода графической информации выполняют операции считывания информации и представления ее в виде кодов, пригодных для ввода в ЭВМ. По степени участия человека в процессе считывания КИ разделяют на автоматические (следающие и сканирующие) и полуавтоматические, где считывание выполняется оператором с помощью визира (курсора). По способу получения кодов КИ подразделяют на оптико-механические, сеточные, акустические и резистивные. Структурная схема процесса считывания и кодирования графической информации в полуавтоматическом режиме с контролем ввода по графическому дисплею приведена на рис. 2.4. Система организуется таким образом, что координаты положения указателя (карандаша) на планшете ( $X_p, Y_p$ ) соответствуют положению курсора на экране дисплея ( $X_d, Y_d$ ) и перемещение карандаша вызывает соответствующее перемещение курсора. В момент времени, когда  $\Delta X = (X_d - X_p) \approx 0$  и  $\Delta Y = (Y_d - Y_p) \approx 0$ , вырабатывается сигнал прерывания для ЭВМ, указывающий, что элемент графического изображения определен. В табл. 2.9 приведены некоторые характеристики КИ.

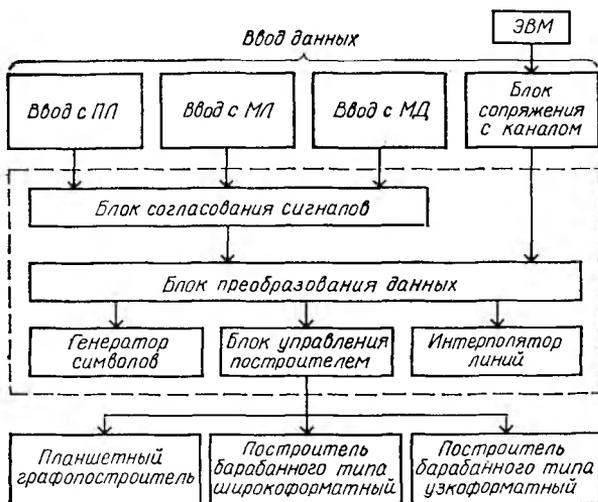


Рис. 2.5. Базовая структура графических регистрирующих устройств.

Чертежные автоматы предназначены для вывода и документирования графической информации в виде чертежей, схем, графиков и т. п. По способу действия исполнительного механизма ЧА подразделяются на электромеханические, электронные, оптико-механические, строчно-регистровые и растровые и являются графическими регистрирующими устройствами. Базовая структура таких устройств приведена на рис. 2.5. Информация от ЭВМ может передаваться через канал сопряжения и устройство принимает информацию со скоростью, определяемой ЭВМ, каналом и блоком преобразования данных, причем, для согласования быстродействия электронных и механических устройств используют буферные устройства памяти. Однако наиболее часто используется автономный режим работы с графической информацией,

Таблица 2.9. Кодировщики графической информации

Марка, модель	Тип	Размер рабочего поля, мм	Максимальная скорость мм/с	Тип рабочего органа	Периферийные устройства
ГАРНИ-2	Планшетный, индукционный	1150×800	—	Карандаш	ПЛ-150
ПКГИ-0	То же	850×613	100	Визир, карандаш	То же
СМ-6404	»	850×600	100	Визир	НСМД
ТС-3	Планшетный, совмещенный с ГП	300×400	500	—	—
СМ-6402	Планшетный, индукционный	850×600	100	Карандаш, кольцо	НСМД
ЕС-7907	Оптико-механический	1189×841	—	Оптический визир	НМЛ
АП-6261	Индукционный	1189×841	300	—	НМЛ

Таблица 2.10. Графические регистрирующие устройства

Модель	Тип	Максимальная скорость, мм/с	Размеры рабочего поля, мм	Число вычерчиваемых символов	Число цветов
ЕС-7050	Планшетный	50	1050×1000	255	3
ЕС-7052	То же	200	380×600	65	3
ЕС-7053	»	150	841×1600	255	3
ЕС-7054	»	50	1600×1200	Произ- вольно	4
СМ-6403	Электростатический, рулонный	12 000 стр/мин	600	300	1
ЭМ-709	Электромеханический	—	1200×840	Произ- вольно	1
АП-7252	Рулонный	250	594	—	3
АП-7251	Планшетный	100	1189×841	—	3

записанной предварительно на перфоленду (ПЛ), магнитную ленту (МЛ) или магнитные диски (МД).

В основе работы ЧА лежит принцип преобразования команд на его входе в пропорциональное перемещение пишущего узла на выходе. Число взаимных направлений перемещения пишущего узла изменяется для различных устройств дискретно от 4 до 32. Для обеспечения возможности построения линий произвольного наклона вводят линейный интерполятор, а для воспроизведения кривых — линейный, линейно-круговой или параболический интерполяторы. Алфавитно-цифровые символы на поле чертежа обычно пишутся тем же узлом, что и линии, или с помощью специальных печатающих головок. На рис. 2.5 показан генератор символов, позволяющий выполнить надписи. Графопостроители подразделяются также по способу расположения носителя информации на планшетные и рулонные. Чертежные автоматы, работающие с высокой точностью, называются координатографами.

В табл. 2.10 приведены некоторые характеристики ЧА.

### Устройства оперативного взаимодействия

Человек может воспринимать информацию различными способами, однако наибольший ее объем поступает по зрительному (80 %) и слуховому (10 %) каналам. Поэтому для наиболее оперативного взаимодействия пользователя и ЭВМ в САПР целесообразно использовать средства визуального и звукового отображения информации и ручные органы управления [30]. Современные средства речевого ввода — вывода еще недостаточно совершенны и основными средствами оперативного взаимодействия являются клавиатуры (символьная и функциональная) и дисплеи (алфавитно-цифровые (АЦД) и графические (ГД)).

АЦД позволяют визуализировать только информацию в виде последовательности алфавитно-цифровых символов, а ГД — как графическую, так и алфавитно-цифровую информацию. На рис. 2.6

приведена структурная схема АЦД, где обозначено: БСИ — блок сопряжения с интерфейсом; ФС — формирователь символов; БЗУ — буферное запоминающее устройство; БУЯЛ — блок управления яркостью луча; УУ — устройство управления; УУОЛ — устройство управления отклонением луча; АЦК — алфавитно-цифровая клавиатура; ФК — функциональная клавиатура; ЭЛТ — электронно-лучевая трубка; ОС — отклоняющая система. Перемещением луча по экрану ЭЛТ, покрытому люминофором и управлением яркостью луча, можно получать изображение в виде светящихся участков экрана. Перемещением луча управляет ОС под действием УУОЛ, которое преобразует координаты элементов изображения в соответствующие напряжения на зажимах ОС. Для генерации изображения (его восстановления) требуется БЗУ, где хранится информация об изображении. УУ организует работу всех элементов схемы дисплея по командам оператора от ОРК или командам ЭВМ через БСИ. Ввод и редактирование информации выполняются АЦК и ФК.



На рис. 2.7 приведена структурная схема графического дисплея со световым пером (ЗОС — знаковая отклоняющая система; КОС — координатная отклоняющая система).

В современных ГД используются растровый и векторный способы формирования изображений. При растровом методе луч перемещается по строкам раstra и подсвечивается в тех точках, где имеются элементы изображения. Растровые дисплеи дешевле векторных, и с их помощью можно формировать полутоновые, цветные и затененные

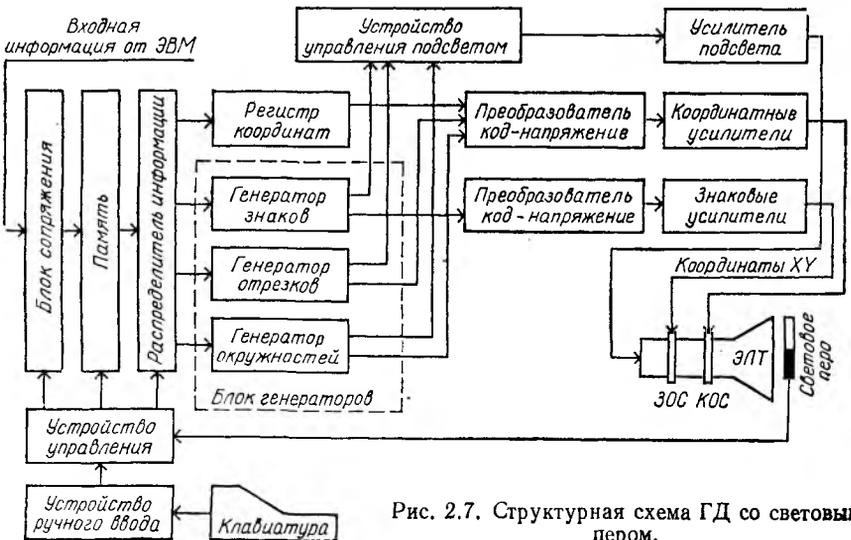


Рис. 2.7. Структурная схема ГД со световым пером.

Таблица 2.11. Характеристики АЦД и ГД

Модель	Максимальное число символов на экране	Набор символов	Число адресуемых точек на экране	Максимальное удаление от ЭВМ	Примечание	
Алфавитно-цифровые	ЕС-7066	12×80	128	—	СССР	
	ЕС-7168	16×80	96	—	ВНР	
	ЕС-7927	24×80	96	—	ГДР	
	СМ-7202	24×80	96	—	ЧССР	
	СМ-7203	20×72	64	—	Куба	
	СМ-7204	24×80	96	—	СССР	
	СМ-7219	24×80	95	—	ВНР	
	ВТА-2000	24×80	96	—	—	
	ТС-7063	25×80	160	—	2000	
Графические	ЕС-7064	2100	74×52	1024×1024	500	Векторный
	СМ-7300	40×72	128	1024×1024	15	То же
	СМ-7301	24×80	125	512×236	15	Графики, гистограммы
	СМ-7304	28×53	96	320×287	15	Цветной, полутоновый
	СМ-7206	3000	128	1024×1024	—	Интеллектуальный, векторный
	СМ-7316	4096	111	2048×2048	—	Широкоформатный
	К331-10/2	—	96	1024×1024	—	Векторный

изображения. Векторный способ предусматривает перемещение луча по тем местам экрана, где должны находиться элементы изображения; луч может формироваться аналоговым или цифровым способами. В случае цифровой генерации векторов вычисляются координаты точек, лежащих вблизи требуемой линии, затем эти точки подсвечиваются, луч ЭЛТ перемещается дискретными шагами, каждый из которых означает появление на экране новой точки. При аналоговой генерации вектора на ЭЛТ выдается непрерывный сигнал, пропорционально которому происходит отклонение луча, вычерчивающего на экране сплошную линию. Основным преимуществом векторного способа формирования изображений является меньший требуемый объем памяти и возможность получения достаточно сложных изображений.

В табл. 2.11 приведены характеристики некоторых типов АЦД и ГД.

Для расширения набора операций, выполняемых дисплеем в автономном режиме, его устройство управления создают на базе микропроцессора или микроЭВМ. Такие дисплеи называются интеллектуальными.

### Устройства подготовки данных

Устройства подготовки данных (УПД) предназначены для записи на промежуточный носитель (перфокарту, перфоленту, МЛ, МД, ГМД) данных, вводимых оператором с помощью алфавитно-цифровой клавиатуры, и перезаписи данных с нескольких носителей на один, для последующего ввода информации с носителя в ЭВМ.

Таблица 2.12. Характеристики УПД

Модель	Тип носителя	Скорость носителя м/с; байт/с	Число		Примечание
			символов	программ	
ЕС-9001	МЛ	39,6	94	2	
ЕС-9006	МЛ	39,6	95	2	Кассетный
УПДМ	МЛ	—	96	—	Мини-кассетный
УПДМК-1	МЛ	—	96	—	320 Кбайт
ЕС-9051	ГМД	по ЕС-5079	96	—	Микропроцессорное управ.
ЕС-9112С	ГМД	20 000	128	—	Флоппи-диски
СМ-6901	ГМД	То же	128	10	Видеомонитор
СМ-6921	ГМД	»	128	10	СМ-7108

Большинство УПД работают в автономном режиме и выполняют следующие основные операции: ввод программы, ввод данных, поиск программы, поиск данных, коррекцию и вывод программы и данных. В табл. 2.12 приведены данные некоторых типов УПД.

## 2.2. ЛИНГВИСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

В лингвистическом обеспечении САПР различают языки программирования и проектирования [29] (рис. 2.8).

Языки программирования — это языки, предназначенные для разработки программного обеспечения и являющиеся рабочим средством разработчиков САПР. К ним предъявляют требования универсальности, удобства использования и эффективности объектных (транслированных на машинный язык) программ. Универсальность определяется возможностями данного языка для описания программного обеспечения конкретной САПР, а эффективность объектных программ — свойствами используемого транслятора, зависящего от свойств языка. Эффективность оценивается затратами машинного времени и оперативной памяти на исполнение программ.

Удобство использования языка выражается в затратах времени программиста на освоение языка и написания программ на нем.

С точки зрения универсальности и эффективности объектных программ наилучшие показатели имеют машинно-ориентированные языки. Близость языкам машинных команд обуславливает простоту и

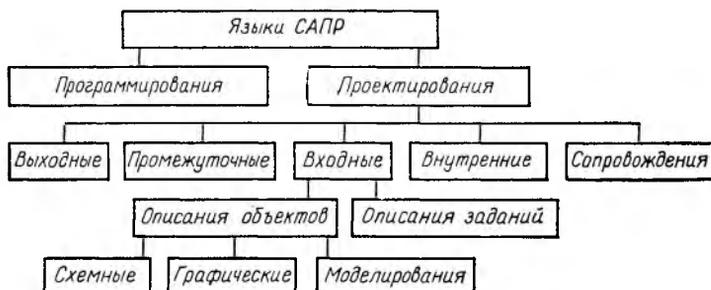


Рис. 2.8. Классификация языков САПР.

эффективность трансляторов на машинный язык, называемых ассемблерами. Поэтому машинно-ориентированные языки называют языками ассемблера, или автокодами. Однако эти языки чрезвычайно неудобны для человека, резко снижают производительность труда программистов и используются в основном для разработки тех моделей ПО САПР, которые требуют больших вычислительных ресурсов.

Вторую группу языков программирования составляют языки высокого уровня: БЕЙСИК, ФОРТРАН, ПЛ-1 ПАСКАЛЬ, АДА, СИ и т. п. Наиболее распространен ФОРТРАН, послуживший основой для разработки ПО большинства современных САПР.

Основу рабочего языка для вычислительных систем пятого поколения составляют различные версии языков ПРОЛОГ и ЛИСП [28].

При выборе языка программирования прежде всего принимают во внимание следующее:

удобство освоения и использования языка, производительность кодирования;

переносимость программ с ЭВМ одного типа на ЭВМ другого типа, из одной операционной системы (ОС) в другую (тиражируемость); возможность создания произвольных структур данных средствами языка;

наличие конструкций структурного программирования;

эффективность программ, написанных на данном языке.

Языки проектирования — это языки, предназначенные для описания информации об объектах и задачах проектирования и являющиеся средством пользователя САПР.

Входные языки служат для задания исходной информации об объектах и задачах проектирования и включают языки описания объектов (ЯОО) и языки описания заданий (ЯОЗ). ЯОО предназначены для описания свойств проектируемых объектов, а ЯОЗ — описания заданий на выполнение проектных операций и процедур. ЯОО, в свою очередь, подразделяются на схемные, графические и моделирования. Схемные языки применяются для описания принципиальных электрических или функциональных схем. Графические языки составляют основу лингвистического обеспечения в подсистемах машинной графики и геометрического моделирования. Языки моделирования используются в подсистемах имитационного моделирования.

Выходные языки предназначены для выражения результатов выполнения проектных процедур на ЭВМ.

Языки сопровождения используются для редактирования и корректировки данных в ходе проектных процедур.

Языки управления используют для представления управляющей информации для программно-управляемого исполнительного оборудования, например устройств документирования.

Промежуточные и внутренние языки предназначены для представления информации на определенных стадиях ее переработки в ЭВМ. Эти языки более унифицированы и универсальны по сравнению с входными языками, однако они и более громоздки. В то же время входные языки отличаются простотой и узкой проблемной ориентацией.

Согласование достоинств этих языков достигается в программных системах, в которые вводится универсальный промежуточный язык, отражающий особенности широкого класса проектируемых объектов. Пользователь составляет описание конкретного объекта на узкоспециализированном входном языке, а далее это описание с помощью специальной транслирующей программы (конвертора) переводится на универсальный промежуточный язык. Затем описание задачи с промежуточного языка переводится в объектную программу с помощью основного транслятора. При таком двухуровневом построении ЛО программная система сравнительно легко настраивается на новые подклассы объектов.

Языки программирования, предназначенные для описания развивающихся во времени процессов, оказываются достаточно близкими к языкам описания алгоритмов и называются процедурными языками, в отличие от непроцедурных, описывающих структуры проектируемых объектов. Процедурными являются большинство языков описания заданий и описания систем на метаязыке, а непроцедурными — схемные языки, описывающие алгоритмы построения математических моделей систем.

Для пользователя САПР непроцедурные языки являются более удобными, поскольку позволяют непосредственно описывать конкретную схему или чертеж, не заботясь о разработке моделирующего алгоритма. Формальный характер перевода исходной схемы в текст на непроцедурном языке облегчает ввод графической информации в интерактивных графических системах (ИГС), в которых исходная информация об объекте формируется пользователем непосредственно на экране дисплея, а кодирование ее по правилам непроцедурного языка выполняется автоматически [29].

В отдельную группу лингвистического обеспечения диалоговых режимов работы САПР выделяют диалоговые языки, объединяющие средства языков входного, выходного и сопровождения и служащие для оперативного обмена информацией между пользователем и ЭВМ. Поскольку различают пассивный (инициализируемый ЭВМ) и активный (по инициативе пользователя) режимы диалога, аналогично различают пассивные и активные диалоговые языки.

### **2.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР**

Программное обеспечение САПР подразделяется на специализированное и общесистемное. К основным функциям общесистемного обеспечения относятся:

- управление процессом вычислений;
- ввод, вывод и обработка информации;
- диалоговая взаимосвязь с пользователем в процессе проектирования;
- хранение, поиск, анализ, модификация данных, защита их целостности и секретности;
- решение общематематических задач;
- контроль и диагностика.

Основная функция специализированного (прикладного) ПО САПР — получение проектных решений, создаваемых на основе компонентов математического обеспечения с использованием базового программного обеспечения средств вычислительной техники.

### Операционные системы ЭВМ и мониторные системы САПР

Операционной системой называют комплекс системных управляющих и обрабатывающих программ, предназначенных для наиболее эффективного использования всех ресурсов вычислительной системы для обработки информации (ВС) и удобства работы с ней. При этом под ВС понимают совокупность аппаратных средств и программного обеспечения.

Полностью использовать возможности ВС с быстродействием в несколько миллионов операций в секунду можно только с помощью ОС, осуществляющей планирование и контроль всего вычислительного процесса. На рис. 2.9 приведена ориентировочная структура ПО (на примере ЕС ЭВМ): СУБД — система управления базами данных; СКП — система коллективного пользования; ППП — пакеты прикладных программ; АОС — автоматизированная обучающая система; КПТО — комплекс программ технического обслуживания; АУМВ — автоматизированный учет машинного времени. Все компоненты ПО взаимодействуют между собой посредством ОС. Простейшие ОС первоначально создавались как средство, освобождающее операторов ЭВМ второго поколения от установки перфолент и перфокарт в соответствующие вводные устройства, загрузки программ в ОЗУ для исполнения, составления очередности прохождения заявок (заданий на обработку), обработки ошибок и т. п.

Переход к современным сложным ОС произошел с появлением режима мультипрограммной обработки задач (рис. 2.10). Для реализации режима мультипрограммной обработки в состав современных ЭВМ кроме центрального процессора входят несколько специальных процессоров (каналов), работающих одновременно и независимо друг от друга и обеспечивающих только обмен информацией между ОЗУ и внешними устройствами. За время, необходимое для обмена информацией в задаче *A*, процессор может выполнять вычислительные операции по задачам *B* и *C* (рис. 2.10).

Кроме рационального распределения ресурсов ВС операционные системы представляют пользователям ряд сервисных услуг: стандарт-

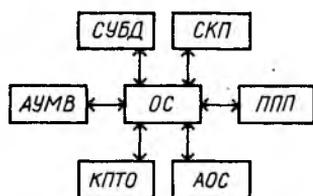


Рис. 2.9. Примерный состав программного обеспечения ЭВМ.



Рис. 2.10. Принцип мультипрограммной обработки задач.

ные методы доступа, средства отладки программ, подробной диагностики всех этапов прохождения задачи и пр.

По назначению различают ОС общего и специального назначения. К последним относят ОС, предназначенные для решения задач реального времени; ориентированные на организацию и ведение баз данных; для поддержки однородных вычислительных структур и сетей.

По режиму обработки задач различают ОС с одно- и многопрограммным режимом обработки задач, выделяя режим разделения времени, как разновидность мультипрограммного режима.

По способу взаимодействия с пользователем можно выделить ОС: в режиме пакетной обработки программ и режиме диалога. В последнем случае различают частичный диалог на этапе подготовки задач к решению и сквозной диалог на всех этапах обработки задачи. Диалоговые ОС в свою очередь подразделяют на одно- и многопользовательские. Поскольку разработка ОС не предусмотрена в числе задач разработки САПР более подробно их функционирование не рассматривается.

Для простейшего случая одноуровневой САПР укрупненная структура ПО приведена на рис. 2.11 и представлена ОС используемой ЭВМ, мониторингной системой, СУБД и пакетами прикладных программ (ППП). Каждый из ППП имеет ориентацию на определенную подсистему САПР: пакет программ трассировки распределительных сетей; пакет проектирования токопроводов; оформления конструкторской документации; расчета нормальных режимов СЭС и т. п. Эти пакеты, в свою очередь, имеют достаточно сложную структуру с выделением управляющей (монитор пакета) и обрабатывающей частей. В том случае, когда для управления ППП достаточно возможностей ОС ЭВМ и мониторингной системы САПР (см. рис. 2.9), управляющая часть в пакете не выделяется и он называется пакетом простой (библиотечной) структуры или просто библиотекой программ.

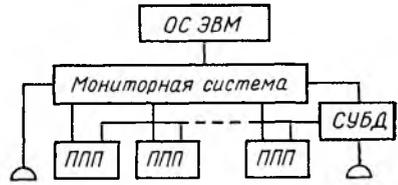


Рис. 2.11. Структура ПО одноуровневой САПР.

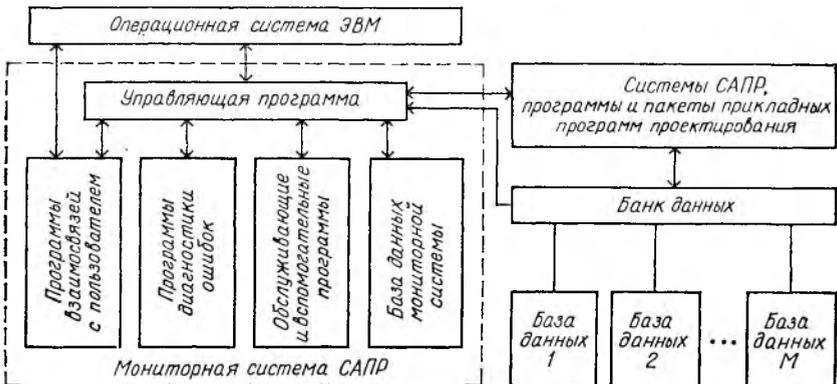


Рис. 2.12. Вариант организации мониторингной системы САПР.

Мониторная система САПР — сложная обслуживающая подсистемой САПР, включающая компоненты методического, программного и информационного обеспечения. На рис. 2.12 приведен вариант организации мониторинга системы САПР, выполняющей следующие функции: управление процессом реализации проектных процедур и операций;

организацию взаимодействия подсистем САПР;

интерпретацию языковых форм заданий на выполнение проектных процедур и операций;

распределение ресурсов САПР в процессе проектирования с учетом установленных приоритетов подсистем САПР, спланированного распределения ресурсов и запросов пользователей;

защиту ресурсов системы и баз данных САПР от несанкционированного доступа;

обеспечение диалоговых и интерактивных режимов работы при проектировании в условиях параллельно действующих подсистем САПР.

Разделяя с ОС ЭВМ ряд функций организации и управления вычислительным процессом, мониторинговая система предоставляет ряд программ взаимосвязи с пользователем, диагностики ошибок, редактирования и т. п.

### **Программное обеспечение диалога**

Функционально завершенная программа, выполняемая ЭВМ без вмешательства проектировщика, называется машинной процедурой [31]. Однако, пользуясь только машинными процедурами, т. е. автоматически, выполнить проектирование такого сложного объекта, как СЭС не представляется возможным. Многообразие проектных вариантов, многокритериальность процесса принятия решения, сложность полной автоматизации процедур синтеза вынуждают включать проектировщика в ПП. Его задачей при этом является принятие решений и выполнение неформализованных операций и процедур.

Взаимодействие человека и ЭВМ происходит посредством сообщений — совокупности данных, достаточной для выполнения определенных действий. Сообщение, поступающее от человека к ЭВМ называется входным, а от ЭВМ к человеку — выходным. Обычно сообщение размещается на экране дисплея и называется кадром. Обмен — последовательность, включающая сообщение от человека к ЭВМ, реакцию ЭВМ (машинную процедуру) и сообщение от ЭВМ к человеку. Диалог — последовательность обменов, выполнение которых приводит к решению поставленной задачи. Наиболее часто диалог используется для: обеспечения доступа к базе данных САПР; ввода данных для выполнения машинной процедуры; просмотра на дисплее некоторых результатов; контроля за ходом выполнения машинной процедуры.

Если определен диалог, то может быть построена последовательность выходных кадров. Идентичные кадры в такой последовательности называются эквивалентными и соответствуют одному и тому же состоянию экрана дисплея. Используя методы теории графов

[22] и поставив в соответствии вершинам графа — состояния экрана, а дугам — возможные переходы (каждой дуге ставится в соответствие реакция человека), можно сверткой последовательности кадров получить граф состояний экрана дисплея.

Сообщение несет в себе совокупность сведений, которые помогут быть информационными, запросом или ответом. Запрос предлагает последующий ответ, а ответ — реакция на предшествующий запрос. В том случае, если сообщение не предполагает немедленные действия и не является ответом на запрос, оно является информационным.

Форма сообщений может быть следующей:

табличной, директивной, на языке ОЕЯ.

Для обеспечения диалога разработаны методы доступа: графический, базисный и общий.

Базисный телекоммуникационный доступ (БТМД) имеет мощные и гибкие средства для построения систем телеобработки и обслуживает как локальные, так и удаленные терминалы (ЕС — 7920).

Общий телекоммуникационный доступ (ОТМД) имеет более ограниченные средства, сравнительно с БТМД, однако его макрокоманды доступа представляют собой язык высокого уровня для обработки сообщений. Особенностью его является наличие программы управления сообщениями (ПУС), которая обеспечивает их централизованную обработку. Прикладные программы пользователей могут быть разработаны практически независимыми от ПУС и типа используемых терминалов.

При любом методе доступа на физическом уровне можно выделить две фазы сообщений с терминала: определение готовности терминала к передаче входного сообщения пользователя; прием ЭВМ входного сообщения.

Готовность терминала к передаче оформляется в виде сигнала «Внимание», который может быть обнаружен ОС периодическим опросом. Пока пользователь не оформит входное сообщение и не нажмет клавишу, вызывающую этот сигнал (например, <CR>), система будет обрабатывать другие диалоговые или пакетные запросы. Кроме сигнала «Внимание» и непосредственного ввода — вывода методы доступа предусматривают промежуточное хранение сообщений в

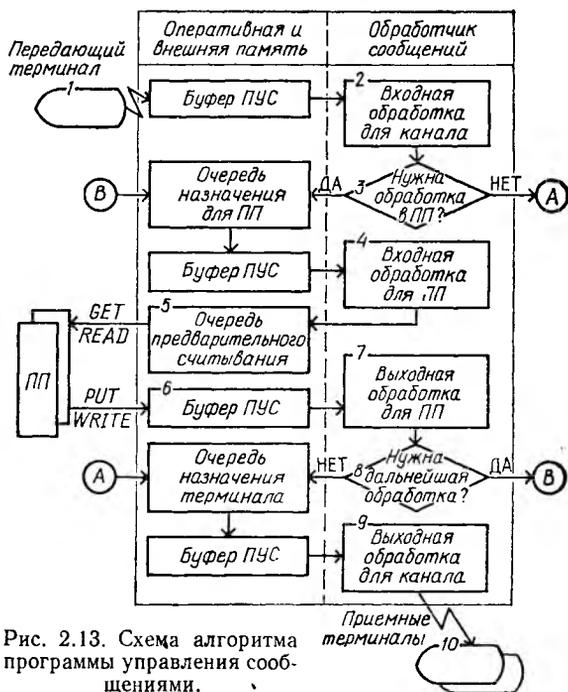


Рис. 2.13. Схема алгоритма программы управления сообщениями.

оперативной или внешней памяти ЭВМ, сборку и разборку сообщений при передаче по частям, добавление или удаление управляющей информации.

На рис. 2.13 приведен алгоритм прохождения сообщения через систему, управляемую ОТМД, содержащий следующие шаги:

*Шаг 1.* Обнаружение ОС готовности терминала к передаче и принятие входного сообщения в ЭВМ.

*Шаг 2.* Накопление данных в буфере.

*Шаг 3.* Передача сообщения в очередь к ПП (здесь прикладной программе), если это требуется; иначе передача сообщения в очередь терминала.

*Шаг 4.* Прием сообщения из очереди к ПП в буфер и передача после входной обработки в очередь предварительного считывания.

*Шаг 5.* Обработка прикладной программой данных из очереди считывания.

*Шаг 6. 7.* Передача результатов работы прикладной программы в буфер ПУС и далее выходная обработка для ПП.

*Шаг 8.* Поступление сообщения в очередь к другой программе и в очередь терминала.

*Шаг 9.* Выходная обработка сообщения для канала связи.

*Шаг 10.* Передача сообщения на один или несколько терминалов.

### **Программное обеспечение интерактивных графических систем**

Интерактивными графическими системами (ИГС) называют системы, построенные на базе ИГК, в которых проектирование графических объектов осуществляется непосредственно в режиме взаимодействия человека и ВС. При этом ИГС должны обеспечивать создание, модификацию и редактирование графических объектов. По данным [37] объем чертежных работ при проектировании электроснабжения составляет около 40...60 % общих затрат труда на проектирование, что обуславливает необходимость автоматизации этого вида проектной деятельности.

Варианты организации ПО САПР разнообразны и зависят от предметной области, аспектов и уровней описаний объектов САПР; степени автоматизации отдельных операций и процедур; архитектуры, состава и режима функционирования технических средств.

Рассмотрим вариант организации ПО одноуровневой САПР (рис. 2.14), соответствующий принципу деления подсистем САПР на проектирующие и обслуживающие. К обслуживающим подсистемам ПО относятся: диалоговая подсистема (ДП), инструментальная подсистема (ИП) и СУБД. Монитор обеспечивает взаимодействие всех проектирующих (ПП — ПП) и обслуживающих подсистем и управление ими.

ДП организует интерактивное взаимодействие пользователя с управляющей и проектирующими подсистемами САПР, подготовку и редактирование исходных данных, просмотр результатов работы ПП, функционирующих в пакетном режиме.

ИП программирования, основу которой составляет генератор прикладных программ, синтезирующий новые программы из унифици-

цированных модулей и подпрограмм, разработанных пользователем, необходима для обеспечения открытости ПО САПР. Генератор прикладных программ включает также средства автоматической разработки трансляторов для входных языков проектирующих подсистем.

Подсистема интерактивной машинной графики (ПИМГ) занимает промежуточное положение между проектирующими и обслуживающими подсистемами ПО. С одной стороны, средства машинной графики обслуживают ряд проектирующих подсистем, например расстановку опор ЛЭП по профилю трассы при проектировании внешнего электроснабжения или размещение электроаппаратов на плоскости панелей и щитов при конструкторском проектировании НКУ. С другой стороны, во многие подсистемы конструкторского проектирования ПО интерактивной машинной графики входит как основная часть. Поэтому в САПР возможно наличие нескольких пакетов машинной графики (базового пакета — в качестве обслуживающего и одного или более в составе ПП конструирования).

Взаимодействие человека и ЭВМ достигается с помощью средств машинной графики, которые составляют неотъемлемую часть ИГС и представляют собой комплекс программных средств для создания, хранения и обработки моделей объектов и их изображений с помощью ЭВМ. Интерактивная машинная графика — это такой вид машинной графики, при котором человек имеет возможность динамического управления содержанием изображения, его формой, размерами и цветом на экране дисплея.

В ИГС можно выделить следующие программные компоненты: ОС, СУБД, прикладные проблемные программы и систему машинной графики. В простейшем случае ИГС представляет собой набор независимых программ, запускаемых по инициативе пользователя с помощью команд ОС. В более сложных ИГС имеется свой монитор, являющийся резидентным в оперативной памяти и запускающий прикладные программы по директивам ИГС. Программное обеспечение таких современных ИГС как ГРИФ и МАГИСТР построено в виде комбинации рассмотренных случаев.

Важным свойством программного обеспечения САПР является возможность обеспечить прикладные программы способностью преобразовывать графическую информацию. При этом должна быть обеспечена независимость прикладных программ по отношению к разнотипным графическим устройствам. Эта задача решается использованием программирования задач обработки графической информации базовой графической системы (БГС). Функциональное назначение модулей ИГС и место БГС в ней показаны на рис. 2.15.

Функции ввода реализуются устройствами графического и текстового ввода (АЦД, ГД, кодировщик). Функции вывода графической информации реализуются посредством ГД, ЧА, координатографов.

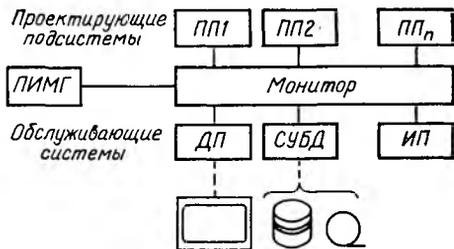


Рис. 2.14. Проектирующие и обслуживающие подсистемы одноуровневой САПР.

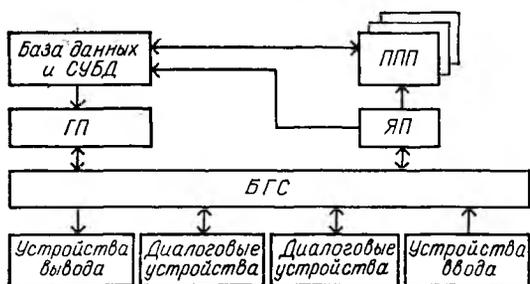


Рис. 2.15. Функциональные модули БГС.

Функции обработки запросов пользователей на входных и командных языках реализуются программой, называемой языковым (лингвистическим) процессором БГС. Он преобразует описания геометрии объектов проектирования, заданные на входных языках, в принятые в БГС формы. Преобразование геометрической

информации реализуется в программно-геометрическом процессоре, включающем модули выполнения геометрических операций. Например, удаление невидимых линий при построении проекций, построение сечений, разрезов и т. п. Решение прикладных задач, связанных с изменением геометрических параметров объектов проектирования выполняется ГПП, а хранение и поиск данных обеспечивается базой данных и СУБД.

Ранее мы рассматривали термин МОДУЛЬ как синоним понятия части ПО. Практически под модулем понимают программную единицу, для создания которой требуются минимальные знания о других компонентах ПО. Перекомпоновка и замена модулей не должна вызывать изменение ПО в целом. Основой модульности является независимость, согласно которой модуль должен:

реализовать единственную функцию, иметь один вход и один выход;

возвращать управление тому, кто его вызвал, и иметь возможность обращаться к другим модулям;

быть сравнительно невелик (рекомендуемая длина исходного текста модуля — одна страница листинга АЦПУ);

не должен сохранять историю своих вызовов.

Понятие МОДУЛЬ и принцип модульности широко используются в последующих разделах.

## 2.4. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

Проектировщик обращается к средствам САПР для выполнения конкретной проектной процедуры или получения сведений, необходимых для обоснования проектного решения. Эти функции не могут быть выполнены без информационного обеспечения, основной задачей которого является удовлетворение информационных потребностей проектировщика или других компонентов САПР. Основу ИО составляют банки данных, призванные обеспечить быстрый, удобный и санкционированный доступ к хранящимся в БНД сведениям. Эти сведения при условии удовлетворения требованиям полноты и достоверности должны быть организованы в структуры принятого в БНД вида. Правильно выполненная структуризация данных определяет степень удовлетворения ИО следующим требованиям: гибкости, надежности, наглядности и экономичности, под которыми понимают:

логическую независимость, обеспечивающую реорганизацию баз данных без изменения прикладных программ;

возможность параллельного доступа;

возможность ввода — вывода в (из) БД как алфавитно-цифровой, так и графической информации;

обеспечение возможности режима диалога.

возможность восстановления информации и программных средств БНД в случае их разрушения;

обеспечение стандартных или описанных пользователем реакций на несанкционированный доступ или ошибочный запрос;

представление пользователю БНД данных в привычной и удобной для восприятия форме;

наличие средств учета и протоколирования работы БНД;

исключение дублирования данных, кроме случаев, когда оно оправдано техническими и экономическими соображениями;

автоматизацию сбора статистических данных по частоте обращения к элементам БД, для повышения эффективности распределения памяти;

наличие средств тиражирования БД;

физическую независимость БНД, означающую, что изменение способов отображения данных на физических устройствах и методов доступа к ним не должно вызывать изменения прикладных программ.

Данные, с которыми взаимодействует любой компонент ПО (подпрограмма, программа, пакет программ) бывают трех типов: входные, выходные и промежуточные. Входные и выходные данные расположены вне данного компонента ПО (в ОЗУ или ВЗУ). Промежуточные данные могут располагаться как в области ОЗУ, занимаемой программной единицей, так и вне ее (в том числе и на внешних носителях). Данные, являющиеся входными и выходными одновременно, называются модифицируемыми. В общем случае входные данные подготавливаются пользователем либо являются результатом работы ранее выполненных программных единиц.

Использование БНД позволяет решить такие проблемы организации больших информационных массивов: сокращение избыточности; обеспечение целостности; разграничение доступа; обеспечение независимости представления данных. Последняя проблема решается путем двухступенчатого представления данных на логическом уровне [3].

На логическом уровне данные представляются в виде, удобном для пользовательских программ или проектировщиков.

Физический уровень представления данных отражает способ их хранения и структуру с учетом расположения на носителях информации в запоминающих устройствах.

Основным понятием БНД является модель данных, представляющая собой формализованное описание, отражающее состав и типы данных, а также взаимосвязи между ними.

Форма представления структур данных в ЭВМ зависит от предполагаемого использования этих данных. Известно, что не существуют такие структуры данных, для которых все операции со структурой одинаково эффективны [3]. Основное различие структур заключается в том, как адресуются элементы структуры данных (простей-

шие, неделимые части данных) в памяти: по месту или содержанию. Группы взаимосвязанных элементов, выдаваемых из памяти при обращении к БД, называются записями (или кортежами). Множество записей одного типа образует файл, таким образом БД представляет собой совокупность файлов. Наибольшее распространение при логической организации БД САПР получили сетевая, иерархическая и реляционная модели данных.

БД, логическое представление которых основано на использовании графов, называются сетевыми. Каждая вершина графа отображает группу однотипных записей, которой ставится в соответствие таблица, содержащая конкретные значения этих записей.

Иерархическая модель данных — совокупность ветвей (или «лес» деревьев), узлы которых представляют собой реализации записей, а связи направлены от класса записей к подклассу. Моделируемая область данных составляется из частей, каждая из которых, кроме одной (корня дерева, см. прил. 5), имеет одну и только одну предшествующую часть. Организация иерархической структуры БД показана на рис. 2.16, а, для доступа к записи из множества  $G$  должны быть указаны ключи записей из множества  $A$ ,  $C$  и  $G$ . Под ключом здесь понимается уникальное имя записи, в качестве которого может выступать элемент атрибута записи (простой ключ) или совокупность элементов нескольких атрибутов (составной ключ). С помощью ключа выполняется идентификация каждой конкретной записи, а также упорядочение записей в файле. Рис. 2.16, б отражает логическую схему для заданного типа запроса при реляционной модели данных ( $AK$  — атрибут кортежа;  $OYC$  — описание узла схемы;  $OЭС$  — описание элемента схемы). Основу реляционной модели данных составляет совокупность данных, сформированная в виде таблицы. Из теории множеств известно, что формальным аналогом таблицы является отношение [11], например отношением  $R$  называется подмножество декартового произведения множеств  $D_1, D_2, \dots, D_n$ :

$$R \subset D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n.$$

При этом  $R$  — есть множество всех возможных кортежей (см. прил. 4) типа  $(d_1, d_2, \dots, d_n)$  таких, что  $d_i \in D_i, i = \overline{1, n}$ . Множества  $D_i$  называют доменами, а  $n$  — степенью отношения  $R$ .

Совокупность кортежей, записанных друг под другом, образует таблицу, для которой строки — кортежи, а столбцы — атрибуты. Таким образом, атрибут  $A_i$  представляет собой некоторое подмножество домена  $D_i$  ( $A_i \subset D_i$ ). С другой стороны, можно рассматривать атрибут  $A_i$  как проекцию отношения  $R$  на  $i$ -ю координату. Например,  $D_1 = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}, D_2 = \{b_1, b_2, b_3\}$ . Тогда  $D_1 \times D_2 = \{(a_1, b_1), (a_1, b_2), (a_1, b_3), \dots, (a_4, b_3)\}$ . Отношение  $Q = \{(a_1, b_3), (a_2, b_1), (a_2, b_3), (a_3, b_1), (a_3, b_3)\}$  является подмножеством  $D_1 \times D_2$ . Атрибутами в этом случае являются множества  $A_1 = \{a_1, a_2, a_3\}$  и  $A_2 = \{b_1, b_3\}$ . При этом  $A_1 \subset D_1, A_2 \subset D_2$ . Запись вида  $Q(A_1, A_2)$  называется схемой отношения  $Q$  и наряду с названием отношения содержит имена атрибутов. Совокупность подобных схем отношений составляет схему реляционной БД.

Задание модели данных в БД выполняется на специальном языке

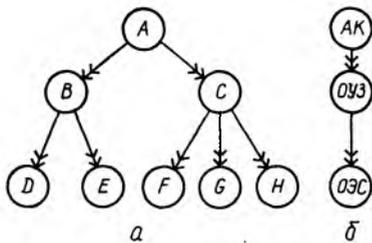


Рис. 2.16. Этапность моделирования БД:  
*a* — иерархическая схема; *б* — логическая схема для данного типа запросов.

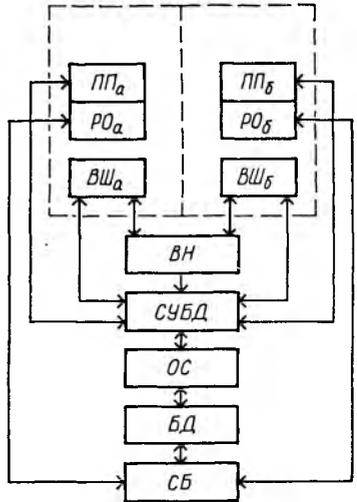


Рис. 2.17. Схема взаимосвязи СУБД с прикладными программами.

описания данных (ЯОД), в котором выделяют язык описания схем (ЯОД — С) и языки описания данных для подсхем (ЯОД — ПС).

Наиболее распространен трехуровневый способ построения БД: первый уровень (постоянная часть БД) является справочником, содержащим данные о ГОСТах, СНИПах, нормалях, элементах и ранее выполненных типовых проектах;

второй уровень (полупеременная часть БД) содержит данные о результатах проектирования на промежуточном этапе, например, спецификации, таблицы соединений;

третий уровень (переменная часть БД) содержит данные для работы нескольких узкоцелевых программ, решающих конкретные задачи проектирования.

Обычно 1-й и 2-й уровни БД размещаются на ВЗУ, а переменная часть БД хранится в ОЗУ.

Для обеспечения взаимодействия программ и подсистем САПР необходимо их информационное согласование, выполняемое двумя способами.

При первом способе сначала разрабатывают БД, а затем прикладные программы САПР (структура с централизованной БД). Второй — основан на построении СУБД, которая должна преобразовывать БД адаптивно к ППП, которые ее используют. Таким образом, СУБД перекомпоновывает БД в форматы и структуры, требуемые конкретными прикладными программами. СУБД, учитывая конкретное ПО, должна изменять методы доступа и физическую структуру данных без изменения программ пользователя.

Таким образом, СУБД будем называть совокупность программ, обслуживающих БД и выполняющих операции нахождения, поиска, обновления, удаления и добавления данных, а также обеспечение секретности, защиту целостности, синхронизацию, защиту от отказов и восстановление информации.

Взаимосвязь СУБД с программами пользователей (ПП<sub>а</sub> и ПП<sub>б</sub>) показана на рис. 2.17, где РО<sub>а</sub> и РО<sub>б</sub> — рабочие области пользователей

$a$  и  $b$ ;  $ВШ_a$  и  $ВШ_b$  — внешние модели данных  $ПП_a$  и  $ПП_b$ ;  $ВН$  — внутренняя логическая модель данных;  $СБ$  — системный буфер. Прикладные программы  $ПП_a$  и  $ПП_b$  обращаются с запросами к СУБД, которая, используя информацию о конкретной внешней модели (например,  $ВШ_a$ ) и основываясь на  $ВН$ , формирует обращение к программным средствам того или иного метода доступа в составе ОС. Полученные данные поступают сначала в  $СБ$ , а затем в  $РО_a$ , доступную пользователю. При этом СУБД рассматривается как некоторая надстройка над ОС, через которую происходит общение ПП с массивами информации.

## 2.5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САПР

В состав МО включают математические модели объектов проектирования (ММ), методы и алгоритмы выполнения проектных процедур. К ММ предъявляются требования универсальности, адекватности, точности и экономичности.

Степень универсальности ММ характеризует полноту отображения в модели свойств реального объекта; однако ММ может состоять из совокупности частных моделей  $M_j = (M_{1j}, M_{2j}, \dots, M_{nj})$ . Например, от модели силового трансформатора, используемой при его выборе при функционально-логическом проектировании схемы СЭС не требуется описания его формы и геометрических размеров.

Адекватность модели — способность отображать заданные свойства с допустимой погрешностью.

Точность ММ оценивается степенью совпадения значений параметров реального объекта и значений тех же параметров, рассчитанных с помощью ММ.

Если  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  — вектор выходных параметров объекта, а  $y_{jm}$  и  $y_{jn}$  — соответственно значения  $j$ -го параметра, полученные на ММ и истинные, то относительная погрешность ММ

$$\varepsilon_j = (y_{jm} - y_{jn})/y_{jn}.$$

Оценив все  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$  получаем векторную оценку погрешности модели, а используя некоторую форму нормирования этого вектора, можно получить скалярную оценку. Например,

$$\varepsilon_m = \|\varepsilon_j\| = \max \varepsilon_j, j \in [1, n].$$

Экономичность ММ характеризуется затратами вычислительных ресурсов на ее реализацию (затратами машинного времени  $T_m$  и памяти  $P_m$ ).

Классификация ММ по признакам представлена в табл. 2.14 [29]. Как видно из таблицы, большинство ММ, используемых в проектировании СЭС, относится к эмпирическим. Например, даже обоснованные теоретически модели метода коэффициента максимума для расчета электрических нагрузок оказались настолько загромождены эмпирическими допущениями и упрощениями, что потеряли свойства адекватности и точности.

Структурные ММ, предназначенные для отражения структурных свойств объекта, подразделяются на топологические и геометрические.

Таблица 2.14. Классификация ММ

№ при- знака	Признак классификации	Вид математической модели
1.	Характер отображаемых свойств объекта	Структурные; функциональные
2.	Принадлежность к иерархическому уровню	Микроуровня; макроуровня; мета-уровня
3.	Степень детализации описаний внутри одного уровня	Полные; макромодели
4.	Способ представления свойств объекта	Аналитические; алгоритмические; имитационные
5.	Способ получения модели	Теоретические; эмпирические

кие. Топологические ММ отображают состав и взаимосвязи элементов объекта и их применяют для решения задач компоновки оборудования, трассировки соединений и т. п. Они обычно имеют форму таблиц, списков, графов. Геометрические ММ содержат также сведения о форме и геометрических размерах этих элементов. Функциональные ММ предназначены для отображения физических или информационных процессов, происходящих в объекте.

Особенностью ММ на микроуровне является отражение процессов, протекающих в непрерывных пространственно-временных координатах. На макроуровне используют укрупненную дискретизацию пространства по функциональному признаку при непрерывном или дискретном времени. На метауровне в качестве элементов принимают достаточно сложные совокупности деталей.

Полной называют ММ, в которой фигурируют фазовые переменные, характеризующие состояния всех имеющихся межэлементных связей, а макромодели соответствуют описанию объекта при укрупненном выделении элементов.

Аналитические ММ представляют собой явные выражения выходных параметров, как функций от входных и внутренних параметров. Алгоритмические ММ выражают связи выходных параметров с внутренними и внешними в форме алгоритма. Имитационная ММ — алгоритмическая модель, отражающая поведение объекта во времени при заданных внешних воздействиях на него.

Методика получения ММ элементов заключается в следующем [29]:

на основе анализа возможных применений ММ выбираются свойства объекта, подлежащие моделированию, что и определяет степень универсальности модели;

собирается исходная информация о выбранных свойствах объекта; синтезируется структура модели, т. е. общий вид математических соотношений без численных значений параметров (наиболее ответственный и почти неформализуемый этап моделирования);

рассчитываются численные значения параметров модели, решением задачи минимизации ее погрешности;

оценивается точность и адекватность модели, лучше всего, путем сравнения с истинными значениями, полученными экспериментально и не фигурировавшими в числе данных, по которым синтезировалась модель.

### Задачи анализа

Большинство задач САПР электроснабжения относятся к задачам анализа, в основе которых лежит решение систем уравнений, описывающих режимы СЭС, известными численными методами [14], например, методом Гаусса—Зейделя и др. В частности, выбор трансформаторов ГПП с учетом перегрузочной способности и среднегодовых температур при заданном графике нагрузки, является типичной задачей анализа и оценки. Поэтому выделим задачи анализа, которые до настоящего времени не принимались в проектировании СЭС. Это задачи анализа чувствительности, которые заключаются в определении влияния внутренних и внешних параметров на выходные показатели.

В теории чувствительности предполагается наличие аналитической, в общем случае нелинейной, зависимости:

$$Y = F(X), \quad (2.1)$$

где  $Y$  — вектор выходных параметров;  $X$  — вектор внутренних и внешних параметров объекта (его модели).

Необходимо стремиться к получению зависимости по типу относительной погрешности вида:

$$\delta Y = \varphi(\delta x_1, x_1, \delta x_2, x_2, \dots, \delta x_n, x_n). \quad (2.2)$$

Разложением (2.1) в ряд Тейлора с приведением к нормированному виду и, ограничиваясь линейными членами разложения, получаем (2.2) в форме

$$\delta Y = \gamma_1 \delta x_1 + \gamma_2 \delta x_2 + \dots + \gamma_n \delta x_n, \quad (2.3)$$

где

$$\gamma_i = \partial Y / \partial x_i \big|_{x_i = x_i^0} \text{ при } x_i = x_i^0; \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.4)$$

Зависимость (2.3) называется классическим уравнением чувствительности, а его коэффициенты (2.4) — чувствительностями.

Поскольку аналитические зависимости вида (2.1) обычно в проектировании любых технических объектов чрезвычайно редки, — задачу нахождения (2.3) решают применением метода статистических испытаний к модели объекта, заданной алгоритмически. Программы такого моделирования чувствительности крайне громоздки, а реализация их связана с колоссальными затратами вычислительных ресурсов.

На кафедре электроснабжения КПИ разработан комбинированный аналитико-статистический метод оценки чувствительности, суть которого заключается в замене исходного набора зависимостей алгоритмического описания объекта:

$$B_i = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Таблица 2.15. Базовые функции оценки чувствительности

Вид элементарной функции	Уравнение относительной погрешности
$F_1 = \pm ax, a = \text{const}$	$\delta F_1 = \delta x$
$F_2 = x/y$	$\delta F_2 = (\delta x - \delta y)/(1 + \delta y)$
$F_3 = \sum_{i=1}^n x_i$	$\delta F_3 = \sum_{i=1}^n (x_i/\bar{F}_3) \delta x_i$
$F_4 = \prod_{i=1}^n x_i$	$\delta F_4 = \sum_{i=1}^n C_n^i (\delta x_1, \dots, \delta x_n)$
$F_5 = x^n, n = \text{const}$	$\delta F_5 = \sum_{i=1}^n C_n^i (\delta x_i)$
$F_6 = a^x, a = \text{const}$	$\delta F_6 = \bar{F}_6^{\delta x}, \bar{F}_6 = F_6(x = \bar{x})$
$F_7 = x^{1/n}, n = \text{const}$	$\delta F_7 = (1 + \delta x)^{1/n} - 1$

сложной функцией, аргументами которой являются базовые элементарные функции на основании известной теории Колмогорова:

$$B_i = F_{1i} \{F_{2i} [F_{3i} (\dots F_{ki} (x_1, x_2, \dots, x_n))]\}. \quad (2.5)$$

Основные базовые функции, комбинируя которые, можно описать практически любую исходную функцию, приведены в табл. 2.15.

Например, известное выражение для времени потерь:

$$\tau = (0,124 + T_m \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760$$

можно записать в виде

$$\tau = (a_2^2 + 2a_2 T_m + T_m^2) a_1.$$

Далее, используя  $F_1$  из табл. 2.15, получим (с учетом  $a_1 = 8760 = \text{const}$ )

$$\delta \tau = \delta (a_2^2 + 2a_2 T_m + T_m^2) = \delta (b_1 + b_2 T_m + T_m^2)$$

Последовательно применяя  $F_3$ ,  $F_1$  и  $F_5$ , окончательно получим:

$$\delta \tau = \frac{2480 \cdot T_m \delta (T_m) + T_m^2 [2\delta (T_m) + \delta^2 (T_m)]}{1240^2 + 2480 T_m + T_m^2}.$$

Анализ показывает, что в интервале  $T_m = 3000 \dots 8000$  ч/год исходная погрешность в оценке  $\delta T_m = 10\%$  приводит к погрешности  $\delta \tau \approx 22\%$ . 10%-ная погрешность  $\delta T_m$  при аналогичной погрешности в оценке расчетных нагрузок предприятия ( $\delta P_m, \delta Q_m$ ) приводит к погрешности в оценке стоимости электроэнергии  $\delta C_s \approx 25 \dots 30\%$ .

Далее, используя полученные частные выражения типа (2.5), выражающие чувствительности в относительном виде, в соответствии с алгоритмом вычисления критерия эффективности варианта СЭС — функции приведенных затрат  $Z_n = F(T_m, C_s, \{\Pi_i\})$ , методом статических испытаний получим оценки чувствительности вида:

$$\delta Z_n = F(\delta \Pi_i, \Pi_i), \Pi_i \in \Pi, i = \overline{1, K},$$

где  $\Pi_i$  — параметры всех  $K$  элементов, входящих в СЭС.

В частности, такое моделирование чувствительности показало, что даже при требовании 10 %-ной инженерной точности ко всем исходным данным, необходимым для вычисления функции затрат, ее погрешности могут достигать 50 % и более, что делает бессмысленными использование методов параметрической оптимизации в САПР электроснабжения. В то же время такой анализ служит убедительным доказательством необходимости включения в САПР электроснабжения подсистемы АСНИ, задачей которой является своевременная корректировка БНД САПР (в части характеристик электропотребления предприятий [25]) по результатам экспериментов (см. рис. 1.9)

### Постановка и подходы к решению задач синтеза

К задачам параметрического синтеза относятся задачи, связанные с определением требований к параметрам объекта, номинальных значений этих параметров и их допусков. Классификация этих задач приведена на рис. 2.18. Практически все задачи при проектировании СЭС сводятся к решению задач математического программирования [1, 2].

Процедуры структурного синтеза (СС) относятся к наиболее трудноформализуемым. В то же время дальнейшее повышение уровня автоматизации в САПР зависит от успехов в разработке методов и алгоритмов структурного синтеза.

В зависимости от стадии проектирования различают процедуры: выбора основных физических принципов действия объекта; выборы технического решения в рамках заданных принципов функционирования;

оформления технической документации.

Для САПР электроснабжения характерными являются процедуры двух последних типов.

Формализацию процедур СС на каждом иерархическом уровне выполняют на основе одного из основных подходов: перебора вариан-

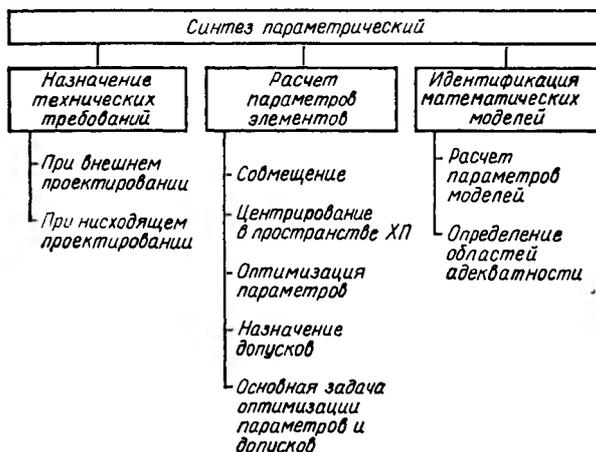


Рис. 2.18. Классификация задач параметрической оптимизации.

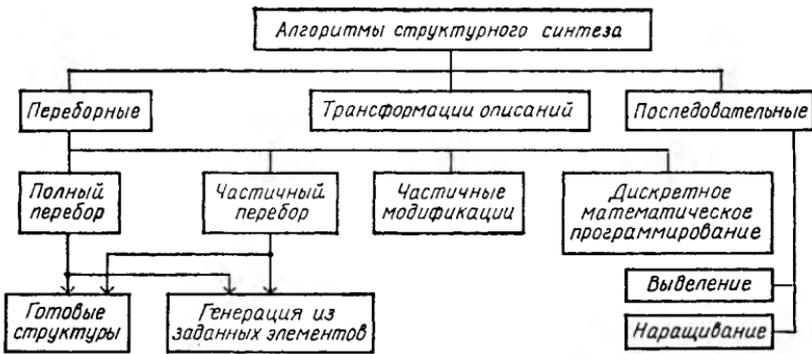


Рис. 2.19. Классификация алгоритмов структурного синтеза.

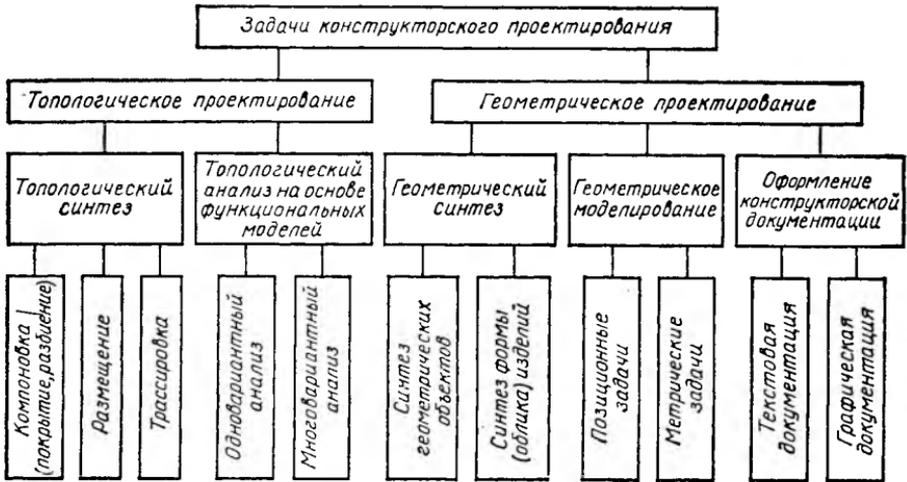


Рис. 2.20. Задачи конструкторского проектирования.

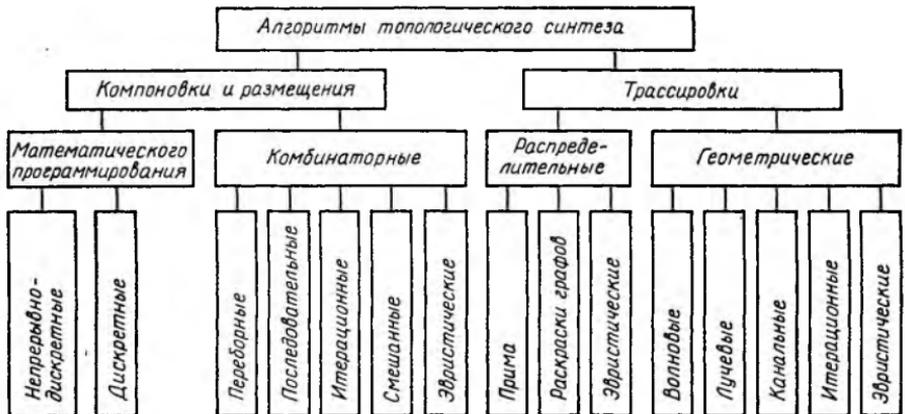


Рис. 2.21. Классификация алгоритмов топологического синтеза.

тов; последовательного синтеза; трансформации описаний различных аспектов.

Классификация алгоритмов структурного синтеза приведена на рис. 2.19.

Для задач первых двух уровней сложности можно использовать алгоритмы перебора, основанные на выборе варианта из числа накопленных в базе данных (например, сгруппированных по мощности предприятий), с последующей оценкой варианта и принятием проектного решения. Для задач третьего уровня сложности затруднительно, а четвертого — невозможно построение множества законченных структур, хранимых в БД. Поэтому в базе данных хранятся описания типовых элементов (так как число элементов обычно меньше числа структур, которые можно построить из этих элементов, что справедливо и для СЭС). Автоматизация синтеза сводится к разработке эффективных алгоритмов генерирования альтернативных структур, которые далее оцениваются, а по результатам оценки принимается проектное решение.

Особое место в переборных алгоритмах занимают алгоритмы дискретного математического программирования.

Последовательные алгоритмы заключаются в поэтапном наращивании (или выделении) промежуточных структур и вычислении для них оценок эффективности. Алгоритм трансформации описаний разных аспектов действует, например на основе установления соответствия между функцией элементов и структурой объекта.

С решением задач синтеза приходится сталкиваться и при решении задач конструкторского проектирования, целью которых является физическая реализация принципиальных схем, полученных на этапе функционального проектирования. При этом выполняется конструирование отдельных узлов и блоков (панели, шкафы НКУ), компоновка узлов из установочных элементов (автоматы, пускатели), трассировка межблочных соединений.

Различают также задачи геометрического и топологического проектирования (рис. 2.20). Геометрическое проектирование включает задачи геометрического моделирования и синтеза, а также оформление конструкторской документации.

Задачами топологического проектирования являются процедуры компоновки, размещения и трассировки [33].

Алгоритмы топологического синтеза (рис. 2.21) делят на следующие:

алгоритмы компоновки и размещения, построенные на основе методов дискретного (ветвей и границ, Гилмора, случайного поиска) и непрерывно-дискретного математического программирования, а также использующие комбинаторные методы;

алгоритмы трассировки (распределительные и геометрические), использующие, например, нахождение оптимального пути при прокладке КЛ методом динамического программирования или же алгоритмы решения транспортной задачи.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Основу программного обеспечения САПР составляют программные комплексы, построенные из программных модулей, взаимодействующих с массивами разнотипных данных. Программные комплексы имеют свой «жизненный цикл», включающий все этапы развития — от возникновения потребности в программе определенного назначения до прекращения ее использования из-за морального старения или потери необходимости решения соответствующей задачи [17].

Для использования в ПП разрабатывают программы с большой длительностью эксплуатации, которые тиражируются, оформляются документально и является отчуждаемым программным продуктом.

В настоящее время быстро меняются возможности средств вычислительной техники, языков программирования, численных математических методов решения задач. В области электроснабжения появляются новые виды электроустановок (например, тиристорные источники реактивной мощности, информационно-измерительные и управляющие комплексы [25], новые схемные и конструктивные решения. Происходит осмысление и ревизия устаревших эмпирических подходов к проектированию и методов решения отдельных задач. Например, появление маслонаполненных кабелей высокого напряжения потребовало принципиально нового подхода к моделированию тепловых процессов в этих элементах электрической сети, в результате чего возникла необходимость использования достаточно сложного аппарата — метода конечных элементов, т. е. происходят процессы, сокращающие длительность эксплуатации программ из-за морального старения математических методов.

В этих условиях разработка оригинального программного обеспечения, подкрепляемая столь же быстрым развитием языков программирования высокого уровня, выполняется в основном пользователем. По крайней мере, этап алгоритмизации и составления описания алгоритма в одной из принятых форм пользователь обязан уметь делать, если он хочет быть правильно понятым программистом, тем более он обязан это сделать при использовании ПЭВМ, его повседневного рабочего инструмента.

Поскольку САПР ЭС фактически находится в стадии разработки и методологические основы их построения лишь формируются — взаимопонимание пользователя и разработчиков САПР на основе единого понимания принципов и методов алгоритмизации и программирования позволит избежать ряда просчетов и снизить стоимость разработки программного обеспечения.

На рис. 3.1 показана зависимость уровня используемого языка от сложности ЭВМ. Не менее важно знание пользователем техноло-

Рис. 3.1. Сложность применения ЭВМ с позиций пользователя при программировании на языках высокого уровня.



гии программирования и ее сложности для правильной оценки им затрат труда и времени программиста, т. е. чтобы пользователь имел представление о сроках выполнения его заказа.

### 3.1. АЛГОРИТМ, ЕГО ОПИСАНИЕ И ЭТАПНОСТЬ РАЗРАБОТКИ

Решение любой задачи с помощью ЭВМ требует выполнения следующих действий: анализа задачи и ее постановки; формализации задачи; выбора численного метода решения; алгоритмизации задачи; программирования; поиска и устранения ошибок; тестирования и решения контрольных задач; документации; решения задачи.

Рассмотрим этап алгоритмизации. Под алгоритмом будем понимать точное предписание, задающее вычислительный процесс, начинающийся с некоторого набора данных (из совокупности данных, возможных для используемого метода и алгоритма) и направленный на получение результата, полностью и однозначно определяемого этими данными.

Известны следующие эмпирические свойства алгоритмов:

дискретность — возможность разбиения любого алгоритма на этапы, каждый из которых позволяет выявить новую систему величин из исходной системы, полученной на предыдущем этапе;

детерминированность (определенность) — выходные данные любого этапа алгоритмизации однозначно определены системой входных данных этого этапа;

массовость — пригодность алгоритма для решения всех задач заданного класса;

результативность — возможность получения искомого результата за конечное число шагов (либо выдача сигнала о неприменимости данного алгоритма к имеющимся исходным данным).

Алгоритмы могут быть описаны в терминах естественного языка и терминах алгоритмических языков, а также графически (прил. 1). При этом необходимо учитывать следующее: для конкретного алгоритма должна быть задана совокупность преобразуемых величин; обработка алгоритма происходит в виде рабочих циклов, содержание каждого из которых применяют к преобразуемым величинам одного правила из их заданной совокупности; алгоритм должен обеспечивать практический результат за конечное число циклов; описание алгоритма должно быть полным и законченным; систему допустимых преобразований (операций) и язык, на котором формулируются правила.

Таким образом, алгоритм — это детерминированная конечная последовательность правил, применяемых к описанной совокупности преобразуемых величин, позволяющая получить практический результат решения задач одного класса за конечное число циклов.

Сложные алгоритмы удобно представлять в виде граф-схем — ориентированных связанных графов, содержащих одну начальную, одну конечную и произвольное множество логических (условных) и функциональных (операторных) вершин. Все вершины граф-схемы, за исключением начальной, имеют по одному входу. Начальная и операторные вершины имеют по одному выходу, а условная — два; конечная вершина выхода не имеет.

Граф-схемы алгоритмов должны удовлетворять таким условиям:

входы и выходы вершин соединяются с помощью дуг, направленных от выхода  $i$ -й вершины ко входу  $i$ -й вершины;

каждый выход точно соединен с одним входом;

каждый вход соединен по меньшей мере с одним выходом;

любая вершина графа лежит по крайней мере на одном из путей от начальной вершины к конечной;

в каждой условной вершине записывается один из элементов множества  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , называемого множеством логических условий, причем допускается запись одинаковых элементов  $x_i$  в различных условиях вершин;

в каждой операторной вершине записывается оператор  $y_i$  — подмножество множества  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , называемого множеством микроопераций.

Допускается определенное изображение дуг, входящих в вершины (рис. 3.2), поскольку при их большом числе теряется наглядность графического изображения алгоритма.

Для решения заданной задачи на ЭВМ составленный алгоритм следует представить в понятном для машины виде, т. е. записать его в виде программы.

Программа — это рабочая инструкция для решения задач установленного класса с помощью ЭВМ, представляющая собой подробное описание алгоритма на языке программирования.

При разработке систем программ различают разрабатываемый предмет и метод его разработки. Взаимосвязи их проявляются в том,

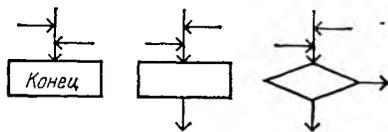


Рис. 3.2. Допустимые изображения вершин в граф-схемах алгоритмов.

Таблица 3.1. Этапы разработки программного обеспечения

<i>Документирование</i>			
<i>Спецификация</i>	<i>Разработка</i>	<i>Программирование</i>	<i>Проверка</i>
<i>Уточнение постановки задачи</i>	<i>Разработка и описание алгоритма</i>	<i>Разработка программы</i>	<i>Контроль синтаксиса и семантики</i>
		<i>Поддержка со стороны проблемно независимого программного обеспечения</i>	
<i>Требуемая методическая поддержка (методики проектирования, конструирования, технологической подготовки)</i>			

что каждая система программ реализуется при определенных технологических условиях, а технология разработки программ эффективна только при определенной структуре программ.

Этапы разработки программного обеспечения представлены в табл. 3.1.

Анализ задачи (специфицирование) уточняет постановку задачи, т. е. пользователем определяются функции разрабатываемой программы. Этот этап очень важен, поскольку из-за неполной информации, противоречия или ошибок при специфицировании могут возникнуть ошибки понятий, что связано с большими затратами на корректировку и изменения. Примерно 30..50 % ошибок, проявляющихся на всех этапах, связано с неточностью в спецификации [7].

Спецификация предназначена для четкого представления предмета и методов разработки. Основными функциями ее являются:

- представление содержания входной и выходной информации: логических связей и точности данных, о режиме времени, носителях данных; описание операций на множествах входной, промежуточной и выходной информации;

- поиск и оценка характеристик ошибок (идентификация, локализация, классификация и корректура ошибочных состояний);

- выбор базовой машины;

- выбор режима (например, пакетная обработка, режим диалога);
- проверка программ по результатам практического использования.

Поскольку разработка программного обеспечения — это итеративный процесс, нельзя исключать корректуру и уточнение спецификаций в последующих рабочих этапах.

Разработка алгоритма включает собственно разработку и описание алгоритма без учета языка программирования и типа ЭВМ. Этап разработки возможен при использовании определенных методов, поскольку должны быть обеспечены четкость, полнота информации, отсутствие противоречий.

Целью систематической разработки программ, в частности, при реализации интерактивного режима, когда проектировщик постоянно связан с разработкой программы, является обеспечение эквивалентности структуры алгоритмов со структурой задачи. Для разработки алгоритмов важно выделить стандартизированные модули алгоритмов (соответствующие модулям проектирования) и правила их связи, чтобы алгоритмически отобразить любые структуры задач.

Реализация разработанного алгоритма или его части заключается в его представлении в виде программы или подпрограммы для базовой машины.

Следующими этапами разработки программного обеспечения являются проверка и документирование.

На этапе проверки осуществляется отладка программы (распознавание и устранение ошибок) и автоматический синтаксический контроль. Применяя методы структурного программирования возможно автоматизировать процесс отладки и тестирования программ за счет соответствия структуры программы структуре решаемой задачи.

Целью документирования является следующее [12]:

разъяснение пользователю назначения программы, ее действий, ограничений, какой тип исходных данных следует подготовить и какие результаты выдаются;

информирование операторов ЭВМ о том, как выполнять программу, определить конфигурацию вычислительной установки, оперативную память, ленты, магнитные диски и допустимость вмешательства оператора при счете задачи;

обнаружение ошибок, проявляющихся на этапе эксплуатации программы, и обеспечение возможности расширения программы.

### 3.2. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Степень трудоемкости тестирования и отладки программ возрастает приблизительно как квадратичная функция от числа команд, которые составляют программу [9]. В то же время с ростом числа команд в программах падает производительность труда программистов (рис. 3.3), поскольку приходится одновременно учитывать все большее число взаимовлияющих условий и параметров.

В любой программе практически все операторы являются взаимосвязанными (см. определение граф-схемы алгоритма) и, следовательно, новые ошибки могут проявляться без каких бы то ни было изменений в самой программе только из-за непредусмотренной комбинации исходных данных. Любые изменения в спецификациях (а они неизбежны) могут привести к появлению новых типов ошибок, особенно в сложных программах. Поэтому основной задачей при разработке программы является ее разбиение на меньшие части (сегменты), которые проще тестировать и отлаживать, а также минимизация числа взаимосвязей между сегментами. При этом преследуются следующие цели: минимизация памяти; минимизация времени работы; минимизация

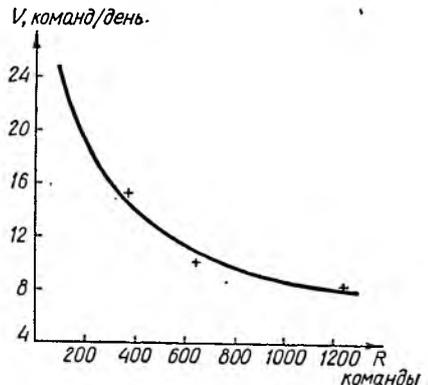


Рис. 3.3. Изменение производительности труда программиста в зависимости от размеров программы.

времени разработки и внедрения; простота изменений программы при изменениях в постановке задачи; минимизация времени на обслуживание составленной программы. Разработку программ можно рассматривать как декомпозицию разрабатываемого программного обеспечения на блоки и модули программ и организацию их взаимодействия при условии выполнения следующих этапов: определения структуры данных; определения структуры системы программ; выделения мест сопряжения между программами и программными модулями; выделения потока управления и потока данных; координации данных.

При этом принципы и методы разработки программного обеспечения рассматриваются с позиций: разработки оптимальной структуры программ и программной системы; оптимизации последовательности решений, принимаемых в процессе разработки программного обеспечения.

Под программным модулем будем понимать логически завершённую совокупность множества данных и множества допустимых операций над этими данными, программная реализация которой способна к самостоятельной независимой работе и порождает множество выходных данных, доступное анализу и оценке, т. е. не каждый произвольный фрагмент программы является модулем, но каждая законченная программа или подпрограмма, решающая некоторую задачу может интерпретироваться как модуль.

Сложность проектирования СЭС требует разработки большого числа модулей, взаимодействующих по определенным правилам и в определенной последовательности, при этом возникает проблема связи модулей или мест сопряжения.

Под местом сопряжения двух модулей будем понимать множество указаний относительно данных этих модулей и операций над ними, обеспечивающее идентичность данных выход — вход и последовательную работу модулей.

### **3.3. СТРАТЕГИЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Для эффективной разработки больших программных систем необходима определенная стратегия действий, позволяющая получать программный продукт в указанные сроки и с минимальными затратами. Существует ряд методов, определяющих стратегию программирования.

Метод сверху — вниз заключается в последовательной конкретизации решений и формулировке описания элементарных блоков без раскрытия их содержания. При этом получается последовательность принимаемых проектных решений, конкретизируемая на каждом шаге таким образом, чтобы функции предыдущего шага сделать более простыми и доступными для решения.

Метод снизу — вверх представляет собой как бы зеркальное отражение предыдущего метода, причем из элементарных операций агрегируются комплексные операции.

Практически разработка программного обеспечения реализуется итеративным путем на основе обоих методов, однако метод сверху —

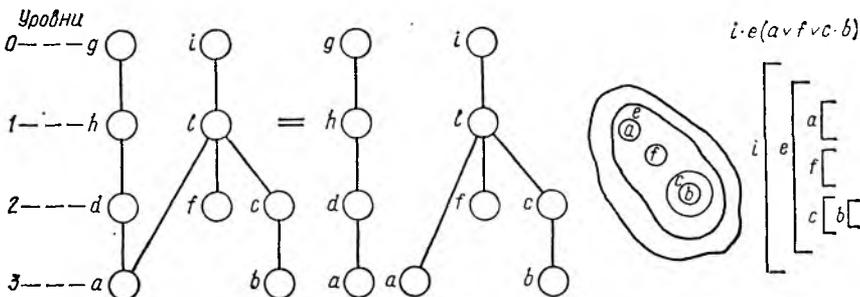


Рис. 3.4. Определение иерархической структуры и формы ее представления.

вниз имеет то преимущество, что сохраняет адекватность структуры программ структуре задач.

Метод структурной разработки основан на декомпозиции ПП на отдельные части, между которыми существуют связи, образующие древовидную структуру. Благодаря этому достигается высокая степень наглядности алгоритмов, а следовательно и возможность простого и быстрого контроля и отладки программных модулей. Например, в зависимости от конкретного набора операций возникают различные структуры, определяемые функционально ориентированным или конструктивно ориентированным подходом.

Программный комплекс, как и любую систему, можно описать в виде

$$S = (E, R),$$

где  $E$  — множество элементов (операторов, сегментов, модулей), а  $R$  — множество отношений на множестве  $E$  (прил. 4).

Получаемая структура является иерархической, если вершинам некоторого направленного графа без циклов соответствуют части программной системы, а дугам — связи между ними (рис. 3.4, а).

Структура системы определяется как отношение на множестве элементов и является иерархической, если можно установить следующие уровни:

0 — содержит множество вершин  $y$ , для которых не существует вершин  $x$  с отношением  $R(x, y)$ ;

$i$  — включает множество вершин  $y$ , для которых существует по крайней мере одна вершина  $x$  на уровне  $i - 1$  с отношением  $R(x, y)$ ;

$(i - 1)$  — объединяет все вершины  $x$ , для которых на уровне  $i$  имеется хотя бы одна вершина  $y$  с отношением  $R(x, y)$ .

Для древовидной структуры характерны следующие дополнительные условия: существует только одна вершина  $y$  уровня 0, называемая корнем дерева; для каждой вершины  $y$  на уровне  $i \neq 0$  существует только одна вершина  $x$  на уровне  $i - 1$ , для которой справедливо  $R(x, y)$ .

Из исходной структуры, приведенной на рис. 3.4, а, можно образовать два дерева:

дерево линейной структуры —  $g, h, d, a$ ;

дерево —  $i, l, a$ ;  $i, l, f$ ;  $i, l, c, b$ .

Из рис. 3.4, б следует, что существуют различные равноценные формы наглядного представления структур, однако представление в виде графов все же более наглядно.

Таким образом, метод структурной разработки представляет собой интерпретацию метода сверху — вниз при четком структурировании проблемы, позволяющем отобразить внешнюю функцию программного обеспечения.

Метод информационно ориентированной разработки базируется на основе подразделения рассматриваемого множества данных на дизъюнктивные и неявные подмножества с помощью математического аппарата теории множеств (прил. 2). Целью является разработка программ, структура которых по возможности точно отображала бы структуру данных. Структура программы строится таким образом, чтобы множество входных данных являлось отображением на множество выходных данных.

Стратегия разработки программного обеспечения заключается в целесообразном использовании всех рассмотренных методов при условии основной роли структурного программирования. На непосредственную разработку полностью структурированной программы требуется затратить больше усилий, чем при любом другом подходе [12], однако затраты быстро окупаются, поскольку структурированные программы легко читаются, документируются и корректируются. Достигается это в результате того, что общая структура управления в таких программах описывается графом типа дерево, а не сетью со многими циклами.

### 3.4. СТРУКТУРНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

Под структурным программированием сверху — вниз понимают процесс программирования сверху — вниз, ограниченный использованием структурных схем. Цель метода состоит в повышении наглядности программ, снижении числа ошибок и сокращении расходов на коррекцию и эксплуатацию программ.

Одновременно достигается взаимное соответствие статической и динамической программных структур.

Для достижения цели основываются на следующих принципах:

подстановки (в математическом смысле), требующем формирования программы только в виде последовательных или вложенных блоков, имеющих только один вход и один выход. Подобные программы называют регулярными, а пример структурированной схемы с глубиной вложения три приведен на рис. 3.5;

линейности, при котором строго последовательно располагаются

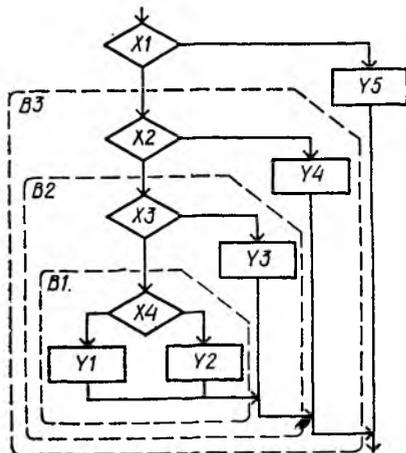


Рис. 3.5. Пример структурированной блок-схемы с глубиной включения три.

Значение	Логическая структура	В символах БСП	В структурограмме
Цепочка, последовательность инструкций			
Разветвление (альтернатива)			
Цикл с контролем в начале (делительный цикл)			
Цикл с контролем в конце (недели-тельный цикл)			
Множественное ветвление, выбор			

Рис. 3.6. Структурные модули для описания блок-схем алгоритмов.

команды и указания в блоках, что позволяет во многих случаях избежать команд условного перехода из блока в блок;

рекурсивности, основанном на методе определения или выражения функции, процедуры, языковой конструкции или решения задачи посредством той же функции, процедуры и т. д. В структурном программировании принцип рекурсивности выражается в том, что линейная комбинация последовательных или вложенных блоков с одним входом и одним выходом рассматривается как блок; причем до его конкретизации он может рассматриваться как черный ящик.

Доказано, что любую программу можно преобразовать таким образом, что для описания процесса достаточно трех основных видов элементарных модулей или структурных блоков: цепочки — последовательного расположения указаний или функциональных модулей; разветвления (альтернативы) на основе логического условия; цикла с контролем в начале. Для программ, построенных на основе этих структур принципиально может быть доказана точность их работы. При реализации структурного программирования обычно дополни-

тельно вводят структуры: цикла с контролем в конце; многократного ветвления, или выбора.

На рис. 3.6 приведены структурные модули, их функции и представления в обозначениях блок-схем алгоритмов программ (БСП) и структурограмм. Можно определить еще два дополнительных блока: контроля ошибок, завершающих работу основного программного модуля; обращения, реализующего связь между управляющей программой верхнего уровня и данным программным модулем.

### 3.5. СРЕДСТВА ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММ

К методам документирования предъявляют следующие требования: наглядность и простоту запоминания; четкость и наглядность представления алгоритмических модулей; формы записи должны способствовать контролю полноты информации и выявлению противоречий; средства документирования должны быть независимыми от конкретной используемой машины.

Средствами документирования могут быть формальные языки и графические описания. При документировании следует приводить как традиционные средства записи — блок-схемы алгоритмов программ и схемы потоков данных, так и вспомогательные средства — структурограммы и примененные таблицы решений.

Существует ряд специальных задач, которые должны выполняться ЭВМ, в том числе и планирование потока данных: сбор, обработка и оценка данных с установлением требуемых типов оборудования и носителей информации.

Схема потока данных (СПД) — это описательное графическое представление организации систем информационной обработки. СПД состоит из символов, предназначенных для описания функций и видов деятельности (ввод — вывод, тип носителя данных, вид оборудования), и линий связи, указывающих направления потока данных.

В прил. 2 представлены наиболее важные символы в СПД, а на рис. 3.7 показан пример подобной схемы.

СПД читаются сверху вниз и дополняются поясняющим текстом. Последовательность видов деятельности или подключаемых типов оборудования определяется направлением линий потока данных. Совместно с блок-схемой алгоритма СПД образует тот необходимый минимум информации, который требуется для разработки конкретной программы.

Сложность задачи иногда обуславливает разработку блок-схемы алгоритма в два этапа:

в виде укрупненной блок-схемы, отражающей наиболее важные шаги алгоритма в агрегированном виде. Операции и поток данных частично представлены в виде словесного описания;

в виде набора подобных блок-схем отдельных блоков, позволяющих давать описания операций и потока данных на проблемно-ориентированном языке.

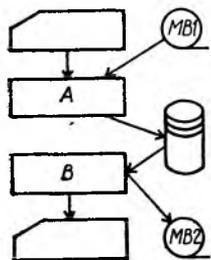
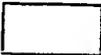
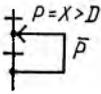
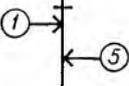


Рис. 3.7. Пример схемы потока данных.

Таблица 3.2. Условные обозначения для описания схем алгоритмов

Метод черного ящика	Условное обозначение	Описание
Обработка (операция)		Общее представление обработки, операции или группы операций
Ветвление		Разветвление процесса обработки по результатам сравнения
Линия потока		Связь условных изображений в соответствии с ходом программы
Связка		Переход к другому месту алгоритма
Метод ведущей линии	Представление	Пояснение
Обработка (операция)		Соответствие операций (указаний) программной линии
Ветвление		Ветвление программных линий вправо (влево)
Скачок (связка)		Знак-связка для восстановления прерванной программной линии

Блок-схема программы должна обеспечивать обозримое, наглядное представление полного и окончательного описания задачи при незначительных затратах труда на ее разработку.

При описании блок-схем алгоритмов используют методы черного ящика и ведущей линии, причем последний отвечает требованиям наглядности и менее трудоемок. Сущность методов и их сравнительная оценка представлены в табл. 3.2. Чтение блок-схем алгоритмов производится сверху вниз, а полнота описания гарантируется связностью: любую точку блок-схемы от входа до выхода можно обнаружить хотя бы на одном пути.

Структурограмма является дополнительным средством описания алгоритма, наиболее четко отражающим особенности структурного подхода к разработке программ. Например, при помощи блок-схем могут быть описаны и неструктурированные программы. Структурограммы состоят из плоских графических символов, которые вкладываются друг в друга и следуют один за другим в соответствии с понятием блока (рис. 3.6).

Существуют также иерархические методы документирования, известные в литературе как НИРО — техника, использующие специальные диаграммы, в основном для описания процессов ввода, вывода и сопряжения модулей:

иерархические диаграммы, описывающие функциональную иерархию разрабатываемой программы;

информационно-обзорные диаграммы для описания входа, выхода и обработки каждой функции иерархической диаграммы; подобные диаграммы, содержащие описание ввода, обработки и вывода для каждой функции обзорной диаграммы.

Эти методы, как формы документирования, в первую очередь ориентированы на описание потоков данных, а не потоков управления.

### Техника таблиц решений

Таблицы решений (ТР) как одна из форм изображения алгоритмов возникновения при программировании коммерческих задач завоевывают все большую популярность [8].

ТР реализует логическую функцию импликации (ЕСЛИ  $\rightarrow$   $\rightarrow$  ТО) и дает наглядное представление правил решения, которые указывают какое условие (или комбинация условий) должно быть выполнено для решения определенного действия или их комбинации. ТР дает возможность систематически проверять каждую комбинацию условий так, чтобы не пропустить ни одну из них.

Таблицей решения с простыми (ограниченными) входами называется табличное упорядочение правил решений в форме, представленной в табл. 3.3. Входы таблицы  $b_{ij}$  могут иметь значения 1 (да), 0 (нет) или «—» (несущественно). Правый верхний квадрат называется матрицей условий, а правый нижний — указателем действий. Известно, что для ТР, содержащей  $n$  условий, существует  $S = 2^n$  ситуаций, а для чисел  $m$ ,  $n$  и  $k$  справедливы соотношения:

$$1 \leq m \leq 2^n, n \geq 0, k \geq 1. \quad (3.1)$$

В табл. 3.4 приведена ТР для выбора электротехнического оборудования по двум параметрам — номинальному напряжению и току. Данные таблицы показывают, что связь условий в матрице интерпретируется по столбцам как логическая функция И, в то время, как связь

Таблица 3.3. Общая структура ТР

ТР1	Правило				
	1	2	...	m	
Условия	1	$b_{11}$	$b_{12}$	...	$b_{1m}$
	2	$b_{21}$	$b_{22}$	...	$b_{2m}$
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	n	$b_{n1}$	$b_{n2}$	...	$b_{nm}$
Действия	1	x			
	2	x	x		x
	⋮				
	⋮				
	k				x

Таблица 3.4. Принцип построения простых ТР

Условие	Правила решения					
$U_n = 500В$	1	1	1	0	0	0
$U_n = 660В$	0	0	0	1	1	1
$I_n = 16А$	1	0	0	1	0	0
$I_n = 25А$	0	1	0	0	1	0
$I_n = 40А$	0	0	1	0	0	1
A1	x			x	x	x
A2		x		x		
A3	x		x		x	
A4		x				x
A5			x			
Действие	Указатель действий					

правил решения интерпретируется по строкам в смысле логического ИЛИ. Связь правил решения с действиями соответствует логической импликации ЕСЛИ  $\rightarrow$  ТО.

Предположим, задана ситуация  $S (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)$ , где  $\epsilon_i$  могут быть 1 или 0. Если ТР без условий, то ей соответствует единственное первое решение. Если же  $n \neq 0$  (т. е. ТР — с условиями), то текущая ситуация сравнивается с элементами (1 или 0) первого правила  $R1$ . При совпадении  $S = R1$  выполняются действия, отмеченные знаком «X» в указателе действий (например, действия  $A1$  и  $A3$ , табл. 3.4) и таблица покидается программой. При несовпадении последовательно сравнивается  $S$  с  $R2$ ,  $R3$  и так далее.

Между правилами ТР могут существовать связи, которые можно использовать для синтаксического контроля таблиц. В частности для ТР с простыми входами характерно следующее.

*Полнота* — ТР называется формально полной, если каждая из двух возможных комбинаций условий подтверждена одним правилом решения; логически полной называется ТР, в которой всем логически верным правилам подчинено действие или последовательность действий. Для большинства практических задач формальная полнота не является необходимой. Всякая формально полная ТР является и логически полной.

*Противоречивость* — ТР называется противоречивой, если существуют два (или больше) идентичных правила, которые требуют различных действий. ТР также противоречива в случае использования нейтральных указателей («—»), если содержится в правиле по крайней мере одно элементарное правило (1 или 0), но ситуации соответствует более одного действия или последовательности.

*Нейтральность* — ТР называется ТР с нейтральным условием, если двум правилам, совпадающим до строки  $i$ -го условия, содержащего оба указателя (1 и 0), отвечают одинаковые действия. Это означает, что условие  $i$  безразлично к выполнению действия и его можно заменить нейтральным указателем «—». Но тогда оба правила полностью идентичны в части условий, указателей и действий и, следовательно, ТР можно сократить на один столбец.

*Избыточность* — ТР является избыточной, если два правила полностью совпадают как в части условий, так и в части указателей действий. Избыточными являются также ТР, которые при наличии нейтральных указателей в условиях и одинаковых действиях содержат хотя бы одно элементарное правило, т. е. правило без «—».

*Правило ИНАЧЕ* — в случае, если из общего числа возможных ситуаций лишь незначительное число ведет к правильным действиям, нет смысла записывать в полном виде всю ТР. Выписывают только правила, отвечающие верным значениям, а справа записывают указание ИНАЧЕ  $\rightarrow$  СПЕЦИАЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ. Таким действием может быть выдача сигнала ОШИБКА или переход к другому блоку программы для выполнения других операций. Благодаря правилу ИНАЧЕ таблицы решений можно достаточно просто изменять и модифицировать.

Существуют также расширенные ТР (или ТР с расширенными входами), в которых вместо указателей условий (0 или 1) в правилах

Таблица 3.5. Принцип построения расширенной ТР

$U_n$	500	500	500	660	660	660	
$I_n$	16	25	40	16	25	40	
A1	×			×	×	×	
A2		×		×			
A3	×		×		×		
A4		×				×	
A5			×				

решений записываются значения некоторых параметров. Например, в правилах ТР записаны параметры оборудования в виде номинальных значений напряжений и тока (табл. 3.5).

Таблицы, в которых одновременно существуют простые и расширенные входы, называются смешанными ТР. Таблица, содержащая только элементарные правила, называется ТР канонической нормальной формы.

Эти таблицы содержат всегда максимальное число правил решения.

Общепринятой единой методики составления ТР для задач любого плана не существует, однако учитывая опыт можно выделить отдельные этапы, не зависящие от цели и области применения ТР. Представленную методику (рис. 3.8) в каждом конкретном случае необходимо уточнять в зависимости от постановки задачи.

Несколько логически связанных ТР образуют комбинацию. Необходимость комбинирования вытекает из тех соображений, что с увеличением числа условий число ситуаций растет по закону  $2^n$  и, несмотря на неявное представление многих комбинаций (например, используя ИНАЧЕ), теряется наглядность ТР. Поэтому целесообразно в рамках общей решаемой задачи выделить несколько малых ТР, связь между которыми осуществляется с помощью указаний и команд. Как представлено на

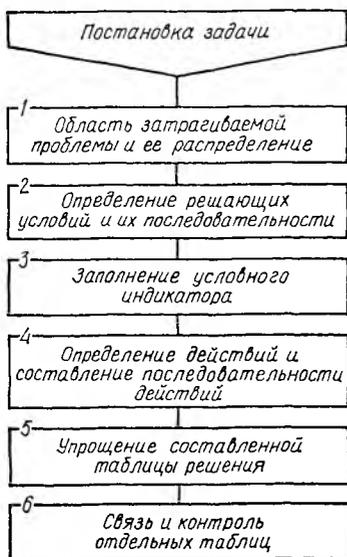


Рис. 3.8. Этапы методики для разработки таблиц решений.

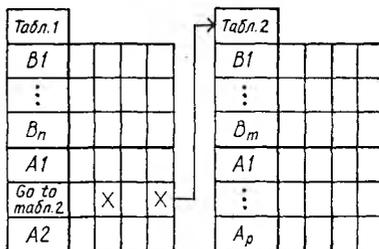


Рис. 3.9. Последовательная связь ТР.

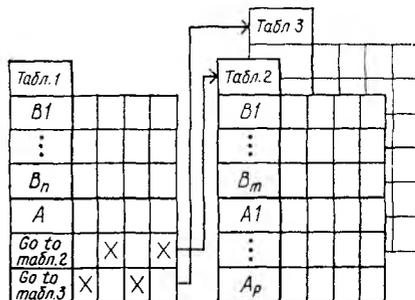


Рис. 3.10. Разветвление ТР.

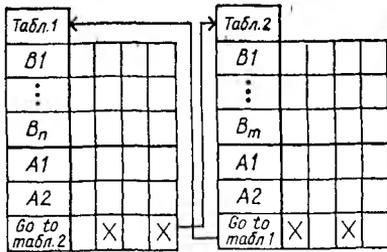


Рис. 3.11. Циклические связи ТР.

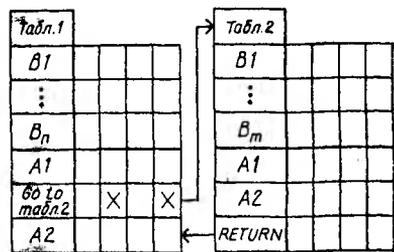


Рис. 3.12. Чередующиеся ТР.

рис. 3.9—3.12, различают четыре вида связей ТР: последовательную (рис. 3.9); разветвление (рис. 3.10); циклическую (рис. 3.11); чередующуюся (рис. 3.12).

При последовательной связи каждое правило таблицы 1 в качестве последнего действия содержит указание на переход к таблице 2.

При разветвлении ТР каждое правило 1-й таблицы содержит указание на переход к одной из других таблиц.

Циклическая связь организуется при появлении обратной связи от второй ТР к первой, но во избежание заикливания, по крайней мере, одно из правил любой таблицы должно содержать указание на выход из цикла.

Чередующаяся связь образуется в случае, когда вторая ТР не иницируется последним указателем действия первой ТР, а обрабатывается и своим указателем действия возвращается к последующим действиям таблицы 1. Из-за такой формы связи сложно построить любое число уровней обращения к ТР и упорядочить их иерархически.

По виду связи различают открытые и замкнутые ТР. Пример замкнутой ТР показан на рис. 3.12, все остальные ТР из рассмотренных являются открытыми.

При размерности ТР более 30 условий теряется их наглядность и усложняется контроль. Поэтому желательно представлять общую задачу в виде комбинации ТР, разделяя ее на основе логической декомпозиции обрабатываемых данных. Это становится тем более важным, что для одной ТР может быть построено значительное число эквивалентных ей, формально полных и четких блок-схем алгоритмов. Причина этого заключается в следующем: для каждой блок-схемы делается некоторое предположение о порядке следования условий, в то время как для ТР такого предположения не делается. Поэтому вопрос о том, получится ли требуемая блок-схема наилучшей, полностью зависит от разработчика.

Методуку разделения ТР [8] рассмотрим на следующем примере. Анализ некоторой задачи показал, что пять действий ( $A1...A5$ ) и конечная программа зависят от шести условий ( $B1...B6$ ), кроме того известно: если выполняются  $B2$  и  $B6$  и не выполняется  $B4$ , то следует действие  $A1$ ; при невыполняющихся  $B2$  и  $B6$  следует  $A5$ ; при выполнении  $B1$  и невыполнении  $B3$  переходим к  $A2$ ; если  $B3$  не выполняется, реализуется  $A3$ , если не выполняется  $B5$ , реализуется  $A4$ ; если в некоторой ситуации требуется выполнение некоторых действий, то не должен нарушаться их естественный порядок: выполня-

Таблица 3.6. Исходная таблица к примеру разделения ТР

ТР <sub>и</sub>	A1	A2	A3	A4	A5
B1		1			
B2	1				0
B3		0	0		
B4	0				
B5				0	
B6	1				0

ется ранее  $A_i$  при  $i < j$ ; конечная программа должна выполняться при любой входной ситуации, но всегда после  $A1...A5$  (табл. 3.6). у

Если рассматривать эти таблицу как ТР, то ситуация  $S = (1, 1, 0, 0, 1)$  соответствовало бы только одно действие  $A1$ , в то время как требуются действия  $A1, A2, A3, A4$ . Таблица решений может быть получена из табл. 3.6 путем вписывания всех 64 правил для таблицы с шестью условиями ( $2^6 = 64$ ) и простав-

ления знаков «X» в каждом указателе необходимых действий в требуемой последовательности. После этого, используя вышеизложенные методы, следовало бы попытаться преобразовать полученную ТР к более удобному виду.

Существует более простой метод. Действия  $A1$  и  $A5$  зависят только от условий  $B2, B4$  и  $B6$ , причем эти условия не влияют ни на какие другие действия. Тогда можно записать ТР с этими тремя условиями, а остальные перенести в другую ТР, после чего связать обе таблицы (табл. 3.7).

Представляет интерес указатель действий, представленный в табл. 3.7, а, который первым действием второго правила  $R2$  определяет переход НА ТР2 к выполнению ТР2. После отработки ТР2 и возврата ВОЗВР будет выделено  $A5$ . Проверка правильного описания с помощью ТР1 и ТР2 остальных исходных условий задачи (пп. «а» — «г» и «е») в качестве упражнения представляется читателю. Обращаем внимание также на применение правил ИНАЧЕ (Е) в табл. 3.7, а.

Приведенный пример показывает, что основа метода заключается в логическом исследовании связей условий и действий и выделении таких сочетаний, которые не обнаруживают в исходной таблице никаких логических связей с другими комбинациями условий и действий.

Таблица 3.7. Разделенные ТР по примеру табл. 3.6

ТР1	R1	R2	E	ТР2	R1	R2	R3	R4	R5	R6
B2				B1			1	1	0	0
B4				B3	1	0	0	0	0	0
B6				B5	1	0	1	0	1	0
A1	X			A2			X	X		
НА ТР2	X	X	X	A3			X	X	X	X
A5		X		A4		X		X		X
КОН	X	X	X	ВОЗВР	X	X	X	X	X	X

а

б

Практика использования ТР позволила выделить два основных типа алгоритмов, с помощью которых оказывается возможной обработка ТР на ЭВМ.

Первый подход позволяет построить интерпретатор ТР и называется методом маски (алгоритм Кирка и его модификации). Отметим, что задача должна быть представлена в виде ТР с простыми входами, а ТР с расширенными входами следует преобразовать в простые.

Сущность метода заключается в том, что исходная ТР заменяется двумя двоичными матрицами. Первую двоичную матрицу  $T$  получают из матрицы указателей условий занесением 0 во все места, не содержащие 1. Вторая матрица (матрица масок  $F$ ) содержит 0 вместо нейтральных указателей «—», а все остальные места заполняются 1. При составлении этих матриц используется правило ИНАЧЕ, все входы которого для каждого условия кодируются в исходной ТР с помощью нейтрального указателя «—».

Пусть задана ситуация  $S$ , которую закодируем как матрицу  $T$  и образуем произведение  $F_j S$ . Под  $F_j$  понимается  $j$ -й столбец  $F$ , а операция умножения выполняется покомпонентно по правилам логического умножения

$$\begin{aligned} 1 \cdot 1 &= 1; \\ 1 \cdot 0 &= 0 \cdot 1 = 0 \cdot 0 = 0. \end{aligned} \quad (3.2)$$

В результате получаем, что  $ТР(S) = R_i$  тогда, когда  $i$  является первым индексом, для которого справедливо равенство

$$F_i S = T_i. \quad (3.3)$$

Второй подход к автоматизированной обработке ТР основан на алгоритме Поллака, который в соответствие любой ТР типа  $P$  ставит эквивалентное двоичное дерево решений, легко записываемое на языке программирования. ТР является таблицей типа  $P$  тогда, когда ее правила попарно разбиваются по меньшей мере одним соответствующим указателем условий.

Основу данного алгоритма образует следующая процедура выбора.

Каждому  $j$ -му столбцу соответствует коэффициент столбца

$$K_j = 2^{(r)}, \quad (3.4)$$

где  $r$  — число пробелов в  $j$ -м столбце.

Каждой строке ставится в соответствие пробельное число

$$\beta_m = \sum_{\beta_{im} \leftarrow \leftarrow} K_i, \quad (3.5)$$

причем суммируются все  $K_i$  тех столбцов, которые в данной  $m$ -й строке содержат «—». В случае, если рассматриваемая строка не содержит указателей «—», то  $\beta_{im} = 0$ . Находится строка с наименьшим значением  $\beta_m$  (пусть  $l$  — номер этой строки). Разделяем исходную ТР на ТР1 (при 1) и ТР2 (при 0) и применяем предыдущие расчеты к полученным частным таблицам. В том случае, если не существует минимального пробельного числа  $\beta_{\min}$ , то для строк вычисляется наименьший строчный коэффициент:

$$\gamma_m = \left| \sum_{\beta_{im}=1} K_m - \sum_{\beta_{im}=0} K_m \right|. \quad (3.6)$$

Среди строк с наименьшим  $\beta_{\min}$  сначала проверяются те, которые имеют наибольшие  $\gamma_m$ . Если существует несколько таких строк, то в первую очередь рассматриваются те, которые расположены в таблице выше. Затем по (3.4) — (3.6) продолжается программирование соответствующих частных таблиц.

### Пример разработки программы для задачи выбора кабелей

В данном разделе на конкретных примерах рассмотрены стратегия и методика разработки программного обеспечения. В качестве первого примера выбрана одна из наиболее характерных задач проектирования цехового электроснабжения — выбор силовых кабелей напряжением до 1000 В, питающих электроприемники.

В соответствии с действующей методикой расчетный ток  $I_m$  в проводниках, питающих отдельные электроприемники, определяется по формуле

$$I_m = P_n / (\sqrt{3} U_n \cos \varphi \eta), \quad (3.7)$$

где  $P_n$  — номинальная (паспортная) активная мощность;  $U_n$  — номинальное напряжение;  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности;  $\eta$  — коэффициент полезного действия.

В каталогах и справочниках каждому сечению  $F_l$  кабеля данного типа, в зависимости от нормированных условий его прокладки (в воздухе, в земле, в трубах), поставлены в соответствие величина длительно допустимого тока нагрева  $I_{di}$ , а также погонные активное  $R_0$  и реактивное  $X_0$  сопротивления. Изменение длительно допустимого тока  $I_d$  в зависимости от условий прокладки обычно учитывается введением поправочных коэффициентов (на число кабелей, параллельно прокладываемых по одной трассе  $k_1$ ; на фактическую температуру среды  $k_2$ ) и в качестве допустимого тока принимают

$$I_d = I_{di} k_1 k_2. \quad (3.8)$$

Условием правильного выбора сечения проводника для нормального режима работы является выполнение неравенства

$$I_m \leq I_d. \quad (3.9)$$

Величина  $I_d$  должна определяться для каждого сечения кабеля:  $I_{di} = I_{di}(F_i)$ . Опытный инженер-проектировщик может сразу правильно назвать требуемое сечение по величине расчетного тока нагрузки. Для ЭВМ требуется указать строгую формальную процедуру выбора, которая в данном случае заключается в следующем.

Величина  $I_m$  последовательно сопоставляется с  $I_d(F_i)$ , начиная от минимального сечения, до тех пор, пока не будет выполнено условие (3.9).

Обычно кабель, выбранный по (3.9), проверяют также по допустимой потере напряжения в нормальном режиме работы электроприемника. Рассчитывают потерю напряжения по формуле

$$\Delta U = \sqrt{3} I_m l [R_0(F_i) \cos \varphi + X_0(F_i) \sin \varphi], \quad (3.10)$$

где  $l$  — длина проводника.

Условием правильного выбора будет соблюдение неравенства

$$\Delta U \leq \Delta U_d. \quad (3.11)$$

Очевидно, что если  $\Delta U_i$ , вычисленная для сечения проводника, удовлетворяющего (3.9), не удовлетворит условию (3.11), то необходимо взять следующее по порядку сечение проводника, вычислить для него  $\Delta U_{i+1}$  и снова выполнить проверку (3.11). Эта операция начинается не с первого порядкового номера сечений, а с того, для сечения которого удовлетворяется (3.9). Следовательно, порядковый номер этого сечения требуется запомнить, понимая, что для всех больших сечений это условие тем более будет соблюдено.

Таким образом, приходим к следующим положениям:

предполагается, что для всех типов кабелей сечения расположены в порядке возрастания и имеют порядковую индексацию;

для характеристики кабеля как объекта выбора требуется каждому сечению поставить в соответствие величины:  $I_d(F_i)$ ;  $R_0(F_i)$ ;  $X_0(F_i)$ , причем они должны быть разными (но необязательно) для кабелей различных типов, поскольку  $X_0(F_i)$  может зависеть от конструкции кабеля,  $R_0(F_i)$  — от материала его жил (медь, алюминий),  $I_d(F_i)$  — от особенностей использованных изоляционных материалов и конструкции;

выражения (3.7) — (3.11) справедливы только в том случае, если входящие в них величины соразмерны, т. е. выражены в соответствующих единицах. Например, если  $R_0(F_i)$  заданы в омах на километр, а величина  $l$  в (3.10) — в метрах, то произойдет завышение величины  $\Delta U$  в 1000 раз;

величины, описывающие технические характеристики кабелей, являются постоянными в том смысле, что они не изменяются от условий задачи. Следовательно, их можно представить в виде основных данных и в САПР они должны быть включены в базу данных;

величины  $P_n$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\Delta U_d$  являются переменными величинами в том смысле, что для каждой решаемой задачи они могут иметь различные значения. К таким величинам относится также и тип кабеля, который задается в виде исходных данных.

Данные удобно представлять в виде векторов или матриц. Табл. 3.8 содержит исходные данные к примеру (приведены данные для кабелей двух типов). Номенклатура выпускаемых типов значительно шире, поэтому при разработке программ следует учитывать возможную потребность в расширении таблиц основных данных (показано на рисунке штриховой линией с номером  $K$ ). Таким образом, каждый элемент таблицы имеет двойную индексацию: по сечениям (от 1 до 13) и по типам кабелей (от 1 до  $K$ ). В приведенной таблице отражена еще одна особенность — не все выпускаемые типы кабелей содержат в номенклатуре полную шкалу сечений. Поэтому в таблице для кабеля типа 2 в соответствующих местах занесены нули. Если ЭВМ будет выполнять просмотр таблицы, названной КАБИД (допустимых токов), то условие (3.9) просто не будет выполнено для первых трех значений и ЭВМ сделает три холостых такта, сравнивая  $I_n$  с нулями.

Таблица 3.8. Основные данные для выбора силовых кабелей напряжением до 1000 В (структура информационных массивов)

КАБФ													
F	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
КАБР													
1													
2	0	0	0									0	0
К													
КАБХ													
1													
2	0	0	0									0	0
К													
КАБID													
1													
2	0	0	0									0	0
К													
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

На рис. 3.13 приведена линейная блок-схема алгоритма, решающего поставленную задачу. Знаком  $m$  на схеме обозначен порядковый номер типа кабеля. На основе приведенной схемы легко убедиться в преимуществах изложенного подхода к разработке программного обеспечения: сразу обнаруживается неполнота либо исходных данных, либо алгоритма, поскольку в операции, выполняемой на десятом шаге алгоритма, присутствует переменная  $\sin \varphi$ , которую следовало бы задать в исходных данных или ввести еще один шаг алгоритма, где она вычислялась бы через  $\cos \varphi$ :

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (3.12)$$

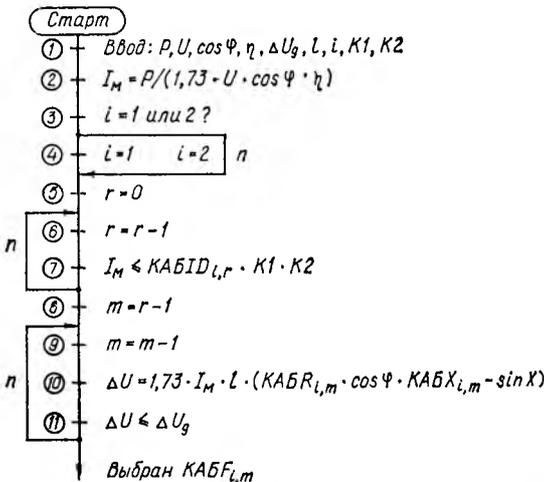


Рис. 3.13. Линейная схема алгоритма выбора кабелей.

Если число рассматриваемых в базе данных типов кабелей ( $K$ ) будет более двух, то между вторым и пятым шагами в алгоритме потребуется поместить комбинацию условных операторов с глубиной вложения  $K$  (рис. 3.5). Однако это требуется в том случае, если  $i$  будет задано в исходных данных конкретной маркой кабеля, например:

$$i := ААШВу.$$

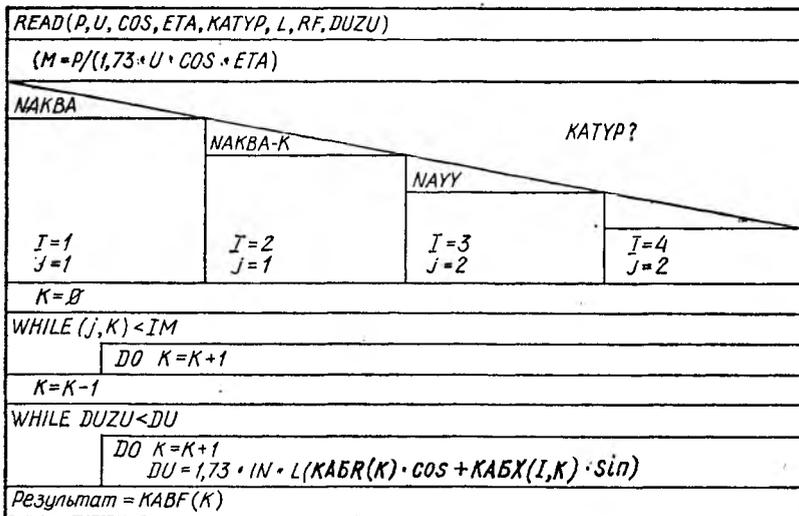


Рис. 3.14. Структурограмма для примера по рис. 3.13.

Разумеется, можно было бы задавать тип кабеля числом от 1 до  $K$ , соответствующим месту, занимаемому параметрами этого кабеля в базе данных. Но, во-первых, проектировщику нет необходимости держать в памяти или на бумаге структуру базы данных, а во-вторых, могут появиться ошибки в выборе кабеля, обусловленные тем, что в исходных данных будет несоответствующее числовое значение  $i$ .

Существует еще одна ситуация, не предусмотренная линейной схемой алгоритма (рис. 3.13), которая возникает в случае, когда просматривается последний (13-й) столбец таблицы данных, а одно из условий (3.9) или (3.11) все же не выполняется. Вполне очевидно, что инженер-электрик предложил бы проложить два параллельных кабеля с большим суммарным сечением либо вообще изменить конструкцию участка сети (например, используя токопровод). Для ЭВМ же такая ситуация является безвыходной (тупиковой). Напомним также, что выбранный кабель должен быть проверен на термическую стойкость при воздействии токов к. з. и для него должен быть выбран селективный аппарат защиты (предохранитель). Соответственно, следует дополнить таблицу основных данных значениями допустимых токов термической стойкости.

На рис. 3.14 приведена структурограмма, соответствующая рис. 3.13, которая подтверждает необходимость использования обеих форм документирования алгоритмов при разработке программ.

### Обобщение алгоритмов выбора и расчета параметров

Комплексный характер инженерной деятельности в процессе проектирования СЭС определяется следующим образом:

применяемые в СЭС электроаппараты и изделия различаются по назначению, областям применения, конструкции, методам расчета и выбора;

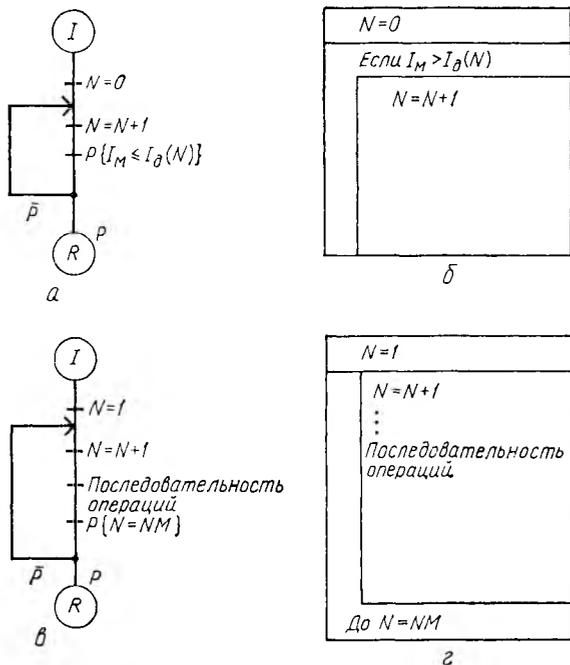


Рис. 3.15. Обобщенные линейные схемы и структурограммы алгоритмов ВЫБОР (а, б) и РАСЧЕТ (в, г) параметров электрооборудования.

в ходе ПП инженер должен принимать ряд решений, основанных на опыте предыдущего проектирования;

между обрабатываемыми данными существуют сложные взаимосвязи, допускающие неоднозначность программно-технических решений. Этим обусловлена необходимость обеспечения разработки программных модулей методом обобщения отдельных элементарных блоков. Основная сложность заключается в том, что для выбора и расчета параметров каждого вида электрооборудования получается специфический алгоритм с подчиненной структурой основных данных. Любые изменения номенклатуры изделий приводят к изменению структуры основных данных и, в конечном итоге, к изменению частных алгоритмов и всей программы. Между тем, из рис. 3.15 видно, что для различных видов оборудования указания и структура имеют один вид, а контрольные указания (логические условия) базируются на соотношениях одного типа. Появляется возможность обобщения структуры алгоритмов выбора и расчета. При этом необходимо, чтобы обобщенные алгоритмы и программы должны быть однотипными для различных классов электрооборудования и техники и независимыми от изменений номенклатуры выпускаемых изделий.

Сложность реальных физических ситуаций приводит к необходимости упрощения их описаний с помощью словесных, символьных и материальных моделей, которые абстрагируют подходящим образом выбранные существенные свойства объектов или ситуаций [6].

Использование ЭВМ предполагает высокую степень формализации обрабатываемых моделей, а следовательно, их символического описания в виде математических моделей. Математическая модель охватывает класс неопределяемых (абстрактных, символических) математических объектов таких, как числа или векторы, и отношения между этими объектами. При этом под отношением понимают гипотетическое правило, связывающее один или несколько символических объектов (операнд, операнды) с другим объектом или множеством объектов (результатом операции) с помощью описания (математической операции). Таким образом, из изложенного следует, во-первых, неопределимость первичных понятий (объектов), а во-вторых, необходимость аксиоматического определения абстрактной модели.

Под операцией в ПП ЭЭС будем понимать любой вид целенаправленной деятельности, определяющий переход от постановки задачи к требуемому решению. Таким образом, абстрактные операции выполняются с помощью абстрактных операторов на абстрактных операндах, причем последние в ПП определяют предмет проектирования.

Понятие оператор включает определенные инструкции, которые управляют переходом от постановки задачи к требуемому решению (или от исходных данных к результирующим). При этом по методике разработки алгоритмов сверху — вниз комплексный характер операторов не имеет принципиального значения. Важной является только возможность иерархической декомпозиции комплексных операторов до уровня элементарных.

Для четкой формулировки (прил. 4) общее описание характерной проектной операции должно охватывать символ оператора, входящие в операцию операнды и результат операции:

$$R = U(o_1, o_2, \dots, o_n),$$

где  $R$  — результат;  $U$  — оператор;  $o_1, \dots, o_n$  — операнды.

Для операций диагностики применима также следующая форма записи:

$$R_n = U(o_1 \phi o_2),$$

где  $\phi$  — любое соотношение, существующее между операндами.

Для разработки алгоритмов решения проектных задач независимо от существующей номенклатуры изделий требуется нормировка данных. Под нормированной постановкой задачи следует понимать вектор данных с единой структурой, компоненты которого в ПП имеют подчиненное, неизменяемое значение.

Преимущества нормированной постановки задачи заключаются в том, что она обеспечивает:

детерминированное содержание и объем постановки задачи на основе определенного массива данных;

установление детерминированных взаимосвязей между постановкой задачи (заказчик, поставщик информации) и требуемой для достижений определенного результата проектной деятельностью (объем информации, производительность проектировщика);

единую форму постановки задачи для различных отраслей промышленности, определяемую электротехническими требованиями потребителей и условиями подключения.

Подготовка нормированных данных

Потребители	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								

↑ ↑ ↑ ↑ ↑

Индекс подкласса q	1	2	3	4	5	6	7	8
1			1	3	4	5	7	8
2			2	4	7			
3			3	5	7	9		
⋮			1	3	5	6	7	

Дополнительная часть таблицы решений

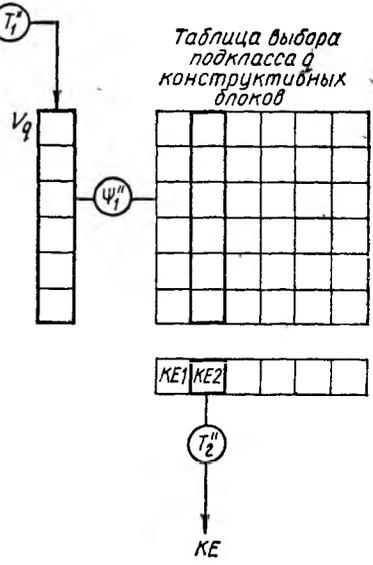


Рис. 3.16. Принцип работы алгоритма выбора элементов с учетом структуры данных в ТР.

Таким подходом гарантируются единство и общность связей между типичными операциями ИП и совокупность входных данных.

Для операций ВЫБОР и РАСЧЕТ параметров основополагающими являются данные об используемых изделиях, поскольку для правильной эксплуатации параметры выбираемого электротехнического оборудования должны удовлетворять вектору предъявляемых требований. Данные об изделиях представляются в виде таблиц решений, причем в регулируемой части ТР помещаются все реально возможные комбинации характерных параметров электрооборудования. Однако на практике для некоторых видов оборудования получают большие ТР, не обладающие наглядностью, и сложно расширяемые. Поэтому вводятся условные понятия блоков и подкласс конструктивных блоков.

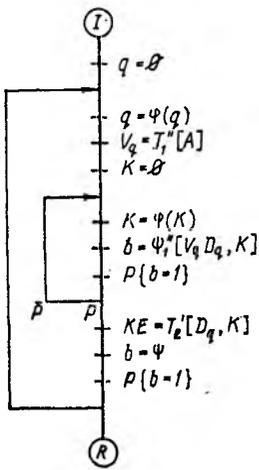


Рис. 3.17. Обобщенный алгоритм комплексной операции ВЫБОР и РАСЧЕТ для различных видов электрооборудования.

Точное разделение классов и подклассов принципиального значения не имеет и параметры изделий в ТР располагаются по функциональным признакам. Например, коммутационные аппараты могут быть объединены в класс, а силовые выключатели выделены в подкласс.

Принцип работы алгоритма можно описать введением определенных операторов с учетом структуры данных, описываемых ТР (рис. 3.16). Помещенные в дополнительной части таблицы выбора данные обозначают, например, номер столбца нормированных данных электроприемников. Из определенных столбцов с помощью оператора  $T_1''$  выбираются конкретные компоненты вектора  $V_d$ .

Для различных подклассов конструктивных блоков эти данные различны, что отражается составом отдельных строк таблицы. Требуется, чтобы вектор  $V$  основных данных  $D$  и данные, расположенные в дополнительной части ТР, имели одинаковую структуру, т. е. количество, последовательность и значение. Тогда, при помощи оператора  $\psi_1''$ , возможно корректное сравнение векторов  $V$  и  $D$  и, при положительном исходе такого сравнения, оператором  $T_2''$  будет выбран конкретный конструктивный блок.

Общий алгоритм операции выбора (рис. 3.17) может быть разработан, если множество ранее введенных операторов дополнить операцией подсчета и оператором контроля ее исполнения.

Операция подсчета описывается оператором  $b$ , применение которого означает увеличение численного значения аргумента на единицу. Контроль завершения операции подсчета описывается оператором  $\psi$ , определяющим наступление равенства аргументов.

Все введенные операторы могут быть объединены в один обобщенный, описывающий программный модуль «Выбор и расчет параметров электрооборудования», функции которого и отражены в таблице решений.

Программное представление получают дальнейшей конкретизацией. Например, требуется так организовать выполнение оператора сравнения  $\psi_1''$ , чтобы все столбцы и строки ТР были правильно просмотрены и каждый элемент данных тщательно проверен.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ПРОБЛЕМНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДИАЛОГОВЫХ СИСТЕМ

### 4.1. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ САПР ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время общая теория проектирования сложных технических систем еще не разработана. Такая теория может быть создана путем развития и обобщения методологии проектирования, включающей все аспекты проектной деятельности от общей постановки задачи до документирования результатов. Одним из обязательных этапов построения методологии проектирования СЭС является разработка концептуальной модели ПП (рис. 4.1), содержащей три уровня: данных, обработки и управления.

Уровень данных включает модель объекта проектирования в виде набора данных, содержащихся в БД, и СУБД, позволяющую оперировать этими данными. На начальном этапе моделирования множество элементов, образующих БД, разбивается на проблемно-независимую и проблемно-зависимую (иерархическая модель СЭС) части.

Уровень обработки представляется набором проектных модулей (ПМ1...ПМ), каждый из которых выполняет определенную проектную операцию или процедуру.

Уровень управления состоит из экспертной системы, предназначенной для формализации процессов принятия решений в ПП электро-снабжения, и интерпретатора управления, представляющего собой программу, управляющую отдельными ПМ и СУБД на основании решений экспертной системы [5].

С позиций теоретико-множественного описания систем БД можно рассматривать как множество элементов, каждый из которых является частным описанием базовых элементов СЭС (см. рис. 1.1). Уровень обработки информации, включающий весь набор ПМ, может быть определен как множество отношений на множестве элементов БД (прил. 3), а уровень управления, определяющий связи между операциями обработки, — как множество отношений между отношениями на множестве элементов.

Поскольку процесс проектирования СЭС происходит во времени, приходится описывать его в виде последовательности шагов (рис. 4.2), каждый из которых определяется начальным и конечным состояниями процесса обработки ( $Y_i, Y_j$ ) и процесса управления ( $W_i, W_j$ ). Тем самым предполагается, что над набором данных ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), имеющих в состоянии обработки  $b_i (W_i, Y_i)$ , для достижения следующего состояния  $b_j (W_j, Y_j)$  должна быть выполнена операция, определяемая оператором  $a_j$ .

Каждая операция характеризуется вектором входных величин (операндом), вектором выходных величин и оператором (алгоритмом), преобразующим входной операнд в выходной. В этой модели состоя-

ние обработки интерпретируется как состояние процесса проектирования, достигнутое к определенному моменту времени (состояние процесса решения задачи и состояние базы данных) и описывающее объект проектирования в виде результата операций, выполненных к тому же моменту времени.

На основе блочно-иерархического представления моделей систем (см. рис. 1.1) с учетом наличия различных аспектов и уровней моделирования (см. рис. 1.4) можно потребовать соответствия структуры данных в БД структуре моделируемого процесса проектирования.

Это позволяет обобщить концептуальную модель (рис. 4.1), последовательно выполняя следующие шаги моделирования (рис. 4.3).

На первом шаге процесс проектирования представляется в виде преобразования  $F(X)$ , направленного от множества необходимых входных величин  $X$  к некоторому проектному решению  $Y$  (рис. 4.3, а), т. е.

$$Y = F(X).$$

В общем случае под  $X$  можно понимать все компоненты ТЗ на разработку конкретной СЭС, определяющие исходные данные проекта (подмножество  $X' \in X$ ), и описания параметров элементов СЭС, соответствующие выпускаемому ассортименту электротехнических изделий ( $X'' \in X$ ). Поскольку в настоящее время широко используется

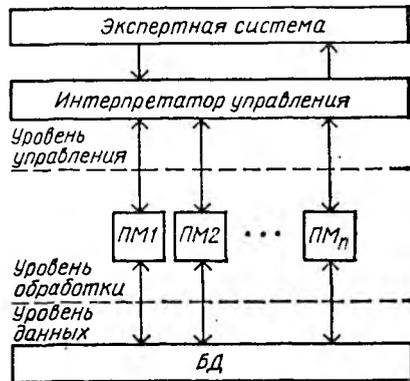


Рис. 4.1. Концептуальная модель ПП систем электроснабжения.

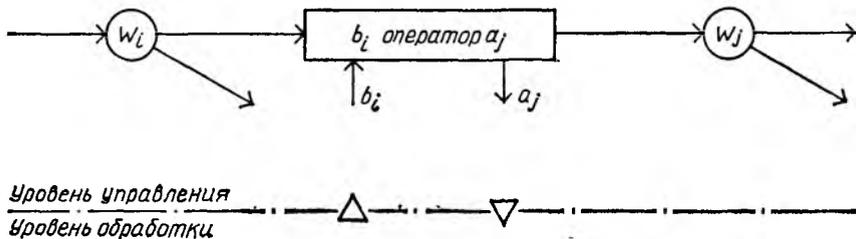


Рис. 4.2. Представление процесса проектирования СЭС в виде дискретной последовательности шагов.

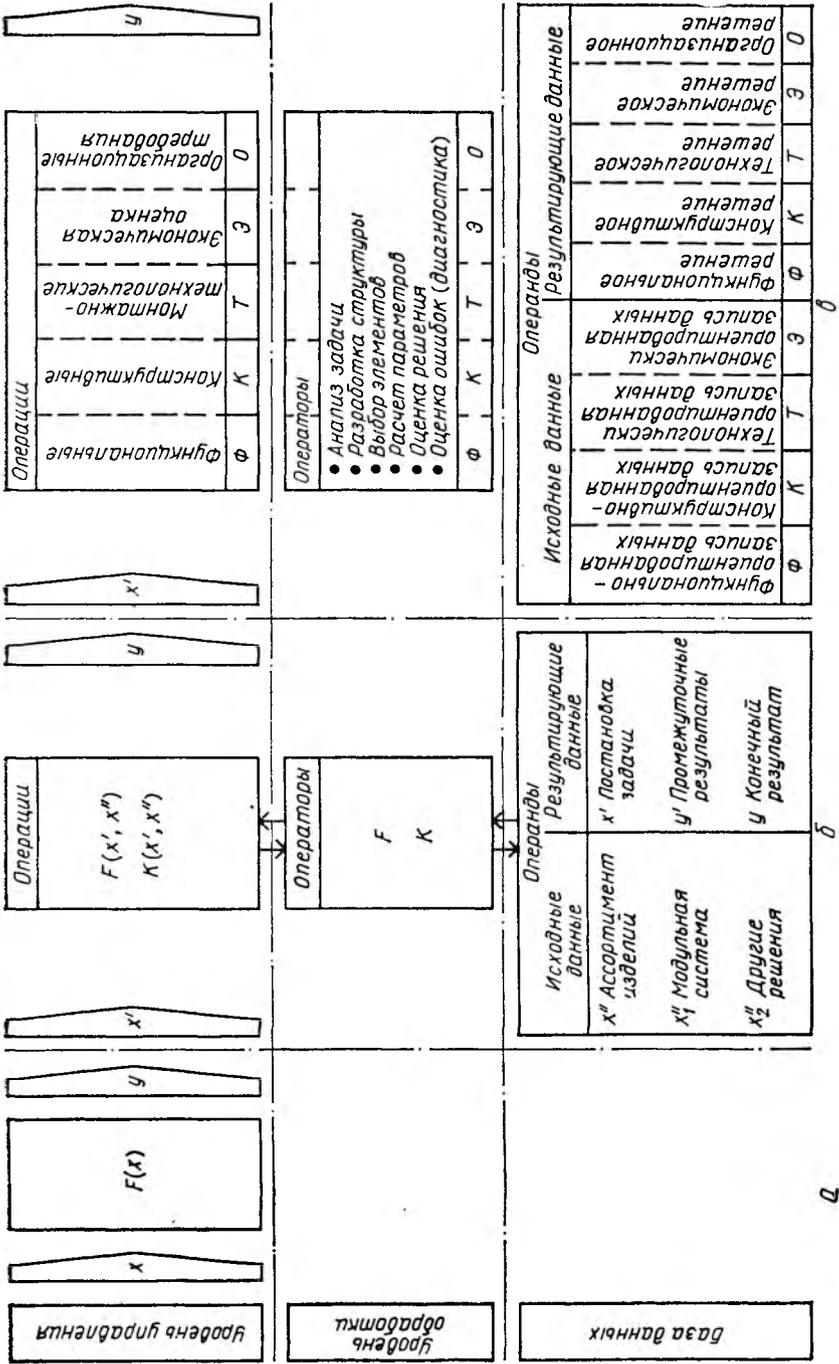


Рис. 4.3. Обобщенная модель процесса проектирования СЭС.

Рис. 4.4. Характерная последовательность элементарных проектных операций в ПП электроснабжения.

модульный принцип агрегирования функциональных элементов СЭС, заключающийся в появлении значительной номенклатуры комплектных электротехнических установок (комплектные подстанции, конденсаторные установки), можно подразделить подмножество  $X' \in X$  на множество объектных модулей  $X'_1$  и множество других, может быть еще не известных, решений  $X'_2$ .

Рассматривая операнды  $X'$  и  $X''$  в операции

$$Y = F(X', X''),$$

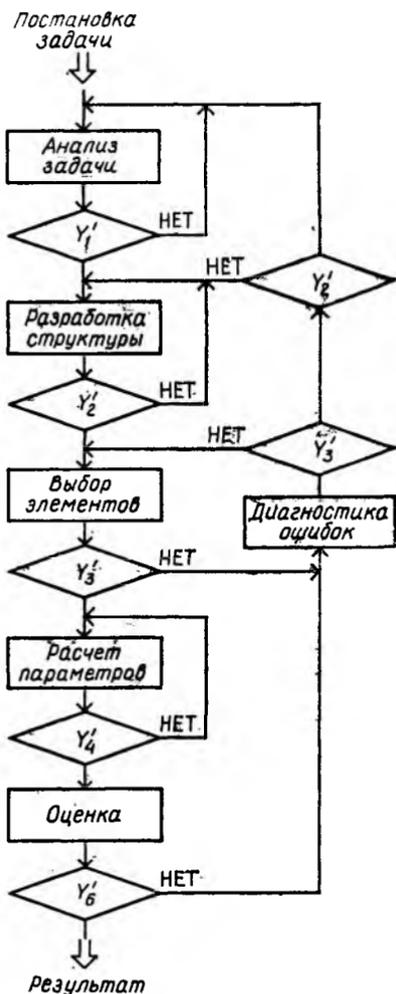
можно сделать вывод, что  $X' \in X$  зависит от конкретных исходных данных и для каждого проекта СЭС будет отличаться набором и параметрами своих компонентов, а  $X'' \in X$  можно считать условно постоянной частью БД, поскольку его компоненты изменяются только при изменении номенклатуры выпускаемых электротехнических изделий.

На втором шаге моделирования (рис. 4.3, б) процесс проектирования рассматривается как целенаправленное применение операторов (правила и методы решения задач, проектные процедуры) на операндах, которые представляют собой массивы информации. Тем самым на уровне управления выделяется область проектных операций, определяющих логику принятия решений на каждом шаге ПП, на уровне обработки — область операторов и на уровне базы данных — области исходных и результирующих операндов. При этом операнды, являющиеся исходными для некоторого  $i$ -го шага ПП, одновременно являются результирующими для  $(i - 1)$ -го шага.

Учитывая различные аспекты процесса проектирования (функциональный, конструкторский, технологический, экономический, организационный), выделим соответствующие типы операторов. Например, для конструкторского проектирования:

$$Y = K(X', X'').$$

Еще большая степень конкретизации обобщенной модели ПП достигается на третьем шаге моделирования (рис. 4.3, в) благодаря



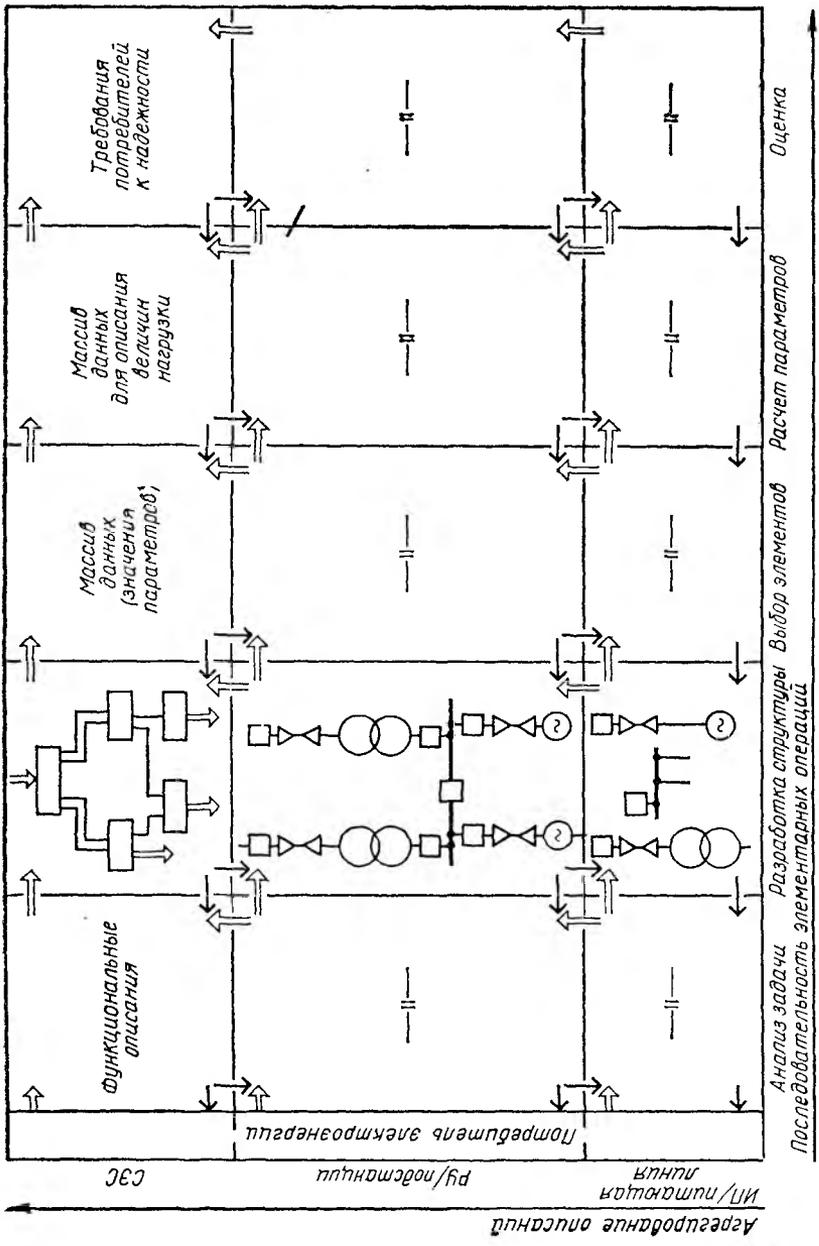


Рис. 4.5. Двумерная модель ПП электроснабжения.

наличие типичных последовательностей проектных процедур (см. рис. 1.6) и элементарных проектных операций.

Характерными для проектирования СЭС элементарными проектными операциями являются: анализ задачи, разработка структуры, выбор элементов, расчет параметров, оценка решения и диагностика ошибок (рис. 4.4). Операция «Анализ задачи» необходима для определения соответствия исходных данных типовой постановке задачи и их анализа на полноту и достоверность. Операция «Разработка структуры» предназначена для разработки альтернативного схемного решения (для узла, подсистемы или всей СЭС) на основе известных функционально-структурных отношений на множестве элементов СЭС. Операция «Выбор элементов» позволяет для каждого типа структурных элементов СЭС выделить набор соответствующих функциональных элементов (трансформаторов, контакторов, выключателей). «Расчет параметров» выполняется для последующей «Оценки решения» соответствии параметров выбранных функциональных элементов СЭС режимным параметрам альтернативного схемного решения, например, соответствует ли предельная разрывная мощность выбранного выключателя мощности короткого замыкания в месте его установки. Операция «Диагностика ошибок» позволяет установить причину отсутствия решения на том или ином этапе ПП: является ли причиной ошибка в исходных данных либо альтернативное решение принципиально не реализуемо. На рис. 4.4 показан ПП СЭС как многоступенчатый итеративный процесс, причем характерная последовательность элементарных проектных операций сохраняется на различных уровнях агрегирования описаний объекта проектирования (присоединение потребителя — питающая линия — распределительное устройство — подстанция — СЭС). Поэтому от одномерного представления ПП следует перейти к его двумерному описанию, как показано на рис. 4.5. Двойные стрелки на этом рисунке указывают на прямую, а одинарные — на обратную последовательность выполнения элементарных операций.

Описанная в данном разделе концептуальная модель ПП является основой для математического моделирования процесса проектирования СЭС.

## 4.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРАВИЛА ТЕОРИИ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

Используя основные понятия теории множеств, теоретико-множественные описания кибернетических систем по типу вход — выход и их комбинаций (прил. 3), несложно перейти к моделям конечных автоматов как средству для формализации описания процесса проектирования.

Конечным автоматом (рис. 4.6) называют [4] пятерку  $(X, Y, Z, \delta, \lambda)$ , если:

$X, Y, Z$  — конечные множества;

$\delta$ , функция типа  $\delta: Z \times X \rightarrow Z$ ;

$\lambda$ , функция типа  $\lambda: Z \times X \rightarrow Y$ .

Здесь множество  $X$  — входной алфавит;  $Y$  — выходной алфавит;  $Z$  — множество состояний;  $\delta$  — функция переходов; реализующая

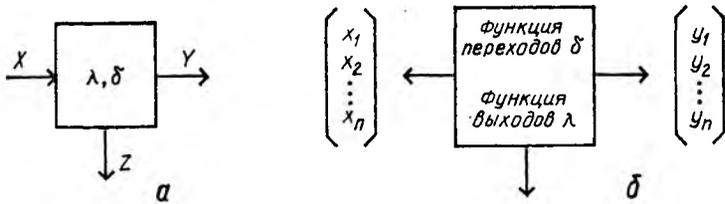


Рис. 4.6. К понятию конечного автомата.

отображение  $D_\delta \subseteq Z \times X$  в  $Z$ ;  $\lambda$  — функция выходов, реализующая отображение  $D_\lambda \subseteq Z \times X$  на  $Y$ .

Таким образом, функция переходов  $\delta$  описывает динамическое поведение автомата. Если к моменту времени  $t$  автомат находился в состоянии  $Z$  и на входе действует буква алфавита  $X$  (фаза  $(t, Z, X)$ ), то к моменту  $t + 1$  установится состояние  $\delta(Z, X)$ , что соответствует фазе  $t + 1$ ,  $\delta(Z, X)$ . Функция выходов (или результатов)  $\lambda$  описывает статическое поведение автомата. Если автомат находится в фазе  $t$ ,  $Z, X$ , то на его выходе появится буква  $\lambda(Z, X)$ .

Введем понятия начального  $z_0$  и конечного  $z_n$  состояний. Тогда под математической моделью дискретного устройства понимается абстрактный автомат, определяемый как семикомпонентный кортеж:

$$S = (X, Y, Z, \delta, \lambda, z_0, z_n).$$

Подобный автомат наглядно можно описать с помощью графа.

В основу последующего изложения положено представленное на рис. 4.2 разделение на операции обработки (уровень обработки) и управления (уровень управления).

Операции обработки определяются на базе данных; они имеют по одному входу и выходу и непосредственно не обмениваются информацией.

Операции управления определяются по операциям обработки. Преимущества подобного разделения заключаются в следующем.

Для уровня управления можно разработать проблемно-независимое программное обеспечение, которое как управляющая программа осуществляет управление процессом обработки информации и определяет места сопряжения для программных модулей; проблемно-зависимое описание процесса (изменяемая часть управляющей программы) производится с помощью специальных терминов и программируется непосредственно.

Если изменяется проблемно-независимое описание процесса, то должна изменяться также и изменяемая часть управляющей программы; интерпретатор и отдельные модули остаются без изменений. Если изменяется один из модулей, то должен изменяться только он один, а все остальные модули и управляющая программа остаются неизменными. При стандартизованном описании процесса и вызове модулей независимо от типа ЭВМ построенные программы можно использовать на различных ЭВМ.

Методом комбинирования элементарных автоматов осуществляется разработка комплексных систем; с помощью правил композиции

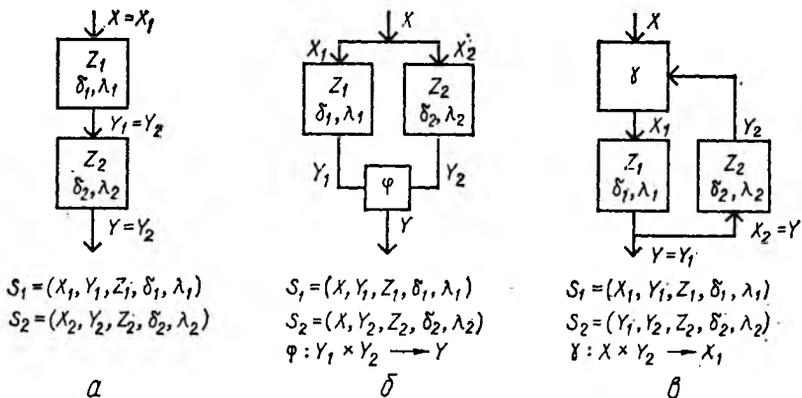


Рис. 4.7. Объединение автоматов при последовательной (а) и параллельной (б) схемах соединений и обратной связи (в).

автоматов можно формализовать описание характеристики результирующих автоматов. Ниже интерпретируются правила для последовательной и параллельной схем включения автоматов, а также для обратной связи автоматов [4].

На рис. 4.7, а представлена последовательная схема автоматов:

$$S_1 = (X_1, Y_1, Z_1, \delta_1, \lambda_1);$$

$$S_2 = (X_2, Y_2, Z_2, \delta_2, \lambda_2).$$

Результирующий автомат имеет вид

$$S = (X, Y, Z, \delta, \lambda)$$

причем

$$X = X_1; \quad Y = Y_2; \quad Z = Z_1 \times Z_2; \quad \delta : Z \times X_1 \rightarrow Z.$$

Правилами формирования внутренней функции переходов являются:

$$\delta(Z \times X) = (\delta_1(Z_1 \times X_1); \quad \delta_2(Z_2 \times \delta_1(Z_1 \times X_1)));$$

$$\delta(z_i, x_j) = (\delta_1(z_{1i}, x_{1j}); \quad \delta_2(z_{2i} \times \delta_1(z_{1i}, x_{1j})));$$

$$\lambda : X_1 \times Z \rightarrow Y_2.$$

Правилами формирования внешней функции переходов являются:

$$\lambda(Z \times X) = \lambda_2(Z_2 \times \lambda_1(Z_1 \times X_1));$$

$$\lambda(z_i, x_j) = \lambda_2(z_{2i} \times \lambda_1(z_{1i}, x_{1j})).$$

Применение этих правил подробно объясняется с помощью таблиц автоматов (табл. 4.1).

На рис. 4.7, б приведена параллельная схема автоматов:

$$S_1 = (X_1, Y_1, Z_1, \delta_1, \lambda_1);$$

$$S_2 = (X_2, Y_2, Z_2, \delta_2, \lambda_2),$$

а также функция  $\varphi$ , которая образует множество  $Y$ :

$$\varphi : Y_1 \times Y_2 \rightarrow Y.$$

Таблица 4.1. Последовательное соединение автоматов

$\delta_1 : X_1 \times Z_1 \rightarrow Z_1$				$\lambda_1 : X_1 \times Z_1 \rightarrow Y_1$			
$\delta_1$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{13}$	$\lambda_1$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{13}$
$x_{11}$	$z_{11}$	$z_{11}$	$z_{12}$	$x_{11}$	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{12}$
$x_{12}$	$z_{13}$	$z_{13}$	$z_{12}$	$x_{12}$	$y_{11}$	$y_{11}$	$y_{11}$
$\delta_2 : X_2 \times Z_2 \rightarrow Z_2$				$\lambda_2 : X_2 \times Z_2 \rightarrow Y_2$			
$\delta_2$	$z_{21}$	$z_{22}$		$\lambda_2$	$z_{21}$	$z_{22}$	
$y_{11}$	$z_{21}$	$z_{22}$		$y_{11}$	$y_{21}$	$y_{22}$	
$y_{12}$	$z_{21}$	$z_{22}$		$y_{12}$	$y_{22}$	$y_{21}$	
$\delta : X \times Z \rightarrow Z$							
$\delta$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	
	$z_{11}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{12}z_{21}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{22}$	
$X_1$	$z_{11}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{11}z_{21}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{12}z_{21}$	
$X_2$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{22}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{22}$	$z_{12}z_{21}$	$z_{12}z_{22}$	
$\lambda = X \times Z \rightarrow Y$							
$\lambda$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	
$X_1$	$y_1$	$y_2$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	
$X_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	

Результирующий автомат имеет вид

$$S = (X, Y, Z, \delta, \lambda),$$

причем

$$X = X_1 = X_2; \quad Y = \varphi(Y_1 \times Y_2);$$

$$Z = Z_1 \times Z_2; \quad \delta : X \times X \rightarrow Z.$$

Правилами формирования внутренней функции переходов для этого способа соединения автоматов являются:

$$\delta(Z \times X) = (\delta_1(Z_1 \times X_1); \delta_2(Z_2 \times X_2));$$

$$\delta(z_i, x_j) = (\delta_1(z_{1i}, x_{1j}); \delta_2(z_{2i}, x_{2j}));$$

$$\lambda : Z \times X \rightarrow Y.$$

Правилами формирования внешней функции переходов являются:

$$\lambda(Z \times X) = (\lambda_1(Z_1 \times X_1); \lambda_2(Z_2 \times X_2));$$

$$\lambda(z_i, x_j) = (\lambda_1(z_{1i}, x_{1j}); \lambda_2(z_{2i}, x_{2j})).$$

Практическое использование этих правил описано таблицами автоматов (табл. 4.2).

Таблица 4.2. Параллельное соединение автоматов

$\delta_1 : X \times Z_1 \rightarrow Z_1$				$\lambda_1 : X \times Z_1 \rightarrow Y_1$			
$\delta_1$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{13}$	$\lambda_1$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{13}$
$X_1$	$z_{11}$	$z_{11}$	$z_{12}$	$X_1$	$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{12}$
$X_2$	$z_{13}$	$z_{13}$	$z_{12}$	$X_2$	$y_{11}$	$y_{11}$	$y_{11}$
$\delta_2 : X \times Z_2 \rightarrow Z_2$				$\lambda_2 : X \times Z_2 \rightarrow Y_2$			
$\delta_2$	$z_{21}$	$z_{22}$		$\lambda_2$	$z_{21}$	$z_{22}$	
$X_1$	$z_{21}$	$z_{22}$		$X_1$	$y_{21}$	$y_{22}$	
$X_2$	$z_{22}$	$z_{21}$		$X_2$	$y_{22}$	$y_{21}$	
$\varphi : Y_1 \times Y_2 \rightarrow Y$							
$\varphi$	$y_{21}$	$y_{22}$					
$y_{11}$	$y_1$	$y_2$					
$y_{12}$	$y_2$	$y_3$					
$\delta : X \times Z \rightarrow Z$							
$\delta$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	
	$z_{11}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{12}z_{21}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{22}$	
$X_1$	$z_{11}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{11}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{12}z_{21}$	$z_{12}z_{22}$	
$X_2$	$z_{13}z_{22}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{12}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{22}$	$z_{12}z_{21}$	
$\lambda : X \times Z \rightarrow Y$							
$\lambda$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	
$X_1$	$y_1$	$y_2$	$y_2$	$y_3$	$y_2$	$y_3$	
$X_2$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	$y_2$	$y_1$	

На рис. 4.7, в приведена схема обратной связи (цикла) автоматов:

$$S_1 = (X_1, Y_1, Z_1, \delta_1, \lambda_1);$$

$$S_2 = (X_2, Y_2, Z_2, \delta_2, \lambda_2),$$

причем функция  $\gamma$  порождает множество  $X$ :

$$\gamma : X \times Y_2 \rightarrow X_1.$$

При обратной связи автоматов следует учитывать, что для стабильной работы требуется автомат Мура. В случае, если автомат является автоматом Мура, в качестве результирующего автомата

получается модель

$$S = (X, Y, Z, \delta, \lambda),$$

причем

$$X_1 = \gamma(X \times Y_2); \quad Y = Y_1; \quad Z = Z_1 \times Z_2;$$

$$\delta : Z \times X \rightarrow Z.$$

Правилами формирования определенной функции внутренних переходов служат:

$$\delta(Z \times X) = (\delta_1(Z_1 \times \gamma(X \times \lambda_2(Z_2))); \quad \delta_2(Z_2 \times \lambda_1(Z_1 \times \\ \times \gamma(X \times \lambda_2(Z_2))));$$

$$\delta(z_i, x_j) = (\delta_1(z_{1i}, \gamma(x_j, \lambda_2(z_{2i}))); \quad \delta_2(z_{2i}, \lambda_1(z_{1i}, \gamma(x_j, \lambda_2(z_{2i}))))).$$

Правилами формирования функции внешних переходов являются:

$$\lambda(Z \times X) = \lambda_1(z_1 \times \gamma(X \times \lambda_2(z_2)));$$

$$\lambda(z_i, x_j) = \lambda_1(z_{1i} \times \gamma(x_j \times \lambda_2(z_{2i}))).$$

С помощью этих правил определяется результирующий автомат  $S = (X, Y, Z, \delta, \lambda)$  по выражениям:

$$X = \{X_1, X_2, X_3\}; \quad Y = \{Y_1, Z_2, Y_3\};$$

$$Z = \{z_{11}, z_{21}, z_{11}z_{22}, z_{12}z_{21}, z_{12}z_{22}, z_{13}z_{21}, z_{22}\}.$$

Подробнее эта операция представлена с помощью таблиц автоматов (табл. 4.3).

Другие варианты композиции автоматов, включая правила описания сети автоматов, приведены в [4].

Используя автоматный подход к моделированию ПП, возможно разработать формальный проблемно-ориентированный язык проектирования. Под формальным понимают такой язык, синтаксис которого отвечает некоторым формальным правилам, т. е. грамматику которого можно формализовать или математизировать. Основу теории формальных языков образуют абстрактные автоматы, причем доказано, что регулярные языки идентичны языкам конечных автоматов. Формальный язык определяется следующим образом.

Если множество  $A$  содержит знаки алфавита, то множество  $A^*$  включает все слова, которые могут быть образованы из знаков алфавита:  $A^* = P(A)$ .

Подмножество  $L(A)$  множества  $A^*$  всех слов содержит слова, которые относятся к формальному языку:  $L(A) \subset A^*$ .

Грамматика  $G(L)$  формального языка содержит правила, с помощью которых возможно сформировать слова подмножества  $L$  (образующая грамматика), решить, относится ли слово  $k$  к подмножеству  $L$  (решающая грамматика).

Грамматика  $G(L)$  оценивается четверкой:  $G(L) = (A, H, h_0, R)$ , при этом вводятся определения множеств:

$A$  —  $A \{a_i, i = \overline{1, n}\}$  — конечный алфавит;

$H$  — конечное множество вспомогательных величин;

$h_0 \in H$  — особый, начальный символ;

$R \subset R = \{a_i^* \rightarrow a_j^*, i, j = \overline{1, n}\}$ ;  $a^* \subset A \cap H$  — конечное множество правил.

Таблица 4.3. Обратная связь автоматов

$\delta_1 : X_1 \times Z_1 \rightarrow Z_1$				$\lambda_1 : X_1 \times Z_1 \rightarrow Y_1$			
$\delta_1$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{13}$	$\lambda_1$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z_{13}$
$x_{11}$	$z_{13}$	$z_{12}$	$z_{13}$	$x_{11}$	$y_1$	$y_2$	$y_1$
$x_{12}$	$z_{13}$	$z_{12}$	$z_{11}$	$x_{12}$	$y_3$	$y_1$	$y_2$
$\delta_2 : Y_1 \times Z_2 \rightarrow Z_2$				$\lambda_2 : Z_2 \rightarrow Y_2$			
$\delta_2$	$z_{21}$	$z_{22}$		$\lambda_2$	$z_{21}$	$z_{22}$	
$y_1$	$z_{21}$	$z_{22}$		—	$y_{21}$	$y_{22}$	
$y_2$	$z_{23}$	$z_{23}$					
$y_3$	$z_{21}$	$z_{21}$					
$\gamma : X \times Y_2 \rightarrow X_1$							
$\gamma$	$X_1$	$X_2$	$X_3$				
$y_{21}$	$x_{11}$	$x_{11}$	$x_{11}$				
$y_{22}$	$x_{12}$	$x_{12}$	$x_{11}$				
$\delta : Z \times X \rightarrow Z$							
$\delta$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	
	$z_{11}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{12}z_{21}$	$z_{12}z_{23}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{22}$	
$X_1$	$z_{13}z_{21}$	$z_{12}z_{21}$	$z_{12}z_{23}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	
$X_2$	$z_{13}z_{21}$	$z_{12}z_{21}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	
$X_3$	$z_{13}z_{21}$	$z_{11}z_{22}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{12}z_{22}$	$z_{13}z_{21}$	$z_{13}z_{22}$	
$\lambda : Z \times X \rightarrow Z$							
$\lambda$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	
$X_1$	$Y_1$	$Y_3$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_1$	$Y_2$	
$X_2$	$Y_1$	$Y_3$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_1$	$Y_2$	
$X_3$	$Y_1$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_1$	

Следовательно, исходя из принципов моделирования процесса проектирования на базе конечных абстрактных автоматов, возможны переход к разработке формального языка и его интерпретация как языка проектирования. Особое значение имеет согласование таких языков при разработке интерактивного (диалогового) режима, причем необходимо учитывать следующее:

программный модуль является конечным автоматом и представляет собой определенную часть формализованного языка;

программные модули объединены программой управления и, таким образом, определенные части языка объединены в комплексные;

вследствие иерархического подразделения программ управления возможно иерархическое подразделение языка.

Реализация интерактивного режима требует разработки соответствующих языков; они являются основой общения между проектировщиком и программным обеспечением пользователя.

Интерактивный режим следует рассматривать как постоянное чередование входных и выходных слов, причем диалог можно определить как последовательность слов:

$$l = x_1^*, y_1^*, x_2^*, y_2^*, \dots, x_n^*, y_n^*$$

где

$$x_i^* \in X^*; \quad y_j^* \in Y^*.$$

Разработка диалоговой системы для класса задач включает формирование последовательности слов, а также попарное согласование входных и выходных слов.

Для уровня обработки характерно, что операции определены на базе данных как обрабатывающие модули  $vm_i \in VM$ ; каждому обрабатываемому модулю  $vm_i$  непосредственно соответствуют:

подмножество  $X_i = \{x_i, i = \overline{1, n}\}$  как входной алфавит и определенное на нем подмножество входных слов:

$$L(X) \subset X_i^* = \{x_i^*, i = \overline{1, n}\};$$

подмножество  $Y_i = \{y_i, i = \overline{1, n}\}$  как выходной алфавит и определенное на нем подмножество выходных слов:

$$L(Y) \subset Y_i^* = \{y_i^*, i = \overline{1, n}\},$$

достижимое состояние обработки, характеризующееся наличием после обрабатывающего модуля выходного слова  $y_i^* \in Y_i^*$ , которое подчинено состоянию  $z_i^* \in Z^*$ , откуда  $b_i = (z_i^*, y_i^*)$ .

В состоянии  $z_i^*$  существует последовательность выходных слов  $l_y = y_1^*, y_2^*, \dots, y_i^*$  такая, что  $l_y \in L(Y^*)$ , откуда следует  $b_i^* = (W_i^*, l_{y_i})$ .

Для упрощения рассмотрения принято следующее:

$$b_i = y_i^* \text{ и } L(Y) \subset Y^* = B;$$

$$b_i^* = l_{y_i} \text{ и } L(Y^*) \subset (Y^*)^* = B^*.$$

Характерным для уровня управления является описание необходимой последовательности обработки проектных модулей  $vm_i \in VM$ , а следовательно, описание процесса решения задачи.

Решение о необходимости обработки конкретных модулей принимается с помощью оценки выходного слова  $y_i^* \in Y^*$ , и при этом происходит, во-первых, отображение множества  $Y^*$  во множество  $\{0, 1\}$ , которое интерпретируется как высказывание об истинности решения,

и, во-вторых, двоично оцениваемое множество  $Y^*$  является подмножеством  $E = \{e_i, i = \overline{1, n}\}$  входного алфавита уровня управления.

Вызов обрабатываемого модуля  $vm_i \in VM$  осуществляется с помощью команды  $a_i$ , причем множество  $A = \{a_i, i = \overline{1, n}\}$  представляет собой выходной алфавит уровня управления. Каждому обрабатываемому модулю  $vm_i$  соответствует входное слово  $x_i^* \in X^*$ .

Множества  $E^* = \{e_i^*, i = \overline{1, n}\}$  и  $A^* = \{a_i^*, i = \overline{1, n}\}$  представляют собой множества входных и выходных слов, отвечающих определенному процессу решения задачи.

#### 4.3. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЭС

Рассматривая ПП СЭС как дискретную детерминированную последовательность проектных операций, можно представить его описание в виде семерки:

$$ПП = (X, Y, Z, \delta, \lambda, z_0, z_n).$$

Подобное представление возможно на основе модели конечного абстрактного автомата и позволяет в рамках теории автоматов описать ПП как последовательность дискретных шагов (тактов).

В процессе проектирования вся информация, начиная с некоторого исходного значения  $z_0 \in Z$ , посредством конечного числа операций переводится в конечное состояние  $z_n \in Z$ . При этом состояние ПП  $z_n$  трактуется как состояние начально существовавшей и обработанной к данному моменту информации, что означает:

$$X = \{x_i, i = \overline{1, n}\}.$$

Множество  $X$  входных величин подразделяется на зависимое и не зависимое от условий задачи подмножества

$$Y = \{y_i, i = \overline{1, m}\}.$$

Множество  $Y$  выходных величин (решение задачи) также сохраняется в переменной части базы данных как основа будущих решений на последующих этапах ПП.

Множество  $Z$  состояний обработки, которое одновременно связано с отображением состояния базы данных, достигнутого к данному моменту времени, позволяет связать оба множества:  $X$  и  $Y$ .

Функция результата (результатирующая функция)  $\lambda$  представляется в виде

$$\lambda : Z \times X \rightarrow Y,$$

причем

$$y_i = \lambda(z_i, x_i).$$

Эта функция реализует отображение множества произведений  $Z \times X$  на множество результатов  $Y$ ; при состоянии  $z_i \in Z$  и входе  $x_i \in X$  на выходе появляется величина  $y_i \in Y$ .

Переходная функция описывается выражением

$$\delta : Z \times X \rightarrow Z,$$

причем

$$z_j = \delta(z_i, x_i).$$

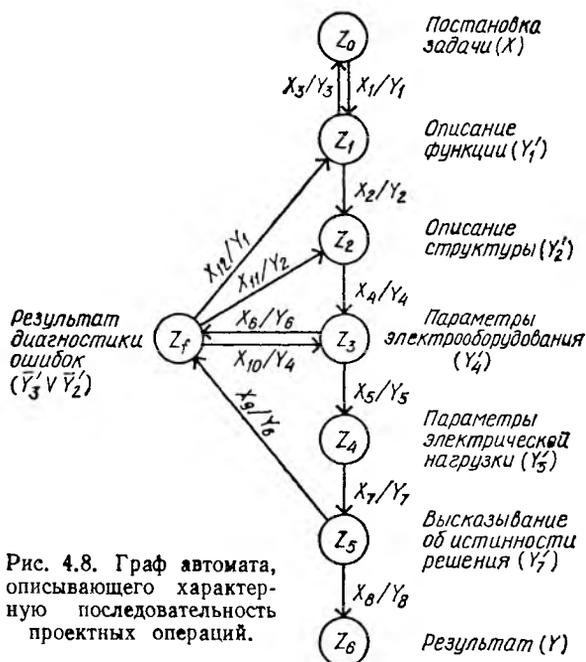


Рис. 4.8. Граф автомата, описывающего характерную последовательность проектных операций.

Функция  $\delta$  реализует отображение множества произведений  $Z \times X$  во множество состояний  $Z$ : при появлении на входе  $x_i$  происходит переход от состояния обработки  $z_i$  к состоянию  $z_j$ . Тем самым  $\delta$  указывает на условия, при которых осуществим переход  $z_i \rightarrow z_j$ .

Применяя определения, введенные для  $X, Y, Z$ , и полученные функции к характерной последовательности элементарных проектных операций (см. рис. 4.4), можно получить ее описание в виде графа (рис. 4.8) и таблицы состояний соответствующего автомата (табл. 4.4). При этом используются также понятия и определения, полученные ранее для формального языка проектирования на основе автоматных представлений ПП.

Таблица 4.4. Состояния автомата, соответствующие графу рис. 4.8

$z_i$	$x_i$		$y_i$		$z_j$
$Z_0$	$X_1$	Постановка задачи	$Y_1$	Описание функции	$Z_1$
$Z_1$	$X_2$	Описание функции	$Y_2$	Описание структуры	$Z_2$
	$X_3$	Изменение описания функции	$Y_3$	Изменение постановки задачи	$Z_0$
$Z_2$	$X_4$	Описание функции и структуры	$Y_4$	Выбор электротехнического оборудования	$Z_3$
$Z_3$	$X_5$	Необходимые для расчетов величины и их значения	$Y_5$	Значения электрических нагрузок	$Z_4$
	$X_6$	Описание ошибок	$Y_6$	Результаты диагностики ошибок	$Z_f$

$Z_i$	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$
$Z_4$	$X_7$ Электрические нагрузки и расчет параметров	$Y_7$ Высказывание об истинности решения	$Z_5$
$Z_5$	$X_8$ Высказывание о результате оценки	$Y_8$ Высказывание о результате	$Z_n$
	$X_9$ Описание ошибок	$Y_6$ Результаты диагностики ошибок	$Z_f$
$Z_6$	$X_{10}$ Изменение параметров по результатам расчетов	$Y_4$ Электротехническое оборудование	$Z_3$
	$X_{11}$ Изменения описания структуры	$Y_2$ Описание структуры	$Z_2$
	$X_{12}$ Изменение описания функции	$Y_1$ Описание функции	$Z_k$
Множество $Z$		Множество $X$	
		Множество $Y$	

Входные слова определяются выражениями

$$x_i \in L(X); \quad L(X) \subset X^*.$$

Выражения для выходных слов алфавита имеют вид

$$y_i \in L(Y'); \quad L(Y') \subset Y'^*.$$

Между последовательными состояниями процесса обработки и последовательностью элементарных проектных операций устанавливается следующее соответствие.

Начальное состояние  $Z_0$  отвечает постановке задачи и требует наличия в начальный момент времени всех данных  $X^*$ , необходимых для решения задачи по алгоритму, представленному на рис. 4.4.

Состояние  $Z_1$  отражает появление результата ( $Y_1$ ) анализа задачи, подтверждающего наличие единственного нормированного описания всех необходимых исходных данных, позволяющих определить функцию ( $Y_1'$ ) разрабатываемого электротехнического устройства.

Структурное описание ( $Y_2'$ ) схемы, реализующей требуемую функцию, появляется в состоянии  $Z_2$  при реализации операции «Разработка структуры» в виде отношений между функциональными элементами. В состоянии  $Z_3$  становятся известны параметры элементов схемы в виде массивов данных, характеризующих электрооборудование (тип, мощность, номинальные напряжения и ток).

Состояние  $Z_4$  достигается в результате операции «Расчет параметров», что позволяет оценить все параметры режима в разработанной схеме (токи нормального, аварийного и послеаварийного режимов, посадки напряжения, длительность отключенного состояния цепи).

При достижении состояния  $Z_5$  можно оценить истинность или ложность высказывания (прил. 4) о соответствии параметров выбранного оборудования параметрам режима схемы.

Состояние  $Z_6$  характеризует результат операции «Диагностика ошибок» ( $\bar{Y}_3' \vee Y_2'$ ), позволяющий оценить необходимость итеративного повторения одного или нескольких предшествующих состояний.

Конечное состояние  $Z_n$  соответствует найденному проектному решению поставленной задачи.

Приведенная интерпретация состояний автомата показывает, что путем иерархической декомпозиции процесса проектирования до уровня элементарных проектных операций, описываемых автоматами, ПП может быть математически формализован.

Подобный подход можно использовать для разработки программных модулей и систем программ, поскольку принятые решения (переходная функция  $\delta$ ) и действия (функция результата  $\lambda$ ) четко разграничены. Тогда программу можно представить в виде управляющей части и независимых программных модулей. Отдельные программные модули не зависят друг от друга, имеют вход и выход и непосредственно не обмениваются информацией. Место сопряжения между модулями координируется управляющей программой. После обработки модуля управление снова передается проблемно-независимой программе управления, описывающей конкретную проблемную логику. При иерархической структуре ПП необходимо выполнить такое разделение между принятым решением и исполнением на каждом уровне. Процесс решения задачи начинается с ее постановки и заканчивается проектным решением, причем всегда выполняется заданная последовательность состояний обработки.

Процесс решения может контролироваться извне с помощью оценки достигнутых состояний.

Таким образом, можно представить процесс взаимодействия проектировщика с ЭВМ, реализующий режим диалога.

Программа диалога для решения некоторого класса задач представляет собой управляющее устройство, которое в зависимости от текущего состояния обработки при вводе проектировщиком нормированных данных дает команду для отработки определенной операции-

#### **4.4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ВИДЫ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДИАЛОГОВЫХ СИСТЕМ**

Под проблемно-ориентированной диалоговой системой (ПДС) понимается система, основной принцип построения которой заключается в научно обоснованном разделении труда проектировщика и ЭВМ, а назначение — в решении определенных классов задач проектирования СЭС. Рациональное построение ПДС возможно, если учитываются следующие основные требования пользователя (являющегося одновременно частью системы).

Процедурно-ориентированное построение диалога определяется логической последовательностью операций в процессе решения задачи.

Помощь проектировщику со стороны системы заключается в указании требуемых и допустимых данных, а также в визуализации текущего состояния процесса диалогового общения. Кроме того, ПДС должна обеспечивать возможность автоматизированной диагностики ошибок. При разработке ПДС следует обеспечить адаптивное построение режима диалога, учитывающее уровень знания пользователя о системе и объем информации, подлежащий обработке.

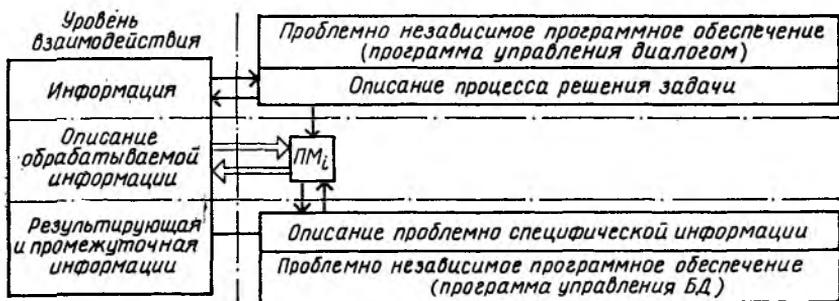


Рис. 4.9. Принцип взаимодействия пользователя с ПДС.

На рис. 4.9 показан принцип взаимодействия пользователя с ПДС с выделением уровня взаимодействия, учитывающего необходимость визуального представления управляющей, обрабатываемой и результирующей информации. На уровне управления выделяется проблемно-независимая часть программного обеспечения, представляющая собой программу управления диалогом, а на уровне БД — проблемно-независимая часть СУБД.

В процессе проектирования СЭС требуется взаимодействие проектировщика с ЭВМ. Различают два вида такого общения: автоматизированное решение задач в пакетном режиме, когда все взаимодействия заключается в пуске программы; режим диалога, когда взаимные действия и обмен информацией следуют друг за другом. Под взаимодействием понимается однократное действие человека и ЭВМ для решения задачи, а интерактивностью — несколько связанных между собой взаимодействий в ходе решения задачи.

Таким образом, требуются многократные, последовательные согласованные поочередные действия человека и ЭВМ, причем, в зависимости от хода решения конкретной задачи, один из партнеров активизирует действия другого. В то время как в автоматическом режиме работы ЭВМ вывод информации обычно выполняется один раз, при интерактивном режиме вывод реализуется многократно. Несмотря на то что затраты времени ЭВМ на организацию вывода значительны (особенно при графическом диалоге), применение интерактивного режима оправдывается за счет снижения расходов на ввод информации при периодических последовательных командах.

Можно выделить следующую последовательность общения человека с ЭВМ:

режим пакетной обработки, требующий от человека только активизации ЭВМ (пуск);

интерактивный режим с текстовым взаимодействием;

то же, с применением графического диалога (вводится как текстовая, так и графическая информация).

Частота общения:

$$f_0 = \frac{\text{количество взаимодействий}}{\text{время}}, \frac{1}{\text{мин.}}$$

Величина  $f_0$  может характеризовать скорость интерактивности.

Реализация режима диалога в ПП СЭС является не только технической проблемой, но и проблемой достигнутого в дисциплине теоретического уровня моделируемости объекта и процесса проектирования, определяемого:

степенью детализации описания ПП, его декомпозицией на элементарные операции, контролируемостью и возможностью мгновенной коррекции текущего состояния процесса обработки;

эффективной подготовкой диалога за счет выделения программных модулей с достаточно малым собственным временем вычислений и подготовки информации о текущем состоянии обработки программ;

наличием рабочих мест проектировщика, отвечающих требованиям эргономики и инженерной психологии, что позволяет поддерживать высокую скорость взаимодействия;

определением допустимой длительности интерактивной рабочей фазы с учетом специфики специальности;

организацией распределения АРМ в рабочем коллективе;

степенью разработки единого проблемного языка диалога, как основного средства общения инженера с ЭВМ;

степенью разработки адаптивных диалоговых систем, способных настраиваться на уровень подготовки проектировщика;

подготовленностью прикладных инженерно-технических программ с точки зрения требований к творческой активности проектировщика (эргономические, психологические и социально-экономические факторы).

Время ожидания является одним из важнейших факторов, определяющих эффективность диалоговой системы, и включает время:

расходуемое на передачу информации от рабочего места в центральный процессор;

обращения к базе данных (зависящее от ее структуры);

обработки программного модуля.

Важным фактором при построении диалоговой системы является выбор вида диалога, т. е. формы общения оператора с ЭВМ.

Диалог между человеком и ЭВМ состоит из двух сообщений: запроса и ответа. Если запрос поступает от человека, считают, что диалог инициируется пользователем, который должен знать необходимые процедуры и требующий объем данных.

Одним из способов, освобождающих оператора от необходимости изучения системы программных модулей, является применение диалога, инициируемого ЭВМ. В этом случае основная роль отводится не пользователю, а управляющей программе. Однако такой диалог является менее гибким, поскольку оператор должен выполнять заранее предписываемую ему жесткую последовательность действий.

Диалог, возникающий по инициативе оператора, может вестись на выбранном языке программирования, естественном языке с некоторыми ограничениями, мнемоническом языке и с использованием специальных устройств.

Диалог, возникший по инициативе ЭВМ, ведется методами выбора меню, заполнения форм и фиксированных кадров.

Обобщенная блок-схема алгоритма программно-управляемого диалога приведена на рис. 4.10.

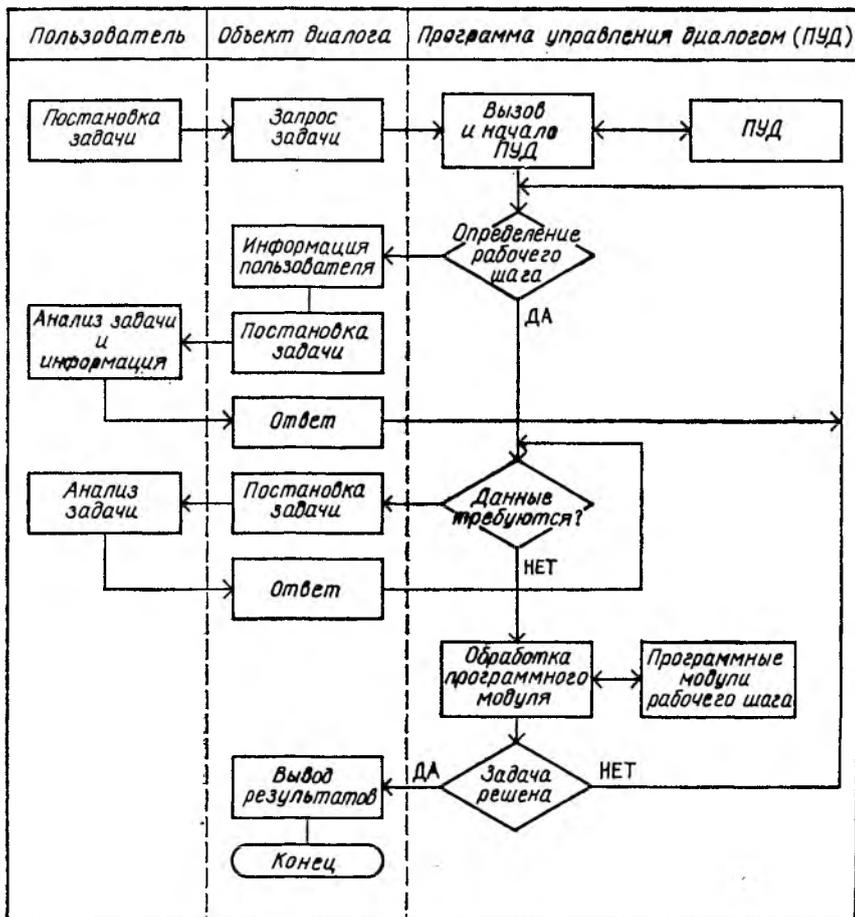


Рис. 4.10. Обобщенный алгоритм решения задач в режиме программно-управляемого диалога.

Диалог методом выбора меню заключается в том, что пользователь выбирает на экране дисплея один из предложенных вариантов. Используя этот метод, можно обеспечить достаточно полное выполнение сложных видов работ. Для применения такого вида диалога достаточно небольшой тренировки, чтобы работать без ошибок, и его целесообразно использовать для операторов, работающих с дисплеем эпизодически, например, в учебных САПР электроснабжения.

Диалог методом заполнения форм получил наибольшее распространение при обработке табличных материалов. Он сводится к тому, что изображение на экране дисплея разбивается на пассивные (постоянные) и активные (переменные) зоны. Постоянные зоны иницируются машиной, а переменные поля (свободные места) должен заполнять оператор, причем в ЭВМ передаются только знаки, внесенные оператором в активные зоны.

Диалог методом фиксированных кадров заключается в том, что ЭВМ не вычисляет ответ на запрос, а выбирает готовый из уже имеющихся ответов. Набор возможных ответов может быть довольно большим. Такой подход упрощает программирование и позволяет избежать передачи ответов от центрального процессора к рабочим местам по дорогостоящим каналам связи. Ответы могут храниться в периферийной мини-ЭВМ, расположенной вблизи дисплея или концентратора, а центральная ЭВМ путем передачи одного только кода идентификации указывает, какой ответ следует послать на дисплей. Нужный ответ в требуемой форме генерирует местная ЭВМ.

Используя этот метод диалога, важно правильно организовать хранение информации, причем наиболее удобным способом считается страничный (покадровый), когда страницы дисплейного текста хранятся в готовой для использования форме. Если в качестве периферийной памяти используются магнитные диски, систему можно спроектировать так, что новые или измененные страницы будут передаваться от центрального процессора к периферийным.

Обобщенный алгоритм диалога, инициируемого пользователем, приведен на рис. 4.11 и может быть реализован на основе следующих методов.

Диалог на языке программирования получил наибольшее распространение при разработке систем программирования. Пользователь, находясь за пультом дисплея, может отлаживать свои программы. Это дает ему ряд преимуществ: можно быстро получать результаты; отлаживать свою программу, находясь на значительном расстоянии от ЭВМ; по требованию пользователя дисплей может инструктировать его относительно правил применения языка.

Поскольку большинство пользователей, работающих за пультом дисплея, не являются профессиональными программистами, программы диалога должны быть достаточно простыми.

Диалог на естественном языке с ограничениями можно считать идеальной формой связи. Однако если нетрудно заставить машину отвечать по-русски, то чрезвычайно трудно запрограммировать ее так, чтобы она понимала текст, вводимый на естественном языке. Можно использовать для ввода в ЭВМ ограниченное число ключевых слов при условии, что эти слова используются в точно определенных смысловых значениях. Достоинство этого метода в том, что пользователь воспринимает знакомые ему слова, а недостаток — в ограниченном числе используемых слов.

Диалог на мнемоническом языке строится на мнемонических кодах пользователя и некоторых формализованных данных. Недостаток таких форм взаимодействия заключается в том, что пользователь обязан помнить все коды, число которых может быть велико. Этот недостаток усугубляется, если оператор работает на дисплее эпизодически, и тогда ему будет необходима помощь в виде списка мнемонических кодов. В некоторых вычислительных системах мнемонические коды являются операторами, аналогичными программным. Ряд языков, ориентированных на системы запроса данных, также использует мнемонические коды указанного типа. Система кодов подобна интерактивной программе, однако рассчитана на специфическое применение

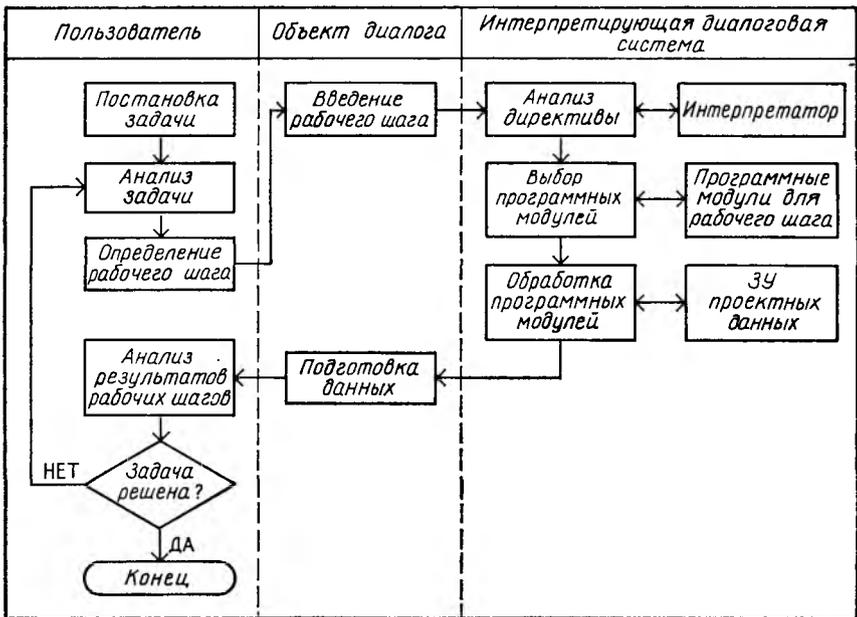


Рис. 4.11. Обобщенный алгоритм решения задач в режиме диалога, управляемого пользователем.

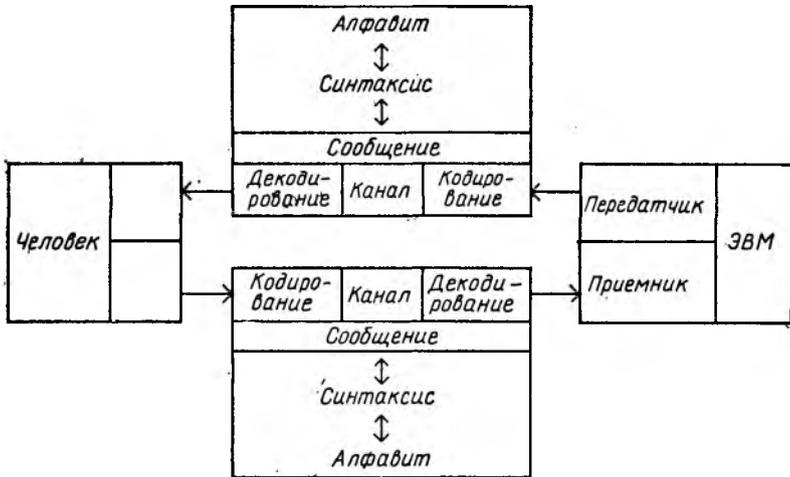


Рис. 4.12. Техника взаимодействия в режиме диалога.

и обладает гибкостью языка программирования. Такой диалог часто строится в форме обмена подпрограммами на языке программирования, применяемом при работе на том же дисплее. Обычно язык такого типа достаточно прост для изучения и применения специалистами, не являющимися программистами.

Диалог с использованием специальных устройств основан на использовании в дисплее специальных клавиш и световых индикаторов,

надписи на которых соответствуют элементам диалога. Основным недостатком подобного метода являются его высокая стоимость и малая гибкость при изменении ситуации.

Эффективность режима диалога существенно зависит от правильной организации обмена информацией, когда найдено простое и наглядное представление вводимой и выходной информации. Принцип организации взаимодействия (рис. 4.12) практически не зависит от использования формы диалога и определяется необходимостью перевода сообщений пользователя с естественного языка на машинный и обратно. Подобное представление условно и соответствует такой степени абстрагирования, когда кодирование и декодирование сообщений отвечают интерпретации шагов различных форм диалога как элементов языка высокого уровня.

Например, метод формуляров использует генерацию на экране дисплея заранее подготовленных табличных форм, в которых пользователь должен заполнить пропуски вводом численных значений. Независимо от формы диалога следует избегать ввода пользователем больших массивов информации или большого числа разнородных данных для сокращения ошибок. Поэтому метод формуляров имеет значительные преимущества при решении глубоко структурированных задач и является основой для разработки программных модулей с использованием способов формального контроля данных. Следует отметить, что применение метода меню для организации диалога потребовало бы введения многоступенчатого опроса. В случае бинарных (ДА, НЕТ) решений по каждому вопросу дерево решений получается практически необозримым для сложных задач.

#### **4.5. МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ СТРУКТУРЫ И ПРОЦЕССОВ ПДС**

Задачи уровня управления ПДС реализуются с помощью проблемно-независимого программного обеспечения и соответствующей логики, описывающей общий ход процесса проектирования.

Для разработки логики проблемно-зависимой части программного обеспечения требуются соответствующие формы описания шагов решения задачи и состояний системы. Наглядная графическая интерпретация процессов в ПДС может быть получена только при наличии форм записи, соответствующих проблеме, чего нельзя достичь с помощью таких простых средств как, например, блок-схема алгоритмов. Поэтому возникли такие формы записи, как диаграммы состояний и графы блок-схем, структура которых отвечает последовательности разработки ПДС.

#### **Метод диаграмм состояния**

Исходя из представления ПП СЭС как дискретного процесса в виде упорядоченной последовательности состояний и операций, можно реализовать его описание с помощью графа состояний. Диаграмма состояний (ДС) представляет собой специальную форму графа состояний, позволяющую описывать диалог в виде последовательности действий и реакций. При этом конкретному множеству ожидаемых действий пользователя ставится в соответствие ожидаемая реакция ЭВМ [39].

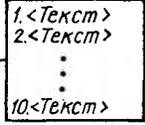
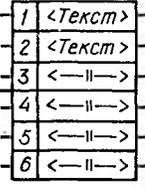
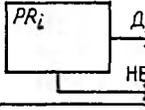
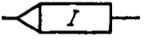
Символ	Значение	Символ	Значение
	Ситуация (текущий номер)		Операционное меню (до 10 × 16 знаков)
	Информатива (до 60 знаков)		Основное меню (ситуация)
	Функциональное меню (до 6 × 16 знаков)		Семантический модуль с выходом ДА и выходом НЕТ
	Выбор по информационной модели		Последовательность ситуаций

Рис. 4.13. Условные обозначения элементов в диаграммах состояния.

Диаграммы состояний являются удобным средством, описывающим алгоритм управления и язык диалога. Они представляют собой деревья решений, причем для конкретного состояния обработки в ходе решения задачи ДС отражает возможные варианты решения и возникающие при этом новые состояния обработки, требующие новых решений. ДС отображает одновременно укрупненный алгоритм решения задачи и может быть использована для организации управления диалогом. По имеющимся в ДС численным значениям можно формировать и обрабатывать синтаксические таблицы.

Преимущество ДС заключается в том, что они позволяют перейти от неформального способа записи алгоритма, каковым являются ДС, к формальному описанию синтаксиса специализированного языка, причем такой переход может быть выполнен автоматически.

Под диаграммой состояния понимают способ описания хода процесса, как упорядоченной дискретной последовательности состояний (оценка ситуации, ситуация диалога) и операций, причем каждому состоянию могут соответствовать одна или несколько операций, позволяющих перейти в некоторые другие состояния или остаться в том же.

ДС является формой представления языка диалога с помощью заданных элементов этого языка. На рис. 4.13 приведена символика элементов ДС, которые интерпретируются как проблемно-независимые элементы языка управления диалогом.

Для управления действия пользователя в каждой ситуации имеются следующие виды сообщений.

*Диагностическое* — текстовая информация, определяющая для пользователя текущую ситуацию.

*Информатива* — сообщение о выполняемой операции, выдаваемое на экран семантическим модулем при входе в новое состояние обработки.



Таким образом, программа диалога состоит из проблемно-независимого интерпретатора языка диалога и таблиц синтаксиса.

Для каждой ситуации формируется таблица, содержащая порядковый номер ситуации, информативу, текстовую информацию функционального меню, наименование подпрограммы, номер ситуации и действия ДА/НЕТ, а также текстовую информацию информационного меню; наименование программы, номер ситуации, выбор пользователя (ДА/НЕТ).

При переходе к новой ситуации из устройства внешней памяти вызывается новая синтаксическая таблица, которая обеспечивает отработку ситуации.

### Операторные схемы

В методе диаграмм состояний недостаточно используются возможности анализа достигнутого состояния решения задачи для управления диалогом. Это означает, что в программно-управляемом диалоге следует описывать не только обмен информацией пользователь — ЭВМ, но и взаимодействие между программой и базой данных, поскольку по состоянию базы данных и состоянию решения задачи определяется предыстория процесса решения. На процесс решения задачи оказывает влияние решение пользователя (ввод команды посредством выбора меню, функциональными клавишами), а также имеющиеся соотношения в базе данных.

Операторная схема описывает работу программы в виде

$$f : A \times P_k \rightarrow A,$$

где множество  $A$  — конечное множество операторов  $a_i \in A$ ; множество  $P_k$  — множество распределений значений вектора  $P$  с  $k$  логическими переменными.

Вектор  $P_k$  называется вектором предикатов; его элементы содержат элементарные логические высказывания о состоянии базы данных и обосновываются при реализации операторов  $a_i \in A$ . Поэтому операторы следует воспринимать и формулировать как функцию отображения множества  $P_k$ :

$$a : P_k \rightarrow P_k.$$

Функция отображения — это предикатное описание действия оператора.

С помощью множества  $A$  операторов и операторной схемы  $(A, P_k)$  могут быть описаны классы решаемых задач ( $k$ ) множеством  $(X)$  последовательностей операторов, начиная от начального оператора  $x_0$  и заканчивая конечным оператором  $x_n$ . Используются следующие основные типы операций с предикатами:

присвоение значения —  $P_i = \text{const}$ ; предикату  $P_i$  присваивается постоянное значение (начальное присвоение значения);

операция предиката с двумя переменными —  $P_i = f(P_i, P_j)$  два предиката  $P_i$  и  $P_j$  соединяются алгебраической или логической операцией, например:

$$P_i = P_i + P_j; \quad P_i = P_i - P_j; \quad P_i = P_i \vee P_j; \quad P_i = P_i \& P_j.$$

Предикат  $P_i$  обновляется в зависимости от предиката  $P_j$ , например,  $P_i =: P_j$  — выполнение абстрактной операции, в результате которой определяется значение предиката:

$$P_i = Op(P_j).$$

Абстрактная операция может быть разложена на три составляющие: значение предиката определяется решением пользователя, например, с помощью меню;

значение предиката определяется обработкой проблемно-ориентированного модуля, т. е. следует образовать значение предиката, характеризующее предпринятое и зафиксированное в базе данных изменение состояния;

значение предиката определяется обработкой последовательности операций любых основных типов и характеризуются иерархическим разделением комплексной операции на простые операции (сравнимо с подпрограммами, вызываемыми программой высшего порядка).

Если  $G = (X, Y)$  — граф состояний, то множество вершин  $X$  образуется объединением подмножеств операций предиката, которые принадлежат определенному типу операции:

$$X = C \vee F \vee B \vee R \vee E \vee G \vee END,$$

где  $C$  — подмножество операций  $P_i = \text{const}$ ;  $F$  — подмножество операций  $P_i = f(P_i, P_j)$ ;  $B$  — подмножество разветвлений в зависимости от значения предиката  $P_i$ ;  $R$  — подмножество вызываемых модулей:  $P_i = R_k(P_i)$ ;  $E$  — подмножество решений пользователя:  $P_i = E_k(P_i)$ ;  $G$  — подмножество обрабатываемых подграфов:  $P_i = G_k(P_i)$ ;  $END$  — подмножество операций для окончания обработки графа  $G$ .

Программа управления диалогом реализует процесс решения задачи как последовательность операций с предикатами по переходам, заданным графом состояний.

При разработке ПДС диаграммы состояний служат хорошим дополнением к блок-схемам алгоритмов и повышают наглядность интерпретации процесса взаимодействия пользователь — ЭВМ. Между блок-схемами и диаграммами состояний можно установить формальное соответствие (рис. 4.14). При этом элементы блок-схем рассматриваются как некоторый граф с множеством вершин  $V \subset K \cup L \cup M$  и множеством дуг  $Q \subset (K \cup L) \cup (L \cup M) \times (K \cup M)$ . Каждой вершине  $k \in K$  соответствует команда вызова операции, а каждой вершине  $l \in L$  — достигаемое после операции состояние обработки; таким образом множество  $K \times L$  отношений имеет четкое соответствие информации о выполняемой операции и характеризующей определенное состояние обработки. Соответствие операции и состояния необходимо для однозначного определения структуры процесса и для формулировки высказываний о данных, требующихся в определенном состоянии процесса обработки.

Каждой вершине  $m \in M$  соответствует информация (и состояние обработки), которая может поступать не сразу после операции  $k$ . Таким образом, множество  $M \times M$  отношений содержит описание структуры дерева решений для определения следующей операции при положи-

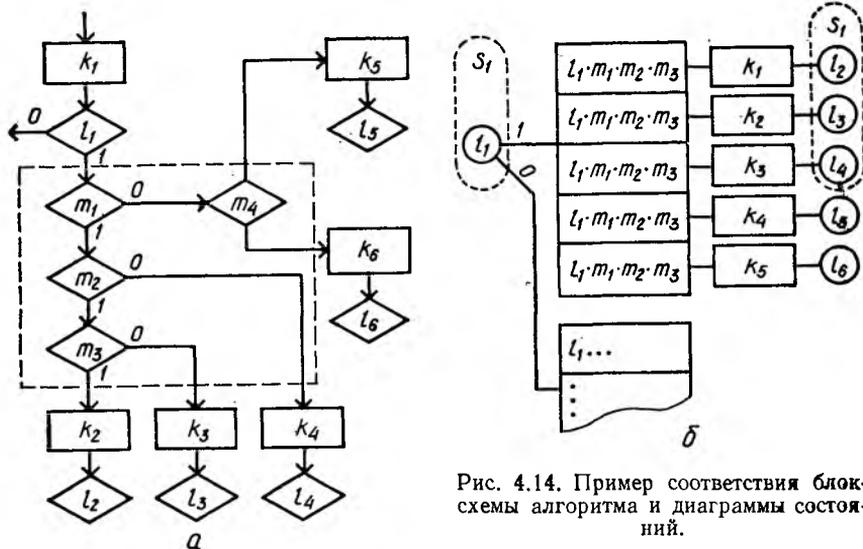


Рис. 4.14. Пример соответствия блок-схемы алгоритма и диаграммы состояний.

тельном выходе из  $L$ -вершины или описание структуры дерева ошибок (для их диагностики) при отрицательном выходе из  $L$ -вершины.

Идентификации информации с  $M$ -вершинами придается большое значение, поскольку она лежит в основе четкого разграничения множества  $M$  и множества  $S$  состояний обработки.

Использование графов блок-схем позволяет получить более точное описание процесса решения, поскольку:

шаги обращения и состояния обработки становятся идентичными, в то время как в диаграмме состояний каждой ситуации могут отвечать несколько состояний обработки;

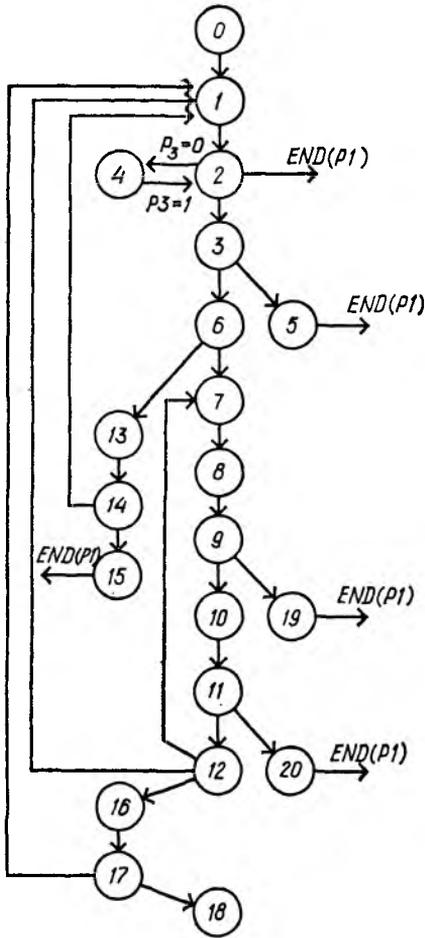
возможные в диалоговой ситуации решения типа условие — действие описываются в виде входное слово — выходное слово, тогда как в диаграммах состояния указываются только действия. Кроме того, возможен переход от граф-схемы к графу автомата, непосредственно описывающему структуру процесса. Граф автомата записывается в виде таблицы автомата, отвечающей машинному способу представления процесса решения.

#### 4.6. ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДИАЛОГОВЫМИ СИСТЕМАМИ

Преимущество применения абстрактных конечных автоматов для описания процесса управления заключается в том, что реализация программы управления не зависит от проблемной ориентации задачи, а язык конечного детерминированного автомата позволяет разработать язык команд диалоговой системы [39].

Благодаря соответствию состояний процесса обработки и операций некоторым предикатам можно описать как состояние базы данных, так и процесса взаимодействия; соответствие оценок позволяет описать определенные состояния обработки и использовать эти оценки для

Рис. 4.15. Пример описания процесса управления графом состояний.



управления диалогом. Множество предикатов учитывает определенный семантический контекст; распределение значений к определенному моменту времени  $t$  оценивается как актуальный семантический контекст.

Программа управления диалогом работает на основе предикатов. Требуются следующие операции с предикатами, которые присваивают предикату  $P_i$  определенное значение.

Присваивание начального значения:  $P_i = C$  (значение).

Присваивание с помощью решения пользователя (операция меню):  $P_i = A(P_j)$ .

Присваивание путем обработки проблемно-ориентированного модуля:  $P_i = R(P_j)$ .

Присваивание путем обработки последовательности операций:  $P_i = G(P_j)$ .

Связь предикатов с помощью алгебраических и логических операций:  $P_i = F(P_i, P_j)$ .

Процесс управления может быть представлен в виде графа состояний (рис. 4.15), при этом вершинам графа соответствуют элементарные команды.

Программа управления диалогом реализует определенный процесс решения задачи как последовательность операций с предикатами в соответствии с графом состояний. Разработке графа состояний должны предшествовать анализ задачи и разработка блок-схемы алгоритма ее решения. В табл. 4.5 приведены значения предикатов и комментарии к ним для программы управления, соответствующей рис. 4.15, описывающей управление диалогом при разработке схемы и выборе элементов распределительного устройства ГПП. При решении задачи оцениваются пусковые режимы высоковольтных двигателей, режимы группового пуска и самозапуска, а также уровни токов короткого замыкания.

При разработке ПДС выполняется описание процесса решения задачи как информационной структуры ядра системы.

Информационная структура в общем виде представляет собой принципиальную структуру определенного класса процессов решения задач, служит для описания совокупности зависимой от задачи информа-

Таблица 4.5. Значения предикатов для графа состояний (рис. 4.15)

МЕНЮ:

ВЫБЕРИТЕ НОВЫЙ РАБОЧИЙ ШАГ:

- (1) — контроль пускового режима
- (2) — расчет т. к. з.
- (3) — проверка стойкости при к. з.
- (4) — конец

Узел	Предикат	Комментарий
0	P3, P4	Присвоение начального значения
1	P1	Емешательство пользователя: присвоение значения из меню
2	P1 = 4	Возврат к предыдущему графу состояний
	P1 ≠ 4	После ситуации 3
3	P3 = 0	Имеются величины полного сопротивления
	P3 = 1	Величины полного сопротивления отсутствуют
	P3 > 1	Ошибки
4		P1 — программа расчета полного сопротивления
5	P1	Присвоение кода ошибки
6	P1 = 1	Требуется контроль пускового режима
	P1 ≠ 1	Выбран элемент меню 2 или 3
7	P4 = 0	Отсутствует значение тока к. з.
8		P3 — программа расчета токов к. з. у потребителей
9	P5 = 1	Программа P3 отработана
	P5 > 1	Программа P3 не отработана
10		P4 — программа расчета значений токов к. з. в узлах
11	P4 = 1	Программа P4 — отработана
	P4 > 1	Программа P4 — не отработана
12	P1 = 2	Возврат: задание меню
	P1 = 3	Необходима проверка стойкости при к. з.
13		P2 — программа расчета потери напряжения при пуске
14	P2 = 1	Программа P2 отработана
	P2 > 1	Программа P2 не отработана
15	P1	Присвоение кода ошибки
16		P5 — программа контроля стойкости оборудования при к. з.
17	P6 = 1	Программа P5 отработана
	P6 > 1	Программа P5 не отработана
18	P1	Присвоение кода ошибки
19	P1	Присвоение кода ошибки
20	P1	Присвоение кода ошибки

ции и хранится в файле прямого доступа. На рис. 4.16 показана такая информационная структура.

Информационная структура содержит следующие файлы.

Файл графов состояния: описание процесса решения задачи в виде графа состояния; возможно иерархическое подразделение на подграфы. Они могут вызывать друг друга и, в рамках уровня управления, описывать различные ступени детализации процесса решения задачи (отношения программа — подпрограмма).

Синтаксический файл для операций меню содержит описание синтаксиса операций меню (вызов, если ядро системы требует операции взаимобращения такого типа), а также ссылки на текстовую информацию и определяют допустимые элементы меню в виде таблицы.

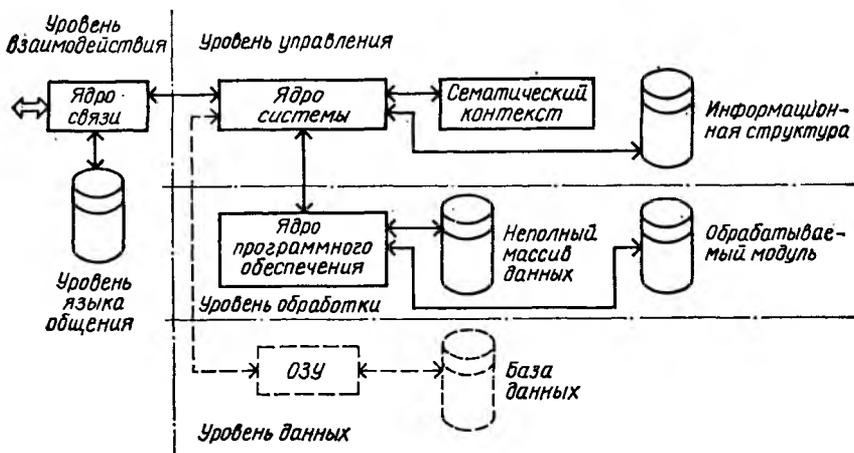


Рис. 4.16. Принцип построения проблемно-независимого программного обеспечения.

Файл текста меню содержит термины элементов меню; при ссылках на синтаксический файл текст меню соответствует одной или нескольким операциям меню.

Синтаксический файл для операций с формулярами; описание синтаксиса операций с формулярами, ссылки на текстовую информацию, а также описания параметров для ввода данных с помощью формуляров.

Файл текста формуляров содержит термины параметров, употребляемых в диалоге; ссылкой на синтаксический файл текст формуляров отвечает одной или нескольким операциям с формулярами.

Файл формата данных представляет собой описание формата списка параметров для операций формуляров; ссылкой на синтаксический файл он вызывает определенную операцию с формулярами.

Файл контрольных значений содержит заданные значения и их возможные диапазоны, доступные для формального контроля данных.

Синтаксический файл для операций вывода содержит описание операций вывода и ссылки на выводимую текстовую информацию.

Текстовый файл предназначен для выдачи диагностической информации и другой текстовой информации при выполнении всех операций взаимодействия.

Взаимодействие с пользователем осуществляется с помощью следующих операций, выполняемых системой взаимодействия (с применением накопленной в файле информационной структуры): решение пользователя методом меню (тип А), ввод данных в технике формуляров (тип Д) и вывод сообщений (тип I).

Меню содержит множество предлагаемых решений, представленных с помощью общепринятых и специальных кратких обозначений; ввод осуществляется символами, например цифрами.

## ИМЕЮТСЯ ВСЕ НЕОБХОДИМЫЕ ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ МЕНЮ

### (1) — КОНТРОЛЬ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

- (2) — ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
  - (3) — ВЫВОД ДАННЫХ
  - (4) — ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ
  - (5) — ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ
  - (6) — ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ
  - (7) — КОНЕЦ ОБРАБОТКИ
- ВЫБОР СЛЕДУЮЩЕГО ШАГА ОБРАБОТКИ

Формулятор содержит множество параметров, для которых пользователь должен задать определенные значения.

ОТСУТСТВУЮТ ТИПЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЛИ ОШИБОЧНЫ  
ФОРМУЛЯР ДАННЫХ

- (1) — ТИПА ДВИГАТЕЛЯ (. . . . .)
- (2) — НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ (. . . . .)
- (3) — РОД ТОКА (. . . . .)
- (4) —  $\cos \varphi$  (. . . . .)
- (5) — ИСПОЛНЕНИЕ (. . . . .)

ВВОД ДАННЫХ ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Расширенный элемент меню; текстовая информация, представляющая содержание или возможные последующие состояния для элемента меню.

ДАННЫЙ ТИП ДВИГАТЕЛЯ ИМЕЕТ НЕДОПУСТИМОЕ  
НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

ПОЯСНЕНИЕ (3) ВВОД ТИПА ДВИГАТЕЛЯ  
ИСПОЛЬЗОВАТЬ ВВОД ТИПА ДВИГАТЕЛЯ  
ПРОЕКТИРОВЩИКОМ

ЕСЛИ:

- ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ДВИГАТЕЛЯ ОШИБОЧНЫ
  - НУЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ИМЕЮЩИЙСЯ ТИП ДВИГАТЕЛЯ
  - ЖЕЛАЕМЫЙ ТИП ДВИГАТЕЛЯ НЕ ОПРЕДЕЛЕН
- ВЫБОР ТИПА ДВИГАТЕЛЯ. ОПРЕДЕЛИТЕ ФУНКЦИЮ

Описание параметров содержит текстовую информацию, описывающую формат и область памяти для заданного в формуляре параметра.

КОРРЕКТИРОВКА ДАННЫХ ДВИГАТЕЛЯ

ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ (3) РОД ТОКА

РОД ТОКА ВВОДИТСЯ КОДОМ

ПОСТОЯННЫЙ ТОК = 0

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК = 1

ТРЕХФАЗНЫЙ = 2

ВВОД ДАННЫХ ДВИГАТЕЛЯ

Расширенная диагностическая информация является текстовым сообщением, содержащим наряду с заданным текстом значения переменных (например, сообщения об ошибках, промежуточные результаты, ссылки на выводы для конечного результата). На основании краткой диагностической информации выбирается расширенная диагностическая информация в зависимости от состояния уровня управления.

ДАННЫЕ ДВИГАТЕЛЯ ОШИБОЧНЫ  
ДВИГАТЕЛЬ В ДАННОЙ СЕТИ НЕ ПРИМЕНИМ  
ТИП ДВИГАТЕЛЯ . . . . ПРИ НАПРЯЖЕНИИ . . . кВ  
НЕ ПРИМЕНИМ  
ИСПОЛЬЗУЙТЕ ФУНКЦИЮ «ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ»  
ИЛИ ИСПРАВЬТЕ ДАННЫЕ ФУНКЦИИ «ВВОД ТИПА  
ДВИГАТЕЛЯ»  
УЧАСТОК СЕТИ ТП-9 НЕЛЬЗЯ ВКЛЮЧАТЬ  
В РАСЧЕТ Т. К. З.  
ВЫБОР ТИПА ДВИГАТЕЛЯ ВЫБЕРИТЕ ФУНКЦИЮ

Все операции взаимодействия могут быть прерваны по желанию пользователя, т. е. в определенной ситуации можно отказаться от продолжения решения задачи, вследствие чего достигается возврат в предыдущую ситуацию, прерывание или окончание.

Ядро системы интерпретирует граф состояния. Графы состояния описывают процесс, состоящий из вызова ПМ, взаимодействия и условных разветвлений рабочих шагов.

Выбор пути в графе происходит исключительно на базе информации управления по значениям предикатов. Эта информация формируется в период отдельных рабочих шагов, накапливается в семантическом контексте ядра системы, обрабатывается и оценивается.

Для передачи информации управления программному модулю и ее подготовки с помощью ПМ выделяется место сопряжения между ядром системы и ядром программного обеспечения.

Программирование процесса обработки требует перехода от статической структуры множества отношений на базе потоков информации между обрабатываемыми модулями к динамической, определяющей условия и последовательность обработки отдельных модулей.

Модель процесса проектирования, разработанная на базе конечных абстрактных автоматов, приводит к описанию процесса решения задачи как основы для программирования алгоритма управления. Статическая структура имеет условный характер, однако она определяет множество таких допустимых отношений между обрабатываемыми модулями  $vm_i$  и последовательностью их обработки, которые служат для описания процесса решения задачи.

Соотношения между уровнями обработки и управления характеризуются тем, что на уровне управления оперируют выводами о достигнутых или достигаемых состояниях обработки  $b_i \in B$ , которые определяют условия вызова и обработки соответствующего модуля  $vm_i \in VM$ .

Выводом о состоянии обработки является оценка смысловой истинности получаемых результатов, которая, практически всегда, осу-

ществляется только человеком. Данные, появляющиеся на входе некоторого модуля  $um_i$ , представляют собой слово  $b_i^* \in B^*$ , образуемое в определенном алфавите  $Y$  с помощью функции, которая задается алгоритмом обрабатываемого модуля. В результате анализа выходных слов  $y_j^* \in Y^*$ , содержащихся в статической структуре, и определения соответствующих величин  $y_j \in Y$  происходит переход к динамической структуре — описанию задачи на уровне управления.

Основу разработки методического обеспечения при проектировании ПДС составляют математическое описание ПП и запись процессов с помощью граф-схем, графов автоматов и таблиц автоматов.

Запись процесса решения задачи (динамическая структура) с помощью граф-схем обеспечивает: возможность синтаксического контроля для формального доказательства полноты и непротиворечивости; последовательный анализ процесса решения задачи и установление точного соответствия контролируемых состояний обработки; возможность перехода к графу, а затем к таблице автоматов.

Запись процесса с помощью таблицы автоматов облегчает программирование и обеспечивает прямой переход к реализации программы управления диалогом.

## ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ В САПР

---

Основу моделирования СЭС составляет структурный синтез принципиальной схемы электроснабжения, выполняемый путем моделирования функционально-структурных отношений между элементами системы на базе теоретико-множественного подхода.

При этом обеспечивается иерархическая структура системы моделей (см. рис. 1.1), связывающих между собой функции и параметры отдельных элементов СЭС (трансформаторов, реакторов, силовых выключателей, кабельных линий) с их размещением в принципиальной схеме, чем достигается однотипность описания ПП на уровнях обработки и данных (см. рис. 4.1). Поскольку концептуальная модель предполагает использование каждого уровня модели СЭС в качестве обобщенного операнда для операций, выполняемых в ходе того или иного технологического маршрута ПП, структура модели электроснабжения должна соответствовать как структуре проектных модулей, так и структуре базы данных. Поэтому цель разработки единой модели СЭС как объекта проектирования заключается в следующем: разработка принципов и методики декомпозиции СЭС на комбинируемые схемные, конструктивные и технологические модели, допускающие возможность однотипного описания и неоднократного повторного применения в различных технологических маршрутах проектирования; обеспечение соответствия функционально-структурных описаний разработанных частей моделей СЭС их параметрическим описаниям в БД; выделение типовых структур данных и разработка нормированных проектных операций на этих структурах. Реализация поставленной цели обеспечивает принцип модульного построения САПР электроснабжения на всех уровнях ПП, что показано на рис. 5.1, представляющем собой дальнейшую конкретизацию обобщенной модели процесса проектирования (см. рис. 4.3).

Решение задачи моделирования СЭС во многом зависит от правильной организации БД. На начальных этапах применения ЭВМ в проектировании СЭС ставилась задача выполнения сложных расчетов, требующих больших затрат времени, т. е. рациональная организация собственно процесса вычислений. В настоящее время на первый план выдвинулась задача подготовки, накопления, записи в память ЭВМ и возможности обращения к большим массивам данных.

Основной принцип теоретического анализа структур данных [3] заключается в необходимости разграничения базовых и высших структур. На рис. 5.1 под основными данными  $X_1''$ ,  $X_2''$  понимаются данные базовой структуры, а результирующие данные относятся к категории высших структур. Переменные базовой структуры могут изменять толь-

ко значения, а не структуру, в результате чего соответствующее множество их значений, а следовательно, и требуемый объем памяти, сохраняется неизменным. Высшие структуры характеризуются возможностью изменения как значений параметров, так и структуры в ходе выполнения программы. К числу высших структур данных можно отнести списки, деревья, кольца, графы.

В качестве примеров базовых структур данных можно назвать простой неструктурированный тип данных (массив) и двумерный массив (поле).

Одномерный массив можно описать в виде перечисления множества всех возможных значений:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}.$$

В случае, когда между элементами множества  $C$  существуют отношения порядка, такой тип данных можно считать упорядоченным или скалярным и ввести функции, способные генерировать предшествующие или последующие элементы такого множества.

Под моделью структуры данных в дальнейшем будем понимать описание объекта проектирования с помощью базовых и сложных структур данных, причем обобщенная модель структуры данных служит местом сопряжения между подготовкой данных в соответствии со спецификой задачи и их внутримашинным представлением, размещением и разработкой.

### 5.1. ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СЭС

Понятие **ФУНКЦИЯ** отражает определенную особенность поведения СЭС или ее элемента, а именно — соответствие некоторым целевым требованиям. Под поведением обычно понимают совокупность возможных реакций любой динамической системы или элемента на внешнее воздействие.

Понятие **ФУНКЦИЯ СЭС** (или ее подсистем) означает совокупность ее возможных реакций (с их характеристиками) на внешние воздействия и определяется электрическими и информационными связями между СЭС и снабжаемыми электроэнергией производственными процессами независимо от конструктивных, технологических, экономических и других факторов.

Понятие **ФУНКЦИЯ** включает:

характеристики передачи в виде типа связи между входными и выходными величинами (статическая характеристика), например: преобразование, транспортировка, генерация;

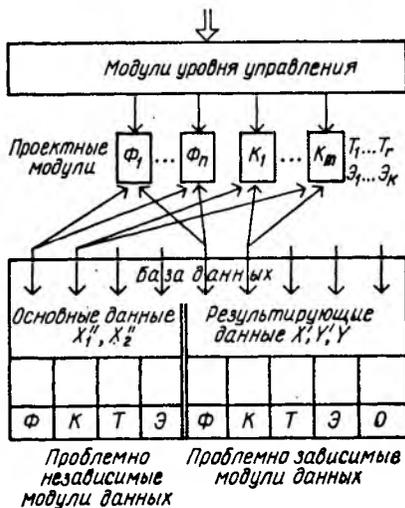


Рис. 5.1. Принцип модульной структуры САПР ЭС.

переходные характеристики в виде типа связи при переходе из одного состояния в другое (динамическая характеристика), например: процесс коммутации, пуска, самозапуска, ограничение тока при коротком замыкании.

При определении функции элемента СЭС под внешним воздействием понимают:

желательное воздействие, реализуемое путем управления в соответствии с требованиями технологического процесса (например, включение и отключение двигателя, установки), а также выполняемое устройствами релейной защиты и автоматики;

нежелательное воздействие, возникающее вследствие внешних или внутренних повреждений электрооборудования, например, появление короткого замыкания из-за механических воздействий, постепенного воздействия агрессивной среды, высокой внешней температуры, атмосферных явлений.

Основу анализа функции СЭС составляют существующие электрические и информационные связи между СЭС и соответствующими технологическими процессами СПП (см. рис. 1.5), а также возмущающие воздействия на СЭС со стороны внешней среды.

Под структурой понимают совокупность связей, существующих между отдельными элементами системы или процесса. Структура описывается множеством  $R \subseteq M \times M$  бинарных отношений на множестве элементов  $M$ .

Поскольку каждая динамическая система является носителем процесса, следует различать структуру системы (статическое описание) и структуру процесса (динамическое описание).

Процесс электроснабжения можно воспринимать и описывать как последовательность состояний СЭС во времени. Информация о возможных состояниях СЭС и их временной последовательности является основой для разработки и определения параметров элементов, образующих структуру СЭС или ее подсистем. Понятие СОСТОЯНИЕ включает совокупность значений величин, характеризующих СЭС, к определенному моменту времени.

Для анализа и описания СЭС необходимо выделить коммутационное состояние, включающее совокупность связей элементов СЭС на некотором временном интервале и являющееся основой для перехода от функции к структуре и состояния потока электроэнергии, включающего совокупность характеристик этого потока в рамках рассматриваемого коммутационного состояния. Это позволяет конкретизировать описание СЭС вплоть до выбора характеристик электрооборудования.

Под рабочим режимом СЭС понимают такую последовательность коммутационных состояний на произвольном интервале времени, при которой характеристики всех величин, описывающих как поток электроэнергии, так и параметры электрооборудования, находятся в допустимых пределах.

Для аварийного режима характерным является выход за допустимые пределы коммутационного состояния, характеристик потока электроэнергии или параметров электрооборудования.

Поток электроэнергии описывается вектором величин:

$$P_e = P_e(m, f, U, I, \varphi, \theta),$$

где  $m$  — число фаз цепи;  $f$  — частота;  $U$  — напряжение;  $I$  — ток;  $\varphi$  — угол сдвига фаз;  $\theta$  — начальный угол.

Для выбора параметров электротехнического оборудования следует рассматривать только определенные, характерные состояния  $P_e(t)$ , под которыми понимают такие, которые при непрерывном течении процесса характеризуют отношения нагрузки и прочности электрооборудования (динамические, термические, защитные).

Определение характерных состояний основывается на выделении максимальных или минимальных значений какой-либо характеристики процесса (например, тока короткого замыкания), а также времени начала или окончания коммутационного процесса, характеризующего переход от одного коммутационного состояния электрических аппаратов в схеме к другому.

Для определения параметров электрооборудования основные значения имеют следующие характерные состояния:  $t = t_0$  — отключенное состояние;  $t = t_в$  — состояние включения или начальное состояние;  $t = t_n$  — переходное состояние отключения; время  $t = t_y$  — конечное (или установившееся) состояние.

В основу разработки иерархической системы моделей СЭС положен принцип агрегирования функций отдельных элементов в функциональные блоки (ФБ1...ФБ3) и функциональные комплексы (КФБ), наглядно показанный на рис. 5.2. Иерархия функций СЭС (см. рис. 1.2) такова, что принципиальная схема для различных ее уровней оказывается описанной повторяющимися цепочками функциональных элементов. Например, функциональный блок ФБ1, описывающий схему подключения потребителя энергии, состоит из цепочки выключатель — кабель — двигатель, а функциональный блок ФБ3 образуется цепочкой элементов выключатель — кабель — трансформатор. Параметры всех элементов ФБ оказываются зависящими от характерных состояний потока энергии в блоке. Кроме того, типичными являются схемные решения, соответствующие объединению отдельных ФБ в КФБ.

Учитывая, что проектирование СЭС включает как схемотехнический, так и конструкторский аспекты, требуется обеспечить при моделировании не только описание связей типа функция — структура, но и связей структура — конструктивное исполнение. Как показано на примере комплектной трансформаторной подстанции (рис. 5.3), переход от функционально-ориентированного к конструктивно-ори-

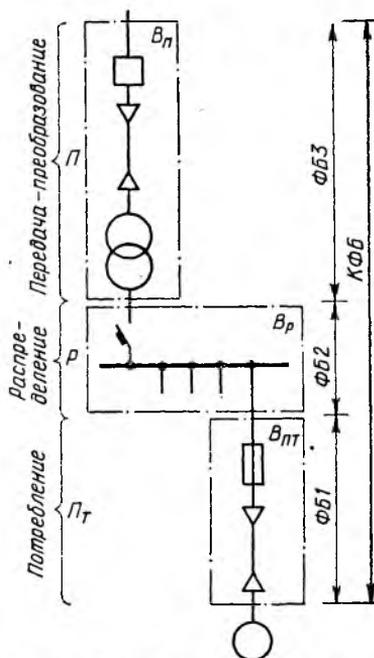


Рис. 5.2. Принцип агрегирования функций при моделировании СЭС.

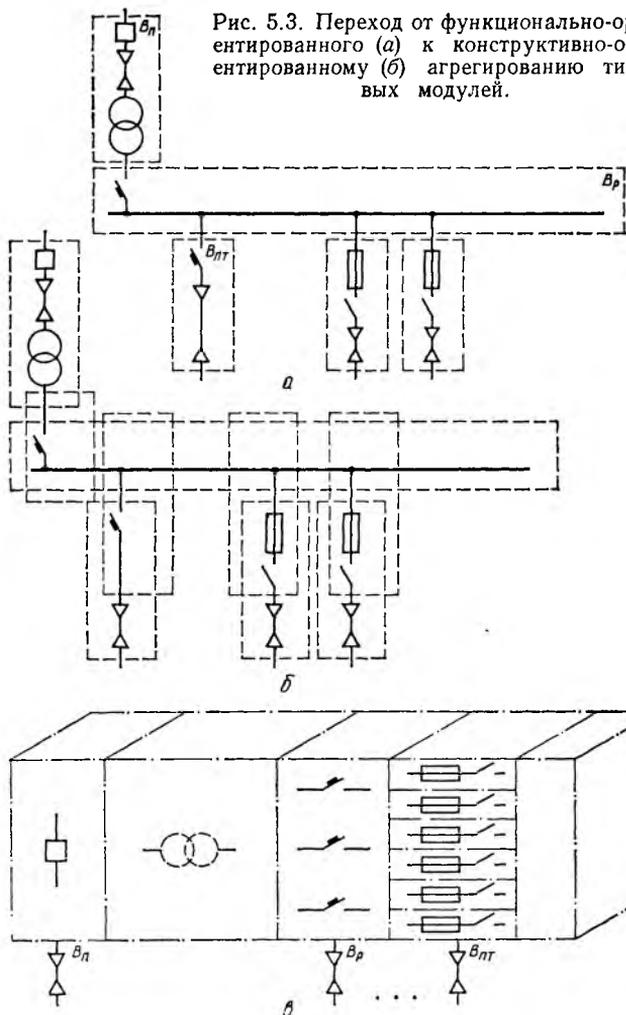


Рис. 5.3. Переход от функционально-ориентированного (а) к конструктивно-ориентированному (б) агрегированию типовых модулей.

ентированному описанию достигается за счет различного способа агрегирования функциональных элементов. Поэтому при создании моделей СЭС и построении структуры БД требуется учитывать схмотехнический, конструкторский, технологический, экономический и организационный аспекты проектирования.

Функционально-логическое моделирование подсистем СЭС можно выполнить, используя тот же математический аппарат, что и для моделирования ПП, поскольку функции и состояния СЭС можно также интерпретировать как дискретные множества. Поэтому модель подсистемы СЭС можно представить в виде конечного автомата

$$M_c = (X, Y, Q, r, s), \quad (5.1)$$

где  $X$  — множество входных величин:  $X = \{x_i; i = \overline{1, n}\}$ ;  $Y$  — множество выходных величин:  $Y = \{y_j; j = \overline{1, m}\}$ ;  $Q$  — множество со-

стояний:  $Q = \{q_i; l = \overline{1, p}\}$ ;  $r$  — переходная функция:  $r = X \times X \times Q \rightarrow Q$ ;  $s$  — выходная функция:  $s = X \times Q \rightarrow Y$ .

Для анализа любой схемы произвольного КФБ, описывающего по отношению к ЭЭС, в произвольный момент времени необходимо знать состояние источников питания (исправен — неисправен), коммутационных аппаратов (включен — отключен) и элементов, определяющих функции транспортировки, распределения и преобразования параметров потока электроэнергии. Следовательно, требуется иметь две подмодели по типу (5.1), одна из которых служит для описания структуры схемы в данный момент времени (энергетическая подмодель), а вторая — описывает структуру процесса, происходящего в схеме, и является информационной подмоделью.

Для энергетической подмодели (5.1) имеет вид

$$M_e = (X_e, Y_e, Q_e, r_e, s_e). \quad (5.2)$$

Информационная подмодель описывается аналогично:

$$M_i = (X_i, Y_i, Q_i, r_i, s_i). \quad (5.3)$$

При этом исходные множества (5.1) индексируются и получают интерпретацию в соответствии с табл. 5.1.

Условия и области сопряжения подмоделей определяются соотношениями:

$$X_{ei} = Y_{ie}; \quad Y_{ei} = X_{ie}. \quad (5.4)$$

Последовательность построения модели КФБ рассмотрим на примере работы схемы распределительного устройства (рис. 5.4, а), где обозначим:  $I1, I2$  — источники питания и их состояния;  $M1, M2$  — функциональные модули (по типу рис. 5.2) и их состояния;  $P1, P2$  — секции распределительного устройства;  $П1, П2$  — присоединения потребителей (первого и второго) и их состояния. Сделать какие-либо выводы о режиме питания потребителей ( $П1, П2$ ) можно только при наличии информации о состоянии функциональных модулей ( $I1, I2, M1, M2, P1, P2, П1, П2$ ) и коммутационных аппаратов схемы (выключатели  $B1...B7$ ), а также о величинах, характеризующих параметры потока энергии в этих элементах. В данном случае предполагается выполнение анализа состояний распределительного устройства, образованного функциональными модулями  $P1$  и  $P2$ . Это дает основание перейти от схемы рис. 5.4, а к эквивалентной схеме состояний рис. 5.4, б, где состояния на входах и выходах распределительного устройства ( $z_{11}, \dots, z_{22}$ ) выделены для наглядности. Состояние  $z_{11}$  описывает

Таблица 5.1. Интерпретация компонентов подмоделей (5.2) и (5.3)

Наименование	Описание
Множества входных величин	$X_e = X_{ee} \times X_{ei}; X_i = X_{ii} \times X_{ie}$
Множества выходных величин	$Y_e = Y_{ee} \times Y_{ei}; Y_i = Y_{ii} \times Y_{ie}$
Множества состояний	$Q_e; Q_i$
Переходные функции	$r_e = Q_e \times Q_e \rightarrow Q_e; r_i = Q_i \times Q_i \rightarrow Q_i$
Функции выходов	$s_e = Q_e \times X_e \rightarrow Y_e; s_i = Q_i \times X_i \rightarrow Y_i$

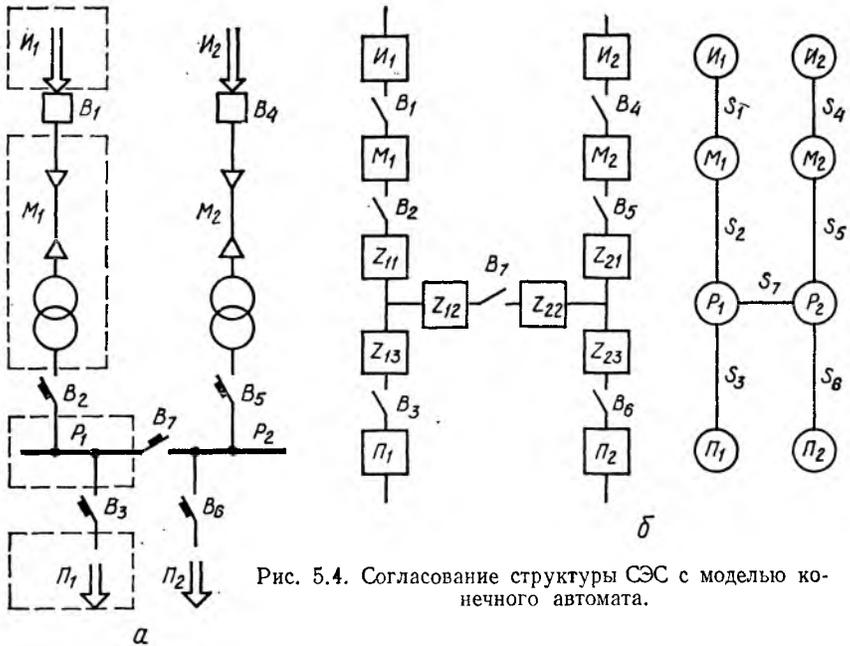


Рис. 5.4. Согласование структуры СЭС с моделью конечного автомата.

наличие или отсутствие напряжения на модуле  $P_1$  в зависимости от состояния элементов  $I_1, B_1, M_1, B_2$ , определяемого уровнями параметров потока энергии в них. Состояние  $z_{12}$  трактуется как наличие или отсутствие напряжения на модуле  $P_1$  в зависимости от состояния цепи  $I_2, B_4, M_2, B_5, B_7$ .

Остальные состояния интерпретируются аналогично, что позволяет перейти от эквивалентной схемы состояний (рис. 5.4, б) к графу состояний конечного автомата (рис. 5.4, в). При этом вершинам автомата соответствуют состояния функциональных модулей схемы, а дугам — состояния коммутационных аппаратов. Используя понятия и функции алгебры логики (прил. 3), можно построить таблицы автомата, причем табл. 5.2 описывает последовательность изменения структуры моделируемой электрической сети, а табл. 5.3 является таблицей переходов. Табл. 5.2 и 5.3 являются сокращенными, поскольку описывают поведение схемы только в зависимости от состояний  $B_2, B_7$  и  $B_5$ .

Таблица 5.2. Последовательность изменения структуры сети (рис. 5.4)

Множество состояний		$F (s_2, s_7, s_5)$			
Состояния	Описания	$s_2$	$s_7$	$s_5$	
$q_0$	$sz_0$	Отключено	0	0	0
$q_1$	$sz_1$	$I_1 \& P_1$	1	0	0
$q_2$	$sz_2$	$I_2 \& P_2$	0	1	0
$q_3$	$sz_3$	$I_1 \& P_1 \vee I_2 \& P_2$	1	1	0
$q_4$	$sz_4$	$I_1 \& P_1 \vee P_2$	1	0	1
$q_5$	$sz_5$	$I_2 \& P_2 \vee P_1$	0	1	1

Дугам графа (рис. 5.4, в) приписываются бинарные веса; для  $i$ -й дуги состояние  $s_i = 1$ , если дуга существует, и  $s_i = 0$ , если она отсутствует. Эти веса трактуются как состояния включения и отключения для соответствующих элементов схемы. Результирующий граф автомата приведен на рис. 5.5 (соответствует табл. 5.2 и 5.3).

Таким образом доказана возможность однотипного моделирования ПП и СЭС при функционально-ориентированном подходе.

Подразделение множеств входных и выходных величин на энергетические и информационные позволяет определить переходные и выходные функции автомата:

$r_{ee} : Q_e \times X_{ee} \rightarrow Q_e$  — описание реакции на электроэнергетические входные величины, например на появление тока утечки;

$r_{ei} : Q_e \times X_{ei} \rightarrow Q_e$  — описание реакции на информационные входные величины, например команды управления;

$s_{ee} : Q_e \times X_{ee} \rightarrow Y_e$  — описание результата (выхода) после воздействия электрических входных величин  $X_{ee}$ , причем различают:

$s_{ee}^e : Q_e \times X_{ee} \rightarrow Y_{ee}$  — электроэнергетическая функция выхода;

$s_{ee}^i : Q_e \times X_{ee} \rightarrow Y_{ei}$  — требуемая выходная информация;

$s_{ei} : Q_e \times X_{ei} \rightarrow Y_e$  — интерпретируется как описание выходных величин и зависимость информационных выходных величин от соответствующих состояний, причем, по аналогии с  $s_{ee}$ ,

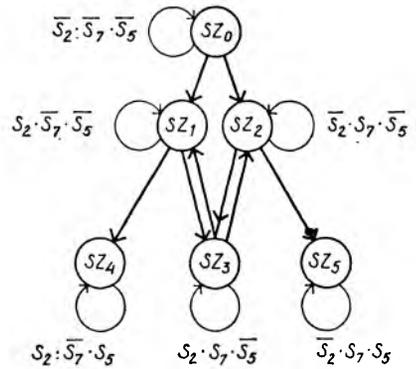


Рис. 5.5. Граф автомата при сокращенном описании электрической сети (по рис. 5.4).

Таблица 5.3. Состояния автомата для сокращенной табл. 5.2

$q_i$	$X$	$Y$	$q_j$
$q_0$	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5$	$\bar{S}_2 \cdot \bar{S}_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_0$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1$	$S_2 \cdot \bar{S}_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_1$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_2$	$\bar{S}_2 \cdot S_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_2$
$q_1$	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1$	$S_2 \cdot \bar{S}_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_1$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1 \cdot I_2$	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5$	$q_3$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1 \cdot I_2$	$S_2 \cdot \bar{S}_7 \cdot S_5$	$q_4$
$q_2$	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_2$	$\bar{S}_2 \cdot S_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_2$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1 \cdot I_2$	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5$	$q_3$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1 \cdot I_2$	$\bar{S}_2 \cdot S_7 \cdot S_5$	$q_5$
$q_3$	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1 \cdot I_2$	$S_2 \cdot S_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_1$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1 \cdot I_2$	$\bar{S}_2 \cdot S_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_2$
	$S_2 \cdot S_7 \cdot S_5 \cdot I_1 \cdot I_2$	$S_2 \cdot S_7 \cdot \bar{S}_5$	$q_3$

$s_{ei}^{\downarrow} : Q_e \times X_{ei} \rightarrow Y_{ei}$  — необходимый информационный выход;

$s_{ei}^{\uparrow} : Q_e \times X_{ei} \rightarrow Y_{ee}$  — необходимая информационная обратная связь.

На множествах  $X$  и  $Y$  в (5.1) можно выделить подмножества, элементы которых описывают потоки электроэнергии и информации во времени и в пространстве:

$$X_e = E \cup I \cup K \cup T; \quad Y_e = E \cup I \cup K \cup T, \quad (5.4)$$

где  $E$  — элементарное множество электроэнергетических величин;  $E = \{m, f, U, I, \varphi, \theta\}$ ;  $I = \{i_k; k = \overline{1, n}\}$  — элементарное множество информационных величин (входные и выходные импульсы, команды управления, измерительная информация);  $K = \{x, y, z\}$  — элементарное множество геометрических координат;  $T = \{t_j; j = \overline{1, m}\}$  — элементарное множество дискретных моментов времени, определяемых моментами времени, соответствующими характерным состояниям  $P_e(t)$ .

Все выделенные подмножества представляют собой пересекающиеся множества свойств и дают возможность описания элементарных функциональных понятий как множества отношений на указанных множествах элементарных свойств.

Множество  $Q_e$  состояний в качестве элементов содержит конечное число дискретных точек и позволяет описывать характеристики СЭС. При этом важное значение имеет инженерно-техническая интерпретация понятия состояния, рассматриваемого как множества состояний коммутационного аппарата:

$$Y_j = s(q_i, X_i).$$

На основании введенной модели  $M_e$  можно описывать как систему (СЭС), так и процессы электропотребления, поскольку:

система описывается статической характеристикой в определенном состоянии как функция выхода  $s_e : Q_e \times X_e \rightarrow Y_e$ . Это означает, что в состоянии  $q_{ei}$  входная величина  $X_{ei}$  порождает на выходе величину  $Y_{ej}$ ;

процесс описывает динамическую характеристику в виде последовательности состояний или функций переходов:  $r_e : Q_{ej} \times X_{ej} \rightarrow Q_e(j+1)$ . Это означает, что при условии  $x_{ej} \in X_e$  происходит (или должен выполняться) переход из состояния  $q_{ej}$  в состояние  $q_e(j+1)$ .

В результате появляется возможность однозначно интерпретировать переход от описания системы к описанию процесса как перехода от структуры к функции. Обратное утверждение в общем случае неверно, и обеспечить однозначный переход от функции к структуре не удастся, что и объясняет необходимость использования эвристических методов при проектировании СЭС, а следовательно, и необходимость диалоговых САПР ЭС. В то же время именно это обстоятельство является источником множественности проектных решений и обуславливает возможность оптимизации структуры СЭС по экономическим критериям.

В качестве основной формы записи для модели  $M_e$  необходимо использовать таблицы автоматов и графы, как это показано на приме-

ре (рис. 5.5). Для описания логических отношений между качественными признаками свойств  $M_e$  необходимо использовать функции алгебры логики.

## 5.2. ПРИНЦИПЫ УПОРЯДОЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ СЭС

Описание общей функции СЭС связано с ее декомпозицией на подмножества до уровня подмножеств элементарных частных функций. Значение получаемых моделей заключается в том, что в процессе проектирования подзадачи являются повторно применимыми и универсально комбинируемыми, что позволяет стремиться к иерархическому принципу их упорядочения. СЭС можно рассматривать как динамическую систему, в которой активными элементами выступают такие ее участки, где за счет направленного воздействия может произойти изменение состояния. Подобное функциональное разделение участков осуществляется функцией ВКЛЮЧЕНИЕ ( $V_p, V_r, V_{пт}$ , рис. 5.2).

Функционально-разделенные участки называются функциональными блоками. ФБ содержат цельное представление функциональных связей независимо от конструктивных, технологических, экономических и организационных факторов. С помощью понятия функциональных блоков и системы синтаксических правил могут быть описаны как питающий кабель для отдельного двигателя, так и отпайка трансформатора. Поэтому принята следующая иерархическая, функционально-ориентированная декомпозиция СЭС (рис. 5.2, 5.6).

*Функциональный блок* — ведущее понятие, которое, независимо от представленных на рис. 5.2 специфических требований ПОТРЕБЛЕНИЕ ( $P_m$ ), РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ( $P$ ), ПИТАНИЕ ( $I$ ), описывает важные характеристики функционально-разделенных участков и определяет нижний иерархический уровень. При этом модели функциональных блоков подразделяются на электроэнергетическую (ФБ-Е) и информационную (ФБ-И) части для упорядочения электроэнергетических и информационных связей между производственным

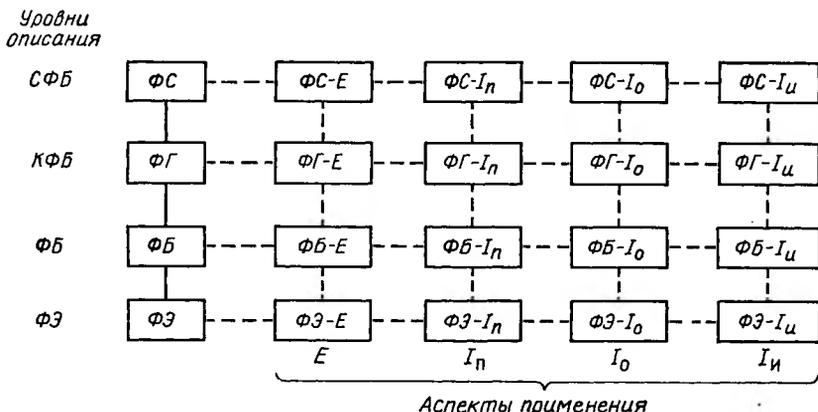


Рис. 5.6. Иерархическая декомпозиция СЭС по уровням описаний и аспектам применения моделей.

процессом и процессом электроснабжения. Определенные на основе этого понятия функции выходов  $S_{ee}$ ,  $S_{ei}$ ,  $S_{ii}$  и  $S_{ie}$  могут рассматриваться как функциональные комплексы КФБ с точки зрения агрегирования функций и повторяемости формулируемых подзадач (рис. 5.6).

ФГ-Е — электроэнергетическая часть — включение, трансформирование, транспортирование потока энергии в соответствии с требованиями снабжаемого производственного процесса.

ФГ- $I_n$  — получение информации — получение необходимой информации (данные измерений, сообщения) для ее последующей обработки.

ФГ- $I_o$  — обработка информации — обработка собранной информации (данных измерений, сообщений, команд, управления), поиск решений, причем следует различать автоматическую (например, реле защиты, автомата переключений, схемы блокировки) и неавтоматическую обработку информации.

ФГ- $I_n$  — использование информации — использование решений для управления потоком ЭЭ.

*Функциональный элемент* (ФЭ) — это минимальный функциональный блок СЭС, описывающий выполняемую в процессе электроснабжения функцию в виде элементарной характеристики. Несколько функциональных элементов комбинируются в функциональные блоки, а блоки — в функциональные группы. Таким образом, используя комбинацию этих понятий, можно подробно описать сложную функцию системы функциональных групп (ФС).

*Комплекс функциональных блоков* — это более высокий по отношению к функциональным блокам иерархический уровень, образующий функциональные группы (ФГ). Абстрагируясь от детального представления функционального блока и рассматривая функционально-разделенные участки под аспектом потребления, распределения и питания, их можно также объединить в функциональный блок высшего уровня.

По аналогии с функциональными блоками (различают ФБ-Е, ФБ- $I_n$ , ФБ- $I_o$  и ФБ- $I_n$ ) в рамках комплекса функциональных блоков могут быть созданы ФГ.

В качестве системы функциональных групп выступает комплекс функциональных блоков высшего иерархического уровня.

ФС-Е — определяет связи между ФГ-Е в их общей структуре (ординация задач при разработке структуры СЭС).

ФС- $I_n$  — определяет связи между ФГ- $I_n$  в единой структуре и обеспечивает полноту необходимой для проектирования СЭС информации.

ФС- $I_o$  — определяет связи между ФГ- $I_o$  и структуру для координации подзадач при разработке системы управления электроснабжением.

ФС- $I_n$  — совокупность ФГ- $I_n$  в единой структуре, координирующей задачи управления СЭС.

Для разработки функций выходов, описывающих статические характеристики СЭС, требуется определить:

множество ФЭ (s) элементарных выходных функций  $s_e$ , интерпретируемых как функциональные элементы;

множество  $s_i$  допустимых отношений, включающих правила композиции функциональных элементов и трактуемых как описание структуры системы.

Функция выхода  $s_i: Q \times X \rightarrow Y$  характеризуется парой  $(x_i, y_i) \in X \times Y$  относительно определенного состояния  $q_i \in Q$ ; произведение множеств  $X \times Y$  содержит условия подключения в качестве входных величин  $x_i \in X$  и требования потребителей в качестве выходных величин  $y_i \in Y$ . Элементарная функция выхода характеризуется тем, что имеет лишь одно состояние (комбинированная схема). Это разложение комплексной выходной функции  $s$  предполагает определение элементарных выходных функций  $s_i$  как комбинируемых элементарных систем типа вход — выход (см. прил. 2).

Множество  $\Phi\Theta(s)$  элементарных выходных функций  $s_i$  определяется как множество всех пар  $(x_i, y_i) \in X \times Y$  и записывается в виде:  $\Phi\Theta(s) \subseteq X \times Y$ .

Определяя множество входов и выходов в виде описания:

$$\begin{aligned} X &= E(x) \cup I(x) \cup K(x) \cup T(x); \\ Y &= E(y) \cup I(y) \cup K(y) \cup T(y), \end{aligned} \quad (5.5)$$

можно образовать такие подмножества, которые будут описывать функции выходов:

- $s_1$  — преобразование  $I_e = E(x) \times E(y)$ ;
- $s_2$  — получение информации  $I_n = E(x) \times I(y)$ ;
- $s_3$  — использование информации  $I_u = I(x) \times E(y)$ ;
- $s_4$  — обратная связь по информации  $I_0 = I(x) \times I(y)$ ;
- $s_5$  — передача на расстояние  $\Pi = K(x) \times K(y)$ ;
- $s_6$  — запаздывание  $T_t = T(x) \times T(y)$ .

Функции  $I_n$ ,  $I_u$  и  $I_0$  эффективны в подмоделях типа ФБ- $I$ ; в подмоделях ФБ- $E$  их интерпретируют как описание постановки задачи и реализацию связей между электроэнергетической и информационной частями.

Для логической связи элементарных функций выходов требуется дополнительно ввести функции:

- $s_7$  — объединение —  $\bigvee E = (X_1 \times X_2) \times Y$ ;
- $s_8$  — разветвление —  $\bigvee Z = X \times (Y_1 \times Y_2)$ .

Эти подмножества элементарных функций описывают классы функциональных элементов, отмеченные соответствующими наименованиями. В табл. 5.4 приведены условные обозначения функций выходов ( $s_1 \dots s_8$ ) для энергетических функций трансформирования и передачи электроэнергии, их соответствие определению множеств входных и выходных величин по (5.4). В табл. 5.5 показан принцип бинарного соответствия при установлении численных значений для функций выхода.

Подмножество ФБ- $E(s)$  должно описывать возможные функции выхода типа ПРЕОБРАЗОВАНИЕ; используя  $E(x) = \{m, f, U, I, \varphi, \theta\}$ , можно образовать следующие элементарные функции выхода для ФБ- $E$ :

- $(m_x, m_y)$  — изменение числа фаз ( $F_m$ );
- $(f_x, f_y)$  — изменение частоты ( $F_f$ );
- $(U_x, U_y)$  — изменение напряжения ( $F_u$ );

$(I_x, I_y)$  — изменение тока ( $F_I$ );  
 $(\varphi_x, \varphi_y)$  — изменение фазового угла ( $F_\varphi$ );  
 $(\theta_x, \theta_y)$  — изменение угла нагрузки ( $F_\theta$ ).

Эти описания отображают качественные свойства элементов СЭС, характеризующиеся соответствующими количественными значениями.

Для разработки переходных функций, описывающих динамические характеристики СЭС (процесс электроснабжения), необходимо определить множества:

$\Phi\mathcal{E}(r)$  элементарных переходных функций  $r_i$ , которые интерпретируются как функциональные элементы  $r_i \in \Phi\mathcal{E}(r)$ ;

$R$  допустимых отношений, которое включает правила композиции функциональных элементов и трактуется как описание структуры процесса.

Таблица 5.4. Определение множества функций выходов ( $s_1 \dots s_8$ ) для энергетических функций трансформирования и передачи потока энергии

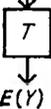
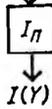
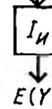
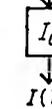
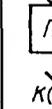
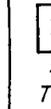
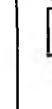
Множество $\Phi\mathcal{E}(s)$ элементарных функций выходов							
$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$
$E(X)$  $E(Y)$	$E(X)$  $I(Y)$	$I(X)$  $E(Y)$	$I(X)$  $I(Y)$	$K(X)$  $K(Y)$	$T(X)$  $T(Y)$	$x_1, x_2$  $Y$	$X$  $Y_1, Y_2$
Трансформирование	Получение информации	Использование информации	Обратная связь по информации	Передача в пространстве	Запаздывание	Объединение	Разветвление

Таблица 5.5. Численные значения для функций выхода

Множества всех подмножеств электроэнергетических величин							Подкласс функциональных элементов $\Phi\mathcal{E}(s)$	Краткое обозначение
$m$	$f$	$U$	$I$	$\varphi$	$\theta$	Трансформация	$T$	
1	0	0	0	0	0	Число фаз	$F_m$	
0	1	0	0	0	0	Частота	$F_f$	
0	0	1	0	0	0	Напряжение	$F_U$	
0	0	0	1	0	0	Ток	$F_I$	
0	0	0	0	1	0	Фазовый угол между $U$ и $I$	$F_\varphi$	
0	0	0	0	0	1	Угол под нагрузкой между $U_1$ и $U_2$	$F_\theta$	
0	0	1	1	0	1	Напряжение, ток, сдвиг фаз, (при описании силового трансформатора)	$F_{UI\theta}$	
1	1	1	1	0	0	Количество фаз, частота, напряжение, ток (при описании выпрямителя)	$F_{mfUI}$	

Переходная функция  $r_i: Q \times X \rightarrow Q$  характеризуется парой  $(q_i, q_j) \in Q \times X$ , определяемой входной величиной  $x_i \in X$ . Произведение множеств  $Q \times X$  содержит описание процесса в виде последовательности состояний. Элементарная переходная функция характеризуется двумя состояниями и условиями, при которых осуществляется переход из одного состояния в другое. Для декомпозиции комплексной переходной функции  $r$  следует определить элементарные переходные функции в виде комбинаций элементарных автоматов (см. прил. 2)

Множество  $\Phi\mathcal{E}(r)$  элементарных переходных функций  $r_i$  определяется как множество всех пар  $(q_i, q_j) \in Q \times X$  в зависимости от появления входных величин  $x_i \in X$  и записывается в виде  $\Phi\mathcal{E}(r): Q \times X \rightarrow Q$ .

Функция  $r_1$  — включение  $B: q_i \xrightarrow{x_i} q_j$ .

В зависимости от возможных операций сравнения «=», «>» и «<» можно определить другие элементарные переходные функции, определяющие следующие решения функций:

$r_2$  — решение «=»  $E: q_i \xrightarrow{x_i=X} q_j$ ;

$r_3$  — решение «>»  $E: q_i \xrightarrow{x_i > X} q_j$ ;

$r_4$  — решение «<»  $E: q_i \xrightarrow{x_i < X} q_j$ .

Эти подмножества элементарных переходных функций трактуются как классы функциональных элементов с согласованными наименованиями, обозначения которых приведены в табл. 5.6, а в табл. 5.7 и 5.8 приведены соответственно определение переходных функций подкласса КОММУТАЦИЯ и принцип присвоения им бинарных значений.

Подмножество  $K_m \subseteq \Phi\mathcal{E}(r)$  должно описывать возможные переходные функции класса коммутации, в котором при достижении определенного состояния  $q_i \in Q$  образуются следующие элементарные переходные функции:

$q_0 \xrightarrow{BK} q_1$  — только включение (BK);

$q_1 \xrightarrow{OK} q_0$  — только отключение (OK).

Таблица 5.6. Условные обозначения для подмножеств переходных функций  $r_i$

Множество $\Phi\mathcal{E}(r)$ элементарных переходных функций $r_i$			
$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$
Коммутация	Решение «=»	Решение «>»	Решение «<»

Таблица 5.7. Определение переходных функций подкласса «коммутация»

$q_i$	$X$	$Y$	$q_j$
Выкл.	Включение	Включено	Вкл.
Вкл.	Включение	Включено	Вкл.
Вкл.	Выключение	Выключено	Выкл.
Выкл.	Выключение	Выключено	Выкл.

Таблица 5.8. Установление численных значений  $K_M$

Множество переходов состояний		Подкласс функциональных элементов $K_M$	Краткие обозначения
Вкл.	Выкл.	Коммутация	$K$
1	0	Только включение	$BK$
0	1	Только выключение	$OK$
1	1	Включение и выключение	$BKO$

Эти элементы также описывают качественные свойства, которые можно характеризовать соответствующими численными значениями. Свойства описываются элементами множества  $E(X)$ .

### 5.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЭС НА ЭТАПЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Адекватное описание соответствия структуры и функции подсистем СЭС возможно путем разработки математического аппарата, аналогичного алгебре логики, применяемой при разработке схем управления (прил. 3).

Формализация описания на основе алгебры высказываний основывается на теоретико-множественном представлении модели объекта проектирования и позволяет разработать единую систему описаний для различных этапов ПП. В процессе проектирования проектировщик работает с высказываниями об определенных свойствах проектируемой установки. Например, элементарные функции, описанные ранее, представляют собой высказывания о свойствах элементов. Получением заключения о множестве допустимых связей этих элементарных функций определяется формальный переход от функции к структуре. При этом связь отдельных высказываний посредством логических операторов должна обеспечивать описание комплексных свойств электротехнических установок. При переходе к конкретным схемам требуется доказать, что между логическими связями высказываний и их технической интерпретацией имеется соответствие (не обязательно однозначное).

Высказывания о свойствах, из которых следует их истинность или ложность, образуют Булеву алгебру, если для них введены функции и описаны свойства, приведенные в прил. 3.

С точки зрения логики высказываний совершенно не имеют значения вид и наличие причинно-следственной связи между высказываниями. Интерпретация выражений на языке алгебры высказываний с помощью реализуемых коммутационных функций (в классе ФБ-Е) и их условные обозначения приведены в табл. 5.9.

В качестве описания множества элементов  $M$  принято:

$$M = \{A, V, B, E\}.$$

Интерпретация логических операций приводит к описанию следующих важных свойств (табл. 5.9):

$A$  — функциональный участок структуры необходим, надежно функционирует (либо может быть включен);

$\bar{A}$  — нет необходимости в данном участке, он ненадежен (либо его нельзя включить).

Если переменные оцениваются значениями 0 и 1, то можно численно оценить истинность высказываний, например:

$$\begin{array}{cccc} F(A) = 1; & F(A) = 0; & F(A) = 1; & F(A) = 0. \\ \text{верно} & \text{неверно} & \text{неверно} & \text{верно} \end{array}$$

Высказывание  $F(A, V) = 1$  верно, если  $f(A) = 1$  и  $f(V) = 1$ , а техническая интерпретация в виде последовательного соединения участков указывает на принципиальную необходимость обоих участков в структуре.

Высказывание  $F(B1 \vee B2)$  верно, если  $f(B1) = 1$  или  $f(B2) = 1$ , а техническая интерпретация в виде параллельного соединения указывает на то, что в структуре принципиально необходим хотя бы один из этих участков.

При анализе схем электроснабжения часто требуется учитывать однократные отказы (например, выход из строя одного из двух источников питания), что можно записать в виде

$$f(B_1, B_2) = \bar{B}_1 B_2 \vee B_1 \bar{B}_2. \quad (5.6)$$

Тогда для функции  $F(B)$  можно получить решение в виде:  $F(\bar{B}_1 B_2 \vee B_1 \bar{B}_2) = 1$ ; это решение справедливо в случае, когда  $f(B_1) = 1$  или  $f(B_2) = 1$ .

Техническая реализация в виде параллельных участков сети (или элементов) подразумевает избыточность. Поскольку техническая реализация схем с отрицательными переменными невозможна, она осуществляется путем блокировок (в классе ФБ- $I_0$ ). Можно реализовать следующие частные функции:

$$f'(B_1, B_2) = B_1 \vee B_2;$$

$$f''(B_1, B_2) = \bar{B}_1 B_2 \vee B_1 \bar{B}_2.$$

В качестве комплексной результирующей функции

$$\begin{aligned} F(B_1, B_2) &= f'(B_1, B_2) \& f''(B_1, B_2) = (B_1 \vee B_2)(\bar{B}_1 B_2 \vee B_1 \bar{B}_2) = \\ &= \bar{B}_1 B_2 \vee B_1 \bar{B}_2. \end{aligned}$$

Таким образом, описание функционально-структурных связей возможно с помощью логических операций алгебры высказываний.

Таблица 5.9. Интерпретация высказываний и принимаемые обозначения

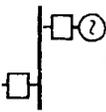
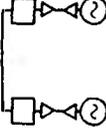
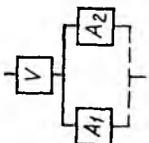
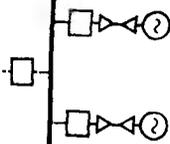
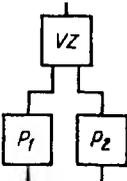
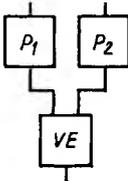
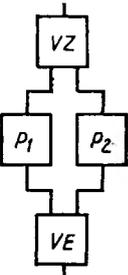
Логическая операция	Высказывание о свойствах			Схемное соответствие	
	Поведение	Надежность	Поток энергии	Абстрактное	Конкретное
$A$	Требуется	Должно быть на- дежно	Должен существовать		
$\bar{A}$	Не требуется	Не надежно	Может не существо- вать		
$A \& B$	требуются $A$ и $V$	$A$ и $V$ должны быть на- дежны	Должен существовать в $A$ и $V$		
$A_1 \vee A_2$	или требуются	или должны быть надежны	Должен существовать в $A_1$ или $A_2$		
$(A_1 \vee A_2) \& V$	и и/или требуются	$A_1$ и $V$ или $A_2$ и $V$ должны надежны	Должен существовать в $A_1$ и $V$ или в $A_2$ и $V$		

Таблица 5.10. Обозначение и запись функций логики для последовательного и параллельного соединений элементов

Представление	Последовательное соединение	Параллельное соединение		
		Частичное	Полное	
Функциональной схемы				
Форма записи в алгебре логики	$S = P \cdot T$	$VZ [P_1 \vee P_2]$	$[P_1 \vee P_2] VE$	$VZ [P_1 \vee P_2] VE$

Описание инвариантных во времени материальных связей СЭС эквивалентно описанию функции выхода и должно отражать следующие положения:

связь элементарных понятий с комплексными (обобщенная функция  $F_{(E,I)}$ );

описание структуры путем целенаправленной интерпретации логических операторов на основе алгебры высказываний (теории предикатов), что позволяет отобразить функционально-структурные связи в виде графа и занести его в память ЭВМ;

используя переменные  $\{0,1\}$ , можно оценить истинность того или иного высказывания, а следовательно, того или иного схемного решения;

$f_3 = P_1 \& P_2$  — конъюнктивная связь, показывающая необходимость совместного использования двух функций, что интерпретируется как последовательное соединение элементов;

$f_4 = P_1 \vee P_2$  — дизъюнктивная связь показывает, что необходимы либо обе функции, либо только одна из них и интерпретируется как параллельное соединение. Учитывая ранее определенные функции  $VZ$  и  $VE$ , параллельное соединение возможно также описать в виде табл. 5.10 и соответствующих выражений:

$$f_4 = VZ \cdot [P_1 \vee P_2];$$

$$f_4 = [P_1 \vee P_2] \cdot VE;$$

$$f_4 = VZ \cdot [P_1 \vee P_2] \cdot VE.$$

На рис. 5.7 показан пример использования логических функций при разработке структурной схемы электроснабжения при реализации ее передаточной функции за счет последовательного соединения элементов с функциями ТРАНСПОРТИРОВКА ( $P$ ), ТРАНСФОРМАЦИЯ ( $T$ ) и РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ( $P$ ).

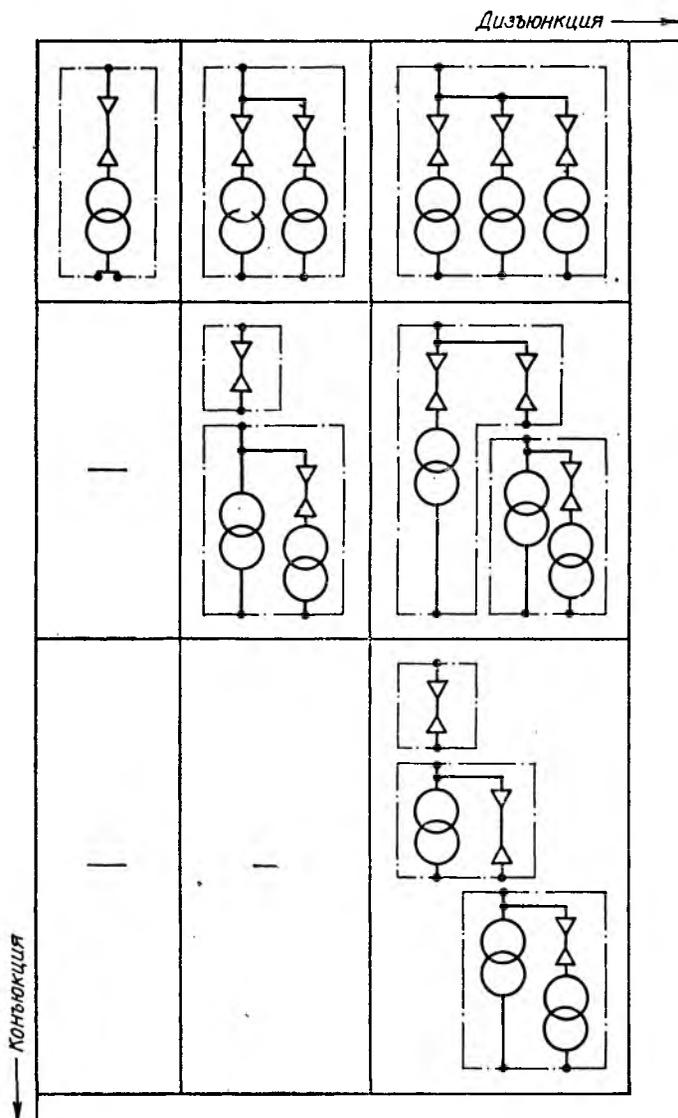


Рис. 5.7. Логические функции при описании уровней агрегирования схем (дизъюнктивное и конъюнктивное расширение понятий).

Аналогично можно построить комплексную функцию на основе параллельного соединения одинаковых элементарных функций

$$s_{12} = VZ \cdot [P \cdot T \cdot VZ \vee P \cdot T \cdot VZ].$$

Можно записать подобным образом и комбинированную комплексную функцию:

$$s_{22} = VZ \cdot [P \cdot T \vee P \cdot P \cdot T] = P \cdot VZ [T \vee P \cdot T].$$

Таким образом, используя основные законы алгебры высказываний, можно конструировать связи, позволяющие описывать новые высказывания о комплексных свойствах.

Закономерности образования классов и подклассов ФБ определяются законами комбинаторики и могут быть сформулированы на основе алгебры высказываний.

Комбинация реализуется объединением ФЭ в группы, и с учетом свойства коммутативности логических функций можно получить новые варианты с повторениями или без них.

Описанием всех возможных для конкретной схемы коммутационных состояний получается множество вариантов, общее количество которых не имеет принципиального значения, поскольку на практике реализуются далеко не все из них. В случае, если появляются новые элементы ФЭ, реализующие новые функции, их параметры также можно внести в соответствующие массивы — банк структур. Практическую ценность имеют те закономерности образования ФБ, которые позволяют систематизировать вычислительные операции и организовать ПП.

Множество классов ФБ-1 (1-го уровня) представляет собой подмножество множества ФЭ, для которого не устанавливается точная последовательность включения ФЭ (поскольку она безразлична), но вводится частичное упорядочение. Элементы  $P_1$  и  $P_2$ , необходимые для описания функции РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, появляются в классе ФБ-1 всегда на первом или последнем месте, что необходимо учитывать при образовании комбинаций классов более высоких уровней. Множество классов второго уровня (ФБ-2) представляет собой произведение множеств класса ФБ-1.

В общем случае номер уровня более высокого класса определяется числом образующих классов более низких степеней ( $1 + 1 \rightarrow 2$ ;  $1 + 2 \rightarrow 3$  и т. д.). Практическое значение классов ФБ-1 заключается в характере их модулей, поскольку эти классы служат для образования и упорядоченного хранения в базе данных информации, необходимой для многократного повторного использования в качестве типовых решений. Образование системы модулей значительно сокращает полное число возможных комбинаций при описании функционально-структурных отношений, причем способ комбинирования по характеру близок к способу мышления проектировщика.

Определенные классы ФБ следует упорядочить в виде множества отношений. При этом ФБ-1 представляет собой множество отношений на множестве ФЭ ( $s$ ) элементарных передаточных функций. Класс ФБ- $i$  ( $i$ -го уровня) следует рассматривать как множество отношений на множестве отношений, образованном классом ФБ- $(i - 1)$ .

Практическое значение такого подхода состоит в том, что эти отношения рассматриваются как повторно применимые и комбинируемые частные решения. Эти детерминированные отношения характеризуют модульный принцип композиции схемы СЭС и позволяют разработать алгебру проектирования.

Функционально-структурные отношения формулируются и описываются в соответствии с правилами алгебры высказываний. Базисная структура основывается на функциональных требованиях постановки

задачи:

$$s_{11} = P \& T \& V.$$

Функционально-подобные варианты могут порождаться на основе свойств коммутативности, дизъюнктивности и конъюнктивности.

На основании свойства коммутативности

$$P \cdot T \cdot V = T \cdot P \cdot V.$$

В случае, если  $V$  участвует в перестановках, порождается ФБ-класс 2-го уровня и происходит разделение на два одинаковых функциональных выражения:

$$P \cdot VZ \cdot [T \vee T]; \quad VZ [P \cdot T \vee P \cdot T];$$

$$T \cdot VZ [P \vee P]; \quad VZ [T \cdot P \vee T \cdot P].$$

Функция  $VZ$  в языке алгебры высказываний характеризует ограничения ФБ-классов 1-го уровня и позволяет выполнить их декомпозицию для образования типовых решений.

На основании правила идемпотентности дизъюнкции можно получить функцию:

$$s_{12} = VZ [P \cdot T \vee P \cdot T].$$

При разработке структуры СЭС применение этого правила необходимо в тех случаях, когда для требуемой обобщенной функции не существует известного единственного технического решения (например, необходимость расщепления блока линия — трансформатор на две параллельные ветви при большой мощности), т. е. тогда, когда требуется расчленение на несколько функционально-однотипных узлов или блоков.

Аналогично можно получить функцию  $S_{13}$ :

$$s_{13} = VZ [P \cdot T \vee P \cdot T \vee P \cdot T].$$

Используя правило идемпотентности конъюнкции, можно реализовать последовательное объединение функций. При этом большое значение имеют следующие частные случаи: конъюнктивная связь функции  $VZ$  приводится к виду

$$V = \hat{i}V.$$

Конъюнктивная связь ФБ-классов 1-го уровня приводит к образованию цепочки вида

$$P \cdot VZ = P \cdot VZ [\dots VP \cdot VZ [\dots \vee \dots]].$$

Требование избыточности (для  $TP$ ,  $TF$ ) приводит к использованию правила идемпотентности дизъюнкции:

$$s_{21} = VZ [P \cdot T \vee P \cdot T].$$

На основании правила идемпотентности конъюнкции для  $TP$  можно получить

$$s_{22} = P \cdot VZ [T \vee P \cdot T].$$

Таким образом, получено выражение для магистральной схемы сети, например, при подключении нескольких КТП последовательно под один выключатель.

Разработка  $s_{33}$  выполняется аналогично на основании  $s_{13}$ :

$$s_{13} = VZ \cdot [P \cdot T \vee VZ \cdot [P \cdot T \vee P \cdot T]].$$

Откуда

$$s_{33} = VZ [P \cdot T \vee P \cdot T] = P \cdot VZ [T \vee P \cdot T].$$

Далее получаем

$$s_{33} = VZ [P \cdot T \vee P \cdot T \cdot VZ [T \vee P \cdot T]].$$

Применим правило идемпотентности конъюнкции для TP:

$$s_{33} = VZ [P \cdot T \vee P \cdot P \cdot VZ [T \vee P \cdot T]].$$

Или иначе

$$s_{33} = P \cdot VZ [T \vee P \cdot VZ [T \vee P \cdot T]].$$

Интерпретация функционально-структурных связей в терминах алгебры высказываний при разработке избыточных структур или их сокращении наиболее полно отражает особенности мышления инженера-проектировщика. Критерием решений при таком способе разработки структуры СЭС служит возможность ее технической реализации на основе номенклатуры выпускаемых изделий.

#### 5.4. ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТРУКТУРНЫХ СВЯЗЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫХ (КОММУТАЦИОННЫХ) ФУНКЦИЙ АЛГЕБРЫ ЛОГИКИ

Полное описание коммутационной функции должно включать как инвариантные во времени физические связи, описываемые передаточными функциями  $\hat{F}_{(E,N)}$ , так и изменяющиеся во времени связи, т. е. возможные связи отдельных функционирующих элементов.

Описание коммутационных функций ведется с использованием функций  $s_i$ , реализующих во времени переменные связи  $F_{(E,N)}$ .

Коммутационные функции могут быть описаны с помощью графов двумя способами. Первый способ предполагает запись функции в вершинах графа:

$$F(s_i) = 1;$$

$$SF'_1 = A_1 V_1 (B_1 \cdot E_1 \vee V_2 s_2 E_2).$$

При условии, что все выключатели схемы включены  $F(s_i) = 1$ , величина коммутационной функции зависит только от значений переменных  $A_i$ ,  $V_i$ ,  $B_i$  и  $E_i$ . Она описывает при этом все возможные пути потока энергии между источниками питания и потребителями. На основе этой функции возможно описание состояний схем распределительных устройств и СЭС, а также контроль работоспособности этих схем.

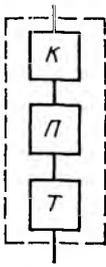
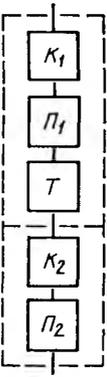
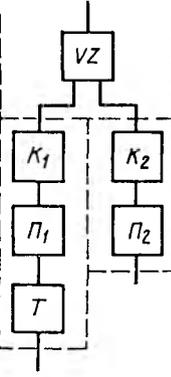
Второй способ предполагает соответствие коммутационных функций с дугами графа (функция ВКЛЮЧЕНИЕ):

$$F(s_i) = 1;$$

$$SF''_1 = s_3 (s_2 s_1 \vee s_7 s_5 s_4).$$

При условии, что все участки схемы функционируют, значение коммутационной функции определяется только значениями переменных

Таблица 5.11. Интерпретация логических операторов для переключательных функций

Представление	Исходные блоки ФБ	Последовательное соединение	Параллельное соединение
Функциональной схемы			
Форма алгебры SF логики	$K \& [П \& Т]$	$K_1 \& [П_1 \& Т] \& K_2 \& П_2$	$K \& [П_1 \& Т] \vee K_2 \& П_2$

$s_i \in SF_1^*$ , что позволяет описывать существующее коммутационное состояние и может служить для оценки характеристик схемы.

Интерпретация логических операторов при алгебраическом описании коммутационных функций приведена в табл. 5.11.

Конъюнктивная связь означает последовательное включение:

$$SF = s_1 [П_1 \& Т_1] \cdot s_2 \cdot [\vee T_1] = s_1 [B_1] \cdot s_2 [B_1].$$

При условии  $s_i = 1$  можно получить упрощенное описание в виде

$$SF = B_1 \cdot V_1.$$

Дизъюнктивная связь описывает параллельное включение элементов

$$SF = S_1 [П_1 \& Т_1] \vee S_2 \cdot [П_2 \& Т_2] = S_1 [B_1] \vee S_2 [B_2].$$

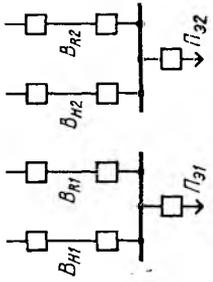
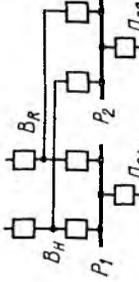
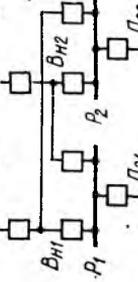
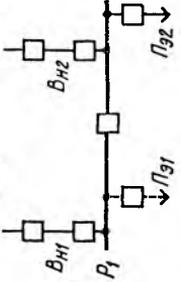
При упрощении получается (при  $s_i = 1$ ):

$$SF = B_1 \vee B_2.$$

В табл. 5.12 представлен фрагмент разработки схемы распределительных устройств, причем связи между  $B$ ,  $V$ ,  $A$  могут быть описаны в виде частных связей  $V \rightarrow A$  и  $B \rightarrow \bar{B}$ , что позволяет выполнять анализ частных подзадач: например, требуются ли потребителю две системы сборных шин и можно ли от данного источника питать обе системы шин.

В настоящее время пока еще не существует формализованного метода разработки схемы распределительных устройств. Процесс разработки схемы РУ основан скорее на интуиции, опыте и эвристических способностях проектировщика, что и определяет качество разработанной схемы. Основной момент разработки схемы РУ заключается

Таблица 5.12. Пример разработки схемы РУ на основе переключательных функций

<p>Ввод</p> <p><math>P_{3l} = 2; F(B_l) = 0; F(P_l) = 1</math></p> <p>Опрос возможных правил сокращения</p> <p><math>B_{н1} = B_{н1}; B_{Rl} = B_R;</math></p> <p><math>B_{Rl} = B_{н1} + 1</math></p> <p>Ввод: <math>B_{Rl} = B_{н1} + 1; P_{н1} + 1</math></p>	<p>Операции</p> <p><math>P_{3l} = P_l \cdot (\overline{B_{н1}} \cdot B_{Rl} \vee B_{н1} \cdot \overline{B_{Rl}})</math></p>	
<p>Ввод: <math>B_{н1} = B_{н1}</math></p> <p><math>B_{Rl} = B_R</math></p>	<p><math>P_{3l} = P_l \cdot (\overline{B_{н1}} \cdot B_R \vee B_{н1} \cdot \overline{B_R})</math></p>	
<p>Ввод: <math>B_{Rl} = B_{н1} + 1</math></p>	<p><math>P_{3l} = P_l \cdot (\overline{B_{н1}} \cdot B_{н1} + 1 \vee B_{н1} \cdot \overline{B_{н1} + 1})</math></p>	
<p>Ввод: <math>B_{Rl} = B_{н1} + 1 \&amp; P_{н1} + 1</math></p>	<p><math>P_{3l} = P_l (\overline{B_{н1} + 1} \cdot P_{н1} + 1 \vee B_{н1} \cdot B_{н1} + 1 \cdot P_{н1} + 1)</math></p>	

в анализе логических связей в ПП при формировании групп потребителей и установлении соответствия этих связей функционально-структурным связям СЭС.

Разработанное на основе алгебры высказываний описание передаточных функций (функций выходов) позволяет интерпретировать их как состояния коммутационных аппаратов в СЭС. Для описания дискретной последовательности состояний во времени можно использовать модель конечного абстрактного автомата, аналогичную модели, принятой для описания объекта проектирования. Интерпретируя комплексные передаточные функции как состояния элементарных автоматов и комбинируя последние, можно описывать поведение комплексной структуры подсистемы электроснабжения. Результирующие автоматы как комбинации элементарных также можно распределить по иерархическим уровням, соответствующим переходу на следующую ступень интеграции с их соответствующим описанием.

Описание характеристики динамической системы основывается на описании ее реакций на внешние воздействия (например, одно- и многофазные замыкания).

Элементарная переходная функция  $s_e$  реализуется автоматом Мили [4, 14]:

$$s_e = (X_e, Y_e, Q_e, r_e, s_e),$$

где

$$X_e = \gamma(X_{ee}, X_{ei}); \quad X_e = r_e(Q_e, X_e); \quad Y_e = s_e(Q_e, X_e).$$

Элементарная функция  $sz > I_0$  описывается при помощи автомата Мура:

$$SZ(I_0) = (Y_e, Q_i, X_{ei}, r_i, s_i),$$

где

$$Q_i = r_i(Q_i, Y_e); \quad r_i = (Q_i, s_e(Q_e, X_e)); \quad X_{ei} = s_i(Q_i).$$

Доказательство применимости правил композиции автоматов для разработки и описания характеристик объекта проектирования позволяет сделать следующие выводы.

Формализация перехода от статической к динамической характеристике приводит к расширению алгебры проектирования на область разработки математических конструкций для алгебры понятий. Подобная формализация поведения комплексных структур помогает проектировщику на этапе схемотехнического проектирования, поскольку для варианта структуры автоматически выполняется описание обобщенной характеристики объекта и обеспечивается корректный переход от функции к структуре.

Введение новой формы описания поведения СЭС в виде таблиц решений и таблиц автоматов легко реализуется как в наглядном виде, так и во внутримашинном представлении с помощью интерпретации графов состояния.

Процесс проектирования СЭС является процессом обработки информации, основу структурирования которого составляет иерархическая система описаний объекта проектирования. Уровни иерархического описания разработаны в [40] и отражают требование адекватного и упорядоченного описания объекта проектирования на каждой ступени абстрагирования и в каждом операционном комплексе. Такое упорядоче-

ние предполагает, что оцениваться по экономическим критериям могут лишь варианты функционально пригодные, конструируемые на основе существующей номенклатуры элементов, имеющие разработанную технологию монтажа, наладки и эксплуатации.

Поскольку модульный принцип предполагает многократное применение и комбинирование однократно разработанных структурных единиц описания СЭС, его использование повышает эффективность САПР электроснабжения за счет:

однократной разработки и описания (документирования) типовых решений;

концентрации проектных действий на разработке новых комбинаций объектных модулей и операций, что позволяет за то же время оценить большее число вариантов СЭС, повышая экономичность решений;

снижения затрат на разработку проектной документации за счет типизации и многократного повторного применения не только объектных модулей, но и их описаний.

Объектные модули образуются на различных уровнях абстрагирования, причем в зависимости от уровня интеграции различают пять уровней объектных модулей:

0-й — содержит описания функциональных элементов (выключатели мощности, трансформаторы, преобразователи, реле защиты);

1-й — определяет описания функциональных блоков (например, выемные блоки ячеек РУ, секцию шин силовой сборки) как комбинации функциональных элементов;

2-й — функциональные группы как комбинация функциональных блоков и функциональных элементов (например, ввод к трансформатору КТП с ошиновкой, выключателем нагрузки, предохранителем);

3-й — системы функциональных блоков как комбинация функциональных групп, блоков и элементов (например, вводная часть РУ с вводными и секционными выключателями, сборными шинами и всей аппаратурой);

4-й — определяется как комбинация всех предшествующих в виде законченных комплексных электроустановок (КТП, РУ, ГПП, ПГВ).

# УЧЕБНАЯ САПР ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ МНОГОТЕРМИНАЛЬНОЙ МИНИ-ЭВМ

---

### 6.1. ОСОБЕННОСТИ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ САПР

Промышленные САПР не ориентированы на выполнение функций обучения методам и приемам автоматизированного проектирования. Поэтому возникает необходимость разработки в вузах учебно-исследовательских САПР, которым свойственно следующее [29]:

1. Многопрофильность, обусловленная большим количеством профилирующих кафедр и дисциплин, связанных с проектированием технических объектов при централизации САПР в рамках вуза. Поскольку возможности технических средств в вузах значительно ограничены по сравнению с ведущими проектными организациями, адаптация промышленных САПР и одновременная эксплуатация в вузе нескольких типов САПР практически невозможны. Кроме того, многопрофильность обуславливается и особенностями конкретной технической дисциплины. Так, для специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства» необходима дифференциация САПР по профилям подготовки на САПР промышленного, городского и сельского электроснабжения. Это объясняется различиями в методическом обеспечении этих разделов дисциплины и различиями в принципах построения и элементной базе проектируемых ЭЭС. Например, в промышленных и городских ЭЭС используются в основном кабельные сети напряжением до 1000 В достаточно большой мощности, а для сельских ЭЭС характерно использование воздушных линий низшего напряжения с большим числом распределенных объектов малой мощности.

2. Разнообразие математического обеспечения, обусловленное необходимостью сравнительного анализа и сопоставления конкурирующих методов, алгоритмов и моделей в учебном процессе.

3. Наличие развитой базы обучающих систем в составе САПР, поскольку большинство пользователей учебных САПР не имеют достаточно высокой квалификации и навыков работы.

4. Массовость использования, связанная с большим числом обучающихся студентов.

5. Преобладание укороченных маршрутов проектирования, являющихся лишь фрагментами реальных маршрутов, поскольку реализация полных маршрутов невозможна из-за ограничений учебного плана.

6. Меньшая сложность информационного обеспечения и баз данных, связанная с укороченными маршрутами проектирования.

7. Преобладание задач малой размерности, обуславливаемое индивидуальным характером учебного задания в отличие от группового характера реальной проектной деятельности.

8. Наличие элементов автоматизированного контроля знаний, умений и навыков пользователей, обусловленное необходимостью контроля большого числа индивидуальных заданий.

Эти особенности, с одной стороны, усложняют учебно-исследовательские САПР, требуя от них открытости, гибкости, возможности пополнения математического, программного обеспечения и входных языков, наличия средств диалогового взаимодействия. С другой стороны, эти особенности снижают требования к базе данных и позволяют использовать компромиссы между требованиями к точности и экономичности математических моделей.

## 6.2. СОСТАВ И СТРУКТУРА УЧЕБНОЙ САПР

В состав технического оборудования входит мини-ЭВМ «МЕРА-60», которая совместно с операционной системой реального времени RT-60 предназначена для решения вычислительных задач пользователями, обладающими минимальными навыками работы с системами мини-ЭВМ.

Аппаратные средства САПР представлены следующими основными компонентами (рис. 6.1):

центральным процессором (ЦП) мини-ЭВМ «МЕРА-60», выполняющим операции обработки данных (типа «Электроника-60»);

комплексом терминальных устройств ( $T1...T5$ ), представляющих собой интеллектуальные дисплеи и предназначенных для выполнения операций ввода — вывода при символьном взаимодействии пользователя с системой;

комплексы средств внешней памяти в виде четырех каналов накопителей на гибких магнитных дисках ( $DX0:...DX3:$ ) типа SP62.M;

АЦПУ типа DZM-180, являющимся высокоскоростным печатающим устройством.

Конструктивно ЦП, комплект НГМД и блок питания (БП) объединены в одной стойке.

В базовой структуре возможны изменения за счет подключения: накопителей на гибких дисках НМД типа CM-5400; накопителей на магнитной ленте кассетных типа РК-1; считывателя информации с перфолент типа FS-1500; графических средств отображения информации типа «МЕРА-7953».

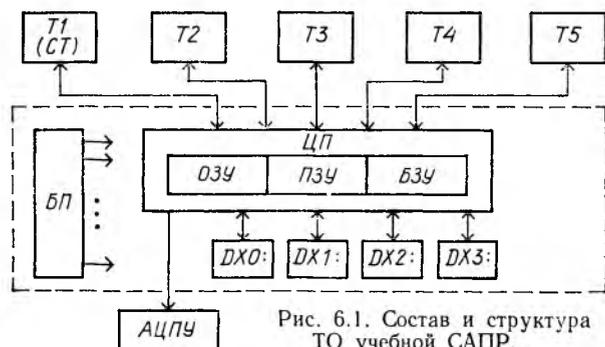


Рис. 6.1. Состав и структура ТО учебной САПР.



Рис. 6.2. Состав ПО учебной САПР.



Рис. 6.3. Состав операционной системы RT-60.

Основные характеристики системы следующие: объем оперативной памяти 56 Кбайт (28 килослов); быстродействие 250 тыс. операций/с; среднее время доступа к внешней памяти 210 мс; число одновременно доступных дисков 4.

В системе предусматривается использование одного терминала *T1* в качестве системного (СТ) для выполнения операций, устанавливающих текущую конфигурацию системы, загрузки языковых интерпретаторов или трансляторов и т. п. После разметки конфигурации системы и выполнения общесистемных функций СТ может работать в качестве обычного пользовательского терминала.

Программное обеспечение системы представлено операционной системой (ОС) реального времени RT-60, интерпретаторами — трансляторами языков (ТЯ) и прикладными программами (ПП), которые разрабатываются пользователем (рис. 6.2).

Системой RT-60 поддерживаются стандартные языки высокого уровня БЕЙСИК и ФОРТРАН-IV, а также символический язык (Ассемблер) МАКРО. Поэтому в состав ПО входят интерпретатор языка БЕЙСИК и транслятор языка ФОРТРАН.

ОС представляет собой набор программ, образующих среду, в которой пользователь может составлять и запускать свои программы. С ее помощью все аппаратные и программные ресурсы системы организуются в одну работающую единицу, управляемую пользователем (рис. 6.3).

Основу ОС составляет исполнительная программа МОНИТОР, выполняющая роль интерфейса между ТО, ПО и пользователем. Функции программы МОНИТОР позволяют пользователю принимать, обрабатывать и выполнять инструкции управления системой, а ее большой набор команд, вводимых с клавиатуры терминала, позволяет выполнить все необходимые системные операции.

В системе имеется два типа программ МОНИТОР: однозадачный, позволяющий использовать для программ до 45 Кбайт памяти; двухзадачный, разрешающий одновременное решение оперативной и фоновой задач, но сокращающий доступный для программ пользователя объем памяти.

Программные процедуры драйверов устройств играют роль интер-

фейсов для аппаратных средств системы. Имеющийся набор сервисных программ позволяет максимально использовать системные ресурсы: создавать и редактировать тексты (редактор); управлять другими программами и определять местоположение ошибок, допущенных в программах пользователя (отладка); хранить и восстанавливать в системе часто применяемые программные процедуры, т. е. создавать и накапливать библиотеку программ (библиотекарь); сравнивать исходные тексты и выводить различия между ними на указанное устройство (сравнение файлов); выводить на терминал или АЦПУ указанный файл или его часть, а также компоновать набираемые тексты программ в формат, пригодный для загрузки и выполнения (обслуживание файлов).

Особенностью системы является автоматическая загрузка ОС RT-60, записанная на системном гибком диске, в ОЗУ при закрытии крышки дисководов. Диск с ОС всегда помещается в НМГД с обозначением «DXO».

Система мини-ЭВМ «МЕРА-60» имеет ограниченные вычислительные возможности, и при работе в мультипрограммном режиме для программ пользователя, написанных на языке БЕЙСИК, отводится сравнительно небольшой объем памяти — от 19 Кбайт при пяти работающих терминалах. Поэтому программные модули САПР необходимо составлять из нескольких сегментов.

Для всех ПМ учебной САПР принята четырехсегментная структура:

1-й сегмент — представляет собой текстовый файл, предназначенный для обучения пользователя и содержащий краткое описание ПМ и правила работы с ним;

2-й сегмент — программа загрузки исходных данных, использующая режим пассивного диалога (меню) и позволяющая обнаруживать ошибки при вводе данных;

3-й сегмент — программа загрузки нормативно-справочной информации для данного ПМ (загрузчик базы данных);

4-й сегмент — основная программа модуля, реализующая обработку данных и вывод результатов.

Наличие отдельного 3-го сегмента позволяет сохранить принятый при разработке САПР электроснабжения трехуровневый принцип в условиях ограниченных вычислительных ресурсов системы «МЕРА-60» и перейти к формированию БД при появлении дополнительных ресурсов.

### **6.3. СОСТАВ ЗАДАЧ И РЕАЛИЗУЕМЫЙ МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

В состав ПО учебной САПР входят ПМ, решающие задачи:

ПМ1 — расчет электрических нагрузок электроприемников напряжением до 1000 В для заданных групп ЭП, участков, цехов и производительных корпусов;

ПМ2 — расчет электрических нагрузок всех типов ЭП на высших ступенях СЭС;

ПМ3 — расчет параметров картограммы электрических нагрузок;  
ПМ4 — синтез типовых суточных графиков электрических нагрузок с дискретностью по времени  $\Delta t = 1$  ч для основных производственных корпусов и предприятия в целом;

ПМ5 — определение координат теоретического центра электрических нагрузок и зоны рассеяния его (при задании графиков нагрузки отдельных корпусов);

ПМ6 — определение числа и мощности трансформаторов ГПП (ПГВ) с учетом допустимой перегрузочной способности в послеаварийном режиме;

ПМ7 — выбор оптимальной трассы ЛЭП внешнего электроснабжения методом динамического программирования;

ПМ8 — расчет токов короткого замыкания на шинах центрального РП;

ПМ9 — расчет режимов пуска и группового самозапуска электрических двигателей в сетях 6—10 кВ;

ПМ10 — оценка колебаний напряжения на шинах цеховых КТП и определение минимальной мощности цеховых трансформаторов;

ПМ11 — оценка перегрузочной способности по реактивной мощности синхронных двигателей в сетях 6—10 кВ;

ПМ12 — определение оптимальной мощности и числа цеховых КТП с учетом рациональной степени компенсации реактивных нагрузок на напряжениях до и свыше 1000 В;

ПМ13 — формирование описания электрических сетей 6—10 кВ методом адресных отображений;

ПМ14 — оптимизация мощности и мест установки ИРМ методом динамического программирования;

ПМ15 — расчет режимов и выбор параметров элементов сетей 6—10 кВ;

ПМ16 — расчет токов короткого замыкания в сложноразветвленных сетях с учетом подпитки места КЗ;

ПМ17 — пакет программ по электрическому, механическому расчету и выбору промышленных токопроводов 6—10 кВ.

Включение ПМ в технологический маршрут проектирования СЭС показано на рис. 6.4 и 6.5. На рисунках выделены области действий пользователя и ЭВМ (разграничение функций), причем в задачи пользователя входит анализ исходных данных, полученных на уровне ТЗ, их подготовка и ввод в ЭВМ по запросам соответствующих ПМ, а также анализ результатов и принятие проектных решений.

На рис. 6.4 приведен фрагмент маршрута проектирования, реализующего схемотехнический этап проектирования внешнего электроснабжения.

Ограниченные ресурсы системы «МЕРА-60» вынуждают использовать основные модули ПМ-1, 2, 4 многократно, выполняя расчеты для различных цехов и корпусов поочередно. Поскольку первые пять модулей обеспечивают данными несколько фрагментов маршрута проектирования, они выделены в общий сервисный блок (С). Основными задачами пользователя на данном маршруте являются:

П1 — подготовка исходных данных для расчета электрических нагрузок на напряжении до 1000 В;

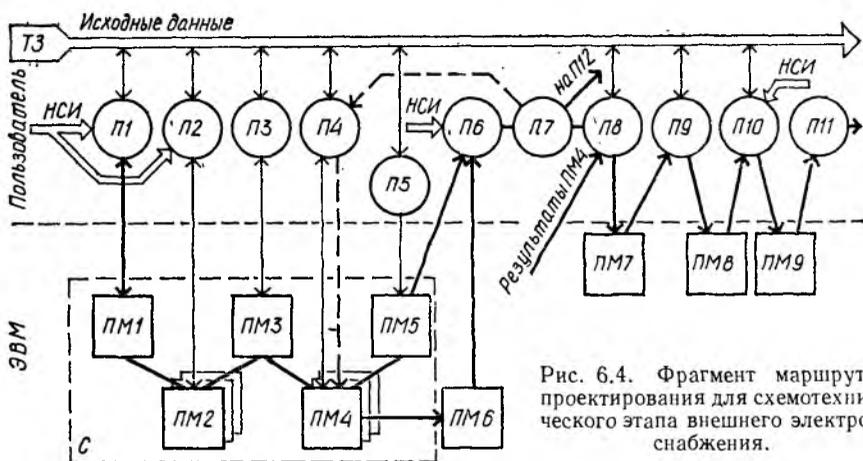


Рис. 6.4. Фрагмент маршрута проектирования для схемотехнического этапа внешнего электроснабжения.

П2 — ориентировочный расчет нагрузок электрического освещения методом удельной нагрузки; определение нагрузки освещения территории; подготовка данных по электрическим нагрузкам ЭП на напряжение свыше 1000 В;

П3 — подготовка данных для расчета картограмм нагрузок;

П4 — подготовка (или корректировка) данных для синтеза графиков нагрузки;

П5 — подготовка данных для расчета координат ЦЭН;

П6 — оценка требуемого уровня напряжения внешнего электроснабжения и ТЭР по выбору числа ГПП (ПГВ) и источника питания предприятия;

П7 — анализ и оценка альтернативных вариантов; принятие проектного решения;

П8 — подготовка данных для оптимизации трассы ЛЭП;

П9 — подготовка данных для расчета токов к. з.;

П10 — выбор и проверка основного оборудования схемы внешнего электроснабжения; подготовка данных для оценки параметров режима;

П11 — окончательное схемотехническое решение подсистемы внешнего электроснабжения.

Опыт проектирования показал, что после выполнения сервисного блока С (рис. 6.4) возможно распараллеливание процесса проектирования и независимое проектирование рассмотренного фрагмента и маршрута, определяющего схемотехнический этап выбора внутризаводского электроснабжения.

Основными функциями пользователя при реализации этого этапа проектирования (рис. 6.5) являются:

П12 — подготовка данных для ПМ10;

П13 — подготовка данных для ПМ11;

П14 — подготовка данных для решения задачи оптимизации мощности и числа цеховых КТП;

П15 — проектное решение по выбору мощности и числа КТП; разработка альтернативного варианта схемы электрических сетей

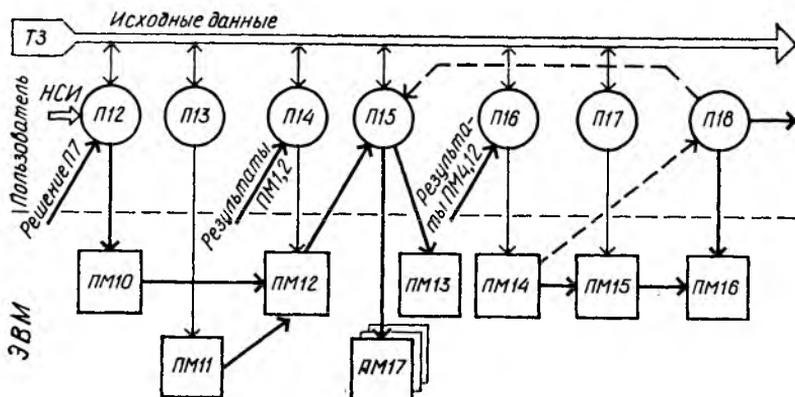


Рис. 6.5. Фрагмент маршрута проектирования для схмотехнического этапа внутризаводского электроснабжения.

6—10 кВ; при необходимости использования ПМ17 — подготовка данных для проектирования токопроводов;

П16 — подготовка данных для решения оптимизационной задачи по определению мощности и расстановке ИРМ;

П17 — подготовка данных для расчета режимов и выбора оборудования в сетях 6—10 кВ;

П18 — анализ и оценка альтернативных вариантов; принятие проектного решения по выбору схемы внутризаводского электроснабжения.

Таким образом, учебная САПР электроснабжения реализует укороченные технологические маршруты проектирования внешнего и внутризаводского электроснабжения на уровне схмотехнического этапа проектирования.

Несмотря на то что в данном технологическом маршруте решаются традиционные задачи проектирования электроснабжения, алгоритмы, лежащие в основе отдельных ПМ, имеют некоторые отличия от общепринятых. Рассмотрим особенности и характеристики ПМ, используемые в этом технологическом маршруте.

#### 6.4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Электрические нагрузки ЭП напряжением до 1000 В согласно ПМ1 рассчитываются по алгоритму, в основу которого положен метод коэффициента максимума (упорядоченных диаграмм) Каялова. Алгоритм позволяет определять активные и реактивные нагрузки в цеховых сетях напряжением до 1000 В, с произвольной электрической схемой и нагрузками произвольных групп электроприемников. Это обычно необходимо на начальном этапе проектирования, когда требуется определить электрические нагрузки цехов и производственных корпусов для построения картограмм нагрузок и определения координат их центра. Поэтому в произвольной группе ЭП выделяются электроприемники с переменным и ровным графиками нагрузки, а также осветительные электроприемники.

Расчетная нагрузка электроприемников с равномерным графиком и осветительная нагрузка формально определяются как средняя за максимально загруженную смену:

$$P_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n P_{ni} k_{ni},$$

где  $P_{ni}$  — номинальные мощности отдельных электроприемников, кВт;  $k_{ni}$  — индивидуальные коэффициенты использования активной нагрузки. Для осветительной нагрузки под  $k_{ni}$  формально понимается значение коэффициента спроса  $k_{ci}$ .

Для групп ЭП с переменным характером нагрузки метод коэффициента максимума допускает суммирование только средних нагрузок за наиболее загруженную смену, которые определяются из аналогичного выражения. Поэтому для обеспечения расчета электрических нагрузок отдельных цехов, производственных корпусов и предприятия в целом, для каждой  $j$ -й группы определяются

$$P_j^n = \sum_{i=1}^n P_{ni}; \quad P_{cj}^k = \sum_{i=1}^n P_{ni}^2.$$

Тогда для суммарной нагрузки  $m$  групп потребителей используются выражения

$$\bar{P}_c = \sum_{j=1}^m P_{ij}; \quad \bar{P}_j^k = \sum_{j=1}^m P_{ij}^2; \quad \bar{P}_{\text{см}} = \sum_{j=1}^m P_{cj},$$

где для упрощения записи под  $P_{ij}$  понимается  $P_{ni}$ , а под  $P_{ij}^2$  — значение  $P_{ni}^2$ . Эти выражения, в свою очередь, допускают дальнейшее суммирование с аналогичными величинами других групп.

Для определения расчетной активной нагрузки от ЭП с переменным графиком на любом уровне агрегирования нагрузки необходимо вычислить значения группового коэффициента использования и эффективного числа электроприемников:

$$K_{и.г} = \sum_{j=1}^m P_{cj} / \sum_{j=1}^m P_{ij}; \quad n_{\text{э}} = \bar{P}_c^2 / \bar{P}_j^k.$$

Особенностью данного алгоритма является также использование для вычисления зависимости  $K_M = f(K_{и.г}, n_{\text{э}})$  выражения, аппроксимирующего не кривые или таблицы, приведенные в «Указаниях по расчету электрических нагрузок», а основные зависимости метода упорядоченных диаграмм. Это выражение имеет вид

$$K_M = \sqrt{1 + \frac{2}{(K_{и.г}^2 + 0,036) n_{\text{э}}}}.$$

В остальном использованный алгоритм практически совпадает с приведенным в [37] и его графическое описание не приводится.

Расчет электрических нагрузок на высших уровнях системы электроснабжения в соответствии с ПМ2 учитывает характерную особенность СЭС промышленных предприятий, заключающуюся в наличии электроприемников, которые питаются при напряжениях 6, 10, 35 кВ.

Таблица 6.1. Данные о нагрузках ЭП на напряжении до 1000 В

№ п/п	Шифр производственного корпуса	Переменный график				Ровный график		Осветительные	
		$\sum_{i=1}^n P_{ni}$	$\sum_{i=1}^n P_{ni}^2$	$P_{см}^n$	$Q_{см}^n$	$P_{см}^p$	$Q_{см}^p$	$P_o$	$Q_o$

Таблица 6.2. Данные об ЭП на напряжении свыше 1000 В

№ п/п	$U_n$ , кВ	$P_k$ , кВт	$K_n$	$\cos \varphi$	Характер нагрузки	Число однотипных ЭП, $N_R$

Таблица 6.3. Описание принципа группирования ЭП

№ п/п	Группирование ЭП		Шифр производственного корпуса	Примечания
	Начало	Конец		

Основную массу таких ЭП составляют асинхронные и синхронные двигатели, индукционные и дуговые печи, преобразовательные установки различного назначения. Как известно, строгой методики определения расчетных нагрузок на высших уровнях СЭС в настоящее время не существует, что вынуждает использовать различные корректирующие коэффициенты по типу коэффициента совмещения максимумов [35].

Исходными для расчета электрических нагрузок по производственным корпусам и предприятию в целом являются промежуточные результаты расчета нагрузок осветительных и силовых электроприемников напряжением до 1000 В, полученные в предположении, что все ЭП корпуса рассматриваются как единая группа (табл. 6.1).

Данные об электроприемниках напряжением свыше 1000 В заносятся в два формуляра (табл. 6.2 и 6.3). В каждую строку табл. 6.2 заносятся данные о напряжении  $U_{ni}$ , номинальной мощности  $P_{ni}$ , коэффициентах использования  $K_{ni}$  и мощности  $\cos \varphi_i$ , а также число  $n$  однотипных ЭП. В графу 6 заносятся значения признака  $B = 1$  для приемников с переменным и  $B = 0$  для приемников с ровным характером нагрузки. Номинальные мощности электроприемников повторно-кратковременного режима работы должны быть предварительно приведены к  $PВ = 100\%$ . Для синхронных двигателей на начальном этапе проектирования в графу 5 заносятся значения  $\cos \varphi_i = 1$ , поскольку не известно, будут ли они использоваться для компенсации реактивных нагрузок.

В графы 2 и 3 табл. 6.3 заносятся значения, численно равные номерам строк табл. 6.2, определяющие границы суммирования нагрузок ЭП, которые относятся к одному классу напряжения и одному произ-

водственному корпусу. Поэтому данные об электроприемниках в табл. 6.2 должны быть предварительно сгруппированы по указанным признакам.

Расчет электрических нагрузок для каждого корпуса выполняется в следующей последовательности.

Определяются средние нагрузки ЭП на каждом уровне напряжения свыше 1000 В для каждого производственного корпуса

$$P_c = \sum_{k=n}^{k=m} N_k P_{нк} K_{нк},$$

где  $k = m$ ,  $k = n$  — границы суммирования по табл. 6.3;  $N_k$ ,  $P_{нк}$ ,  $K_{нк}$  — по графам 7, 3, 4 табл. 6.2 соответственно.

В зависимости от характера нагрузки расчетная нагрузка  $P_m$  принимается равной  $P_c$  при  $B = 0$  или вычисляется  $K_m = f(K_{н.г}, n_g)$  по изложенной методике при  $B = 1$  и определяется

$$P_m = K_m P_c.$$

Для определения полной расчетной нагрузки корпуса находят расчетные нагрузки ЭП с переменным графиком на напряжениях до 1000 В и свыше 1000 В по формуле

$$P_{м.с} = K_m (P_{с.м}^n + P_c).$$

При этом пределы  $k = m$  и  $k = n$  включают все электроприемники корпуса независимо от уровня питающего напряжения.

Общая расчетная активная нагрузка корпуса определяется из выражения

$$P_m^k = P_{м.с} + P_{с.м}^p + P_{с.м}^i + P_o + \Delta P,$$

где  $P_{с.м}^a$  — средняя нагрузка ЭП с ровным графиком на напряжении свыше 1000 В;  $\Delta P$  — ориентировочное значение суммарных потерь мощности в цеховых ТП, которые определяют по формуле

$$\Delta P \approx 0,02 \sqrt{P_{м.н}^2 + Q_{м.н}^2},$$

где  $P_{м.н}$ ,  $Q_{м.н}$  — расчетные значения соответственно активной и реактивной нагрузок ЭП на напряжении до 1000 В.

Аналогично определяются потери реактивной мощности:

$$\Delta Q \approx 0,1 \sqrt{P_{м.н}^2 + Q_{м.н}^2}.$$

При определении расчетных нагрузок по предприятию учитываются также нагрузки освещения территории, а полученная расчетная нагрузка умножается на коэффициент совмещения максимумов  $K_{с.м} = 0,85 \dots 1,0$ .

Расчет параметров картограммы электрических нагрузок и координат центра нагрузки согласно ПМЗ производится с учетом расчетов по ПМ1 и ПМ2, в результате которых для каждого производственного корпуса и предприятия определяются следующие величины:

$P_o$ ,  $Q_o$  — расчетные значения соответственно активной и реактивной нагрузок осветительных электроприемников;

$P_m^n$ ,  $Q_m^n$  — то же, силовых электроприемников напряжением до 1000 В;

$P_{mi}^b, Q_{mi}^b$  — то же, силовых электроприемников на каждом из питающих напряжений свыше 1000 В;

$P_m^c, Q_m^c$  — полные расчетные нагрузки рассматриваемого объекта. Эти данные, совместно с координатами  $(x_i, y_i)$  центров отдельных производственных корпусов, определяемыми по известной методике [26], дают возможность вычислить параметры картограммы нагрузок. В основу алгоритма ПМЗ положены известные расчетные зависимости.

Для синтеза графика нагрузки предприятия в базе данных учебной САПР электроснабжения хранятся суточные графики активных электрических нагрузок характерных видов производств. Графики  $P(t)$  хранятся в виде дискретных числовых рядов с интервалом дискретизации  $\Delta t = 1$  ч, причем каждое значение ряда описано

$$P_i = P_i(t)/P_m.$$

При этом достигаются компактность и однотипность записи, поскольку ординаты типового графика оказываются представленными рядом относительных единиц.

Графики в БД классифицированы по типу производства и климатическому району, а синтез конкретного графика  $P(t)$  заключается в умножении относительных значений ординат  $P_i$  ( $i = 1, \dots, 24$ ) на значение расчетной нагрузки предприятия  $P_m^c$  или технологического подразделения.

Полученный график активной нагрузки используется для выбора числа и мощности трансформаторов ГПП (ПГВ) с учетом допустимой перегрузочной способности в послеаварийном режиме.

В реализованном технологическом маршруте проектирования предполагается, что требования энергосистемы к режиму реактивных нагрузок, задаваемые величинами  $Q_{s1}$  и  $Q_{s2}$ , должны быть обязательно выполнены на последующих этапах проектирования. Графики реактивных нагрузок считаются схожими по форме с графиками активных нагрузок, а максимальное значение их ординат  $Q_m^c = Q_{s1}$ . Таким образом, получаем следующий график реактивных нагрузок:

$$Q_i(t) = P_i Q_{s1} \text{ при } i = 1 \dots 24.$$

График полной нагрузки предприятия, требующийся для выбора мощности трансформаторов ГПП и оценки их перегрузочной способности, получаем расчетным путем:

$$S(t) = \sqrt{P_i^2(t) + Q_i^2(t)}. \quad (6.1)$$

Координаты теоретического центра электрических нагрузок находятся с помощью программного модуля ПМ5, который реализует данную задачу на основе известной методики определения координат центра нагрузок [26], и используются для наилучшего размещения ГПП на территории предприятия.

## 6.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА И МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ГПП

Сущность метода, положенного в основу алгоритма расчетов по определению числа и мощности трансформаторов (ПМ6), заключается в следующем.

Для заданного суточного графика нагрузки  $S(t)$  определяется среднее значение

$$S_c = \sum_{i=1}^n S_i/n,$$

где  $n$  — число ступеней суточного графика нагрузки.

Полученное значение сравнивается со значениями мощностей стандартной шкалы трансформаторов до момента соблюдения условия:

$$S_{Tj} \geq S_c.$$

Далее, заданный график нагрузки заменяется эквивалентным двухступенчатым графиком с ординатой большей ступени, соответствующей наибольшей ординате перегрузки трансформатора.

При заданной температуре внешней охлаждающей среды  $\theta_0$  и известной для трансформатора системе охлаждения по алгоритму (ГОСТ 14 209—85) определяются: температура масла в верхних слоях  $\theta_m$ , температура наиболее нагретой точки  $\theta_{н.т}$  и относительный износ изоляции  $F$ .

Относительный расчетный износ витковой изоляции трансформатора для каждой ступени графика нагрузки определяется по формуле

$$F_i = (1/\Delta t) \int^{\Delta t} 2^{(\theta_{н.т.б}(t) - \theta_{н.т.б})/\Delta} dt,$$

где  $\theta_{н.т.б}$  — базовая температура наиболее нагретой точки, принимаемая для изоляции класса нагревостойкости  $A$ , равной  $98^\circ\text{C}$ ;  $\Delta$  — температурный интервал, на котором изменение  $\theta_{н.т}$  вызывает изменение износа в два раза (для современных конструкций трансформаторов  $\Delta = 6^\circ\text{C}$ ).

Относительный расчетный износ изоляции за сутки находим из выражения

$$F_c = \sum_{i=1}^n F_i.$$

Допускается  $\theta_m = 115^\circ\text{C}$  для режима аварийных перегрузок;  $\theta_{м.т} = 95^\circ\text{C}$  для систематических перегрузок;  $\theta_{н.т} = 160^\circ\text{C}$  для аварийных перегрузок трансформаторов классов напряжения 110 кВ и ниже;  $\theta_{н.т} = 140^\circ\text{C}$  для аварийных перегрузок трансформаторов с напряжением свыше 110 кВ.

Таким образом, алгоритм использует три критерия выбора мощности трансформаторов ГПП по режиму послеаварийных перегрузок:

$$\theta_{н.т} \leq 160^\circ\text{C} \text{ или } \theta_{н.т} \leq 140^\circ\text{C};$$

$$\theta_m \leq 115^\circ\text{C};$$

$$F_c \leq F_{\text{норм.}}$$

В случае, если для рассматриваемого трансформатора наблюдается незначительное (5...10 %) отклонение расчетных значений мощности от нормированных, выдается рекомендация о необходимости анализа электроприемников и выявления потребителей-регуляторов.

Эти потребители могут быть подключены к системе автоматической разгрузки трансформаторов ГПП в послеаварийном режиме.

Необходимость перехода к двум и более ГПП (ПГВ) обуславливается наличием значительной перегрузки трансформатора наибольшей мощности стандартного ряда.

## 6.6. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАССЫ ЛЭП ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В данном технологическом маршруте проектирования выбор трассы ЛЭП формулируется как задача выбора оптимального пути и решается методом динамического программирования согласно ПМ7.

Задачи математического программирования, решение которых можно представить в виде многошагового процесса, называют динамическими [1].

Основу решения задач этого класса составляет принцип оптимальности Беллмана, в соответствии с которым «оптимальное поведение обладает тем свойством, что каковы бы ни были первоначальное состояние и первоначальное решение, последующее решение должно определять оптимальное поведение относительно состояния, полученного в результате первоначального решения». Этот принцип позволяет для задач с многими ограничениями и большим числом переменных получать решения более экономные с вычислительной точки зрения, чем по методу полного перебора вариантов. Сущность метода динамического программирования (ДП) состоит в замене одной задачи со многими переменными множеством последовательно решаемых задач с существенно уменьшенным числом переменных.

Для применения ДП не имеет значения, протекает ли оптимизационный процесс во времени, в пространстве или вообще представляет собой формальную процедуру. Его применение требует лишь соблюдения двух условий [2]:

оптимизируемый процесс должен расчленяться на шаги и обладать марковским свойством, согласно которому изменение состояния оптимизируемой системы, начиная с состояния  $S_i$ , должно зависеть только от этого состояния и последующих управляющих воздействий, но не от предшествующих состояний ( $S_{i-1}$ ,  $S_{i-2}$ );

критерий оптимальности должен быть аддитивным относительно исковых переменных с тем, чтобы его можно было представить суммой частных значений этого критерия, рассматриваемых на отдельных шагах.

Достоинством метода является возможность получения решения для полиэкстремальных задач, при дискретности переменных, недифференцируемости целевой функции и многошаговом характере решения. Недостаток метода ДП связан с большим объемом накапливаемой промежуточной информации в памяти ЭВМ. Однако возможности современных ЭВМ и более совершенные алгоритмические способы позволяют обойти эту трудность.

Задачи выбора оптимального пути связаны с поиском оптимальных траекторий перемещения в пространстве и во времени из одной ис-

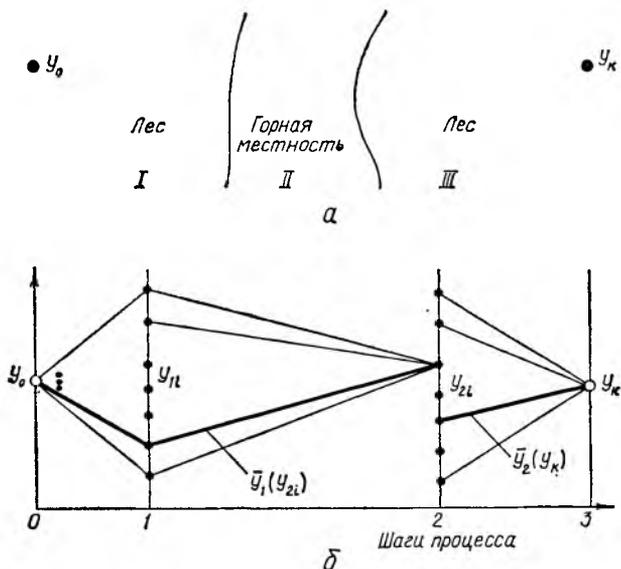


Рис. 6.6. Поясняющая схема к задаче выбора оптимальной трассы ЛЭП.

ходной точки  $Y_0$  в конечную  $Y_k$ . К таким задачам относится, например, выбор оптимальной трассы ЛЭП от возможных источников питания до ГПП предприятия. Эта задача приводится ниже в виде постановочной.

Для электроснабжения предприятия  $Y_k$  планируется построить ЛЭП, питающуюся от районной подстанции узла  $Y_0$  (рис. 6.6, а). Местность, по которой должна проходить трасса ЛЭП, является неоднородной и определяет технические условия на каждом возможном участке трассы. Принимаемые технические решения определяют приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию ЛЭП. Требуется выбрать трассу таким образом, чтобы минимизировать эти затраты. Примем, что в пределах участков (I, II и III) с границами 1, 2 и 3 трасса ЛЭП прямолинейна. Представим задачу как управляемый процесс принятия решений, в котором многошаговость формулируется по числу границ. На границах выделим точки, через которые может проходить ЛЭП, и обозначим их  $Y_{ki}$  ( $k$  — индекс границы,  $i$  — номер точки на этой границе). Удельные затраты для каждого участка местности различны, а для горного (II) участка каждый вариант трассы будет дополнительно характеризоваться некоторым весовым коэффициентом.

На первом шаге ( $k = 1$ ) рассматриваются все варианты прохождения ЛЭП через участок 1 (рис. 6.6, б), т. е. через точки  $Y_0$  и  $Y_{1i}$ . Обозначим затраты на варианты ЛЭП при прохождении этого участка через  $Z_1(Y_{1i}, Y_0)$ . На втором шаге в рассмотрение включается второй участок, где для каждой точки  $Y_{2i}$  границы 2 анализируются все возможные переходы из точек  $Y_{1i}$  границы 1. Этому будут соответствовать затраты  $Z_2(Y_{2i}, Y_{1i})$ . Из всех намеченных возможных вариантов перехода из  $Y_{1i}$  в  $Y_{2i}$  фиксируется тот, для которого имеет место

$\min (Z_1 + Z_2)$ , который определяется уравнением

$$Z_2(Y_{2i}) = \min_{Y_{1i}} \{Z_2(Y_{2i}, Y_{1i}) + Z_1(Y_{1i}, Y_0)\}.$$

Необходимо запомнить  $Z_2(Y_{2i})$  и точку  $Y_{1i}$  (обозначенную  $\bar{Y}_1(Y_{2i})$ ), для которой достигаются минимальные затраты. Далее аналогично поступают для всех остальных  $Y_{2i}$ .

По окончании второго шага становятся известными все оптимальные трассы, проходящие через соответствующие точки границы 2. Поскольку на третьем шаге по условиям задачи имеется только одна точка  $Y_k$  (или  $Y_{31}$ ), то, просматривая все допустимые переходы из точек границы 2 в эту точку, обнаруживаем такую точку  $\bar{Y}_2(Y_k)$ , которая обеспечивает минимальные затраты. Она находится из функционального уравнения

$$Z_3(Y_{31}) = \min_{Y_{2i}} \{Z_3(Y_{31}, Y_{2i}) + Z_2(Y_{2i})\}.$$

Участки, соответствующие оптимальному решению, выделены на рис. 6.6, б жирными линиями.

Обобщение полученного решения в виде рекуррентных уравнений Беллмана для задач выбора оптимального пути имеют вид

$$Z_j(Y_{ji}) = \min \{Z_j(Y_{ji}, Y_{(j-1)k}) + Z_{j-1}(Y_{(j-1)k})\}$$

при  $j = 2, 3, \dots, N$  и  $Z_1(Y_{1i}) = Z_1(Y_{1i}, Y_0)$ . Здесь  $Z_j(Y_{ji}, Y_{(j-1)k})$  — функция качества перехода из  $k$ -го узла  $(j-1)$ -й вертикали в  $i$ -й узел вертикали  $j$ .

Обычно интерес представляет не столько оптимальное значение целевой функции, сколько соответствующие значения параметров задачи. Поэтому затраты  $Z_j(Y_{ji})$  вычисляют на прямом ходе алгоритма ДП, а  $\bar{Y}_{j-1}(Y_{ji})$  — на обратном его ходе для нахождения значений искомых переменных.

## 6.7. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ПИНАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО РИ

Решение данной задачи диктуется необходимостью иметь стоимостные оценки оборудования распределительных устройств для оптимизации мощности и числа цеховых ТП, а также конкретизацией схемных решений ГПП для перехода к конструкторскому этапу их проектирования. Это позволяет выделить в общем технологическом маршруте проектирования ЭЭС параллельные процессы проектирования отдельных подсистем и снижает сроки проектирования.

В основу алгоритма расчета токов короткого замыкания положен метод узловых напряжений.

До момента возникновения короткого замыкания (к. з.) состояние ЭЭС можно описать системой  $n$  уравнений узловых напряжений:

$$\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n Y_{ij} \right) U_i^n - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n-1} (Y_{ij} U_j^n) = I_i, \quad (6.2)$$

где  $Y_{ij}$  — проводимости между  $i$ -м и  $j$ -м узлами схемы замещения;  $U_i^n, U_j^n$  — напряжения в соответствующих узлах в нормальном режиме.

При возникновении к. з. в любом узле схемы его напряжение становится равным нулю ( $U_k^k = 0$ ), и возникает дополнительный узловый ток  $I_k$ , равный току к. з.

Поскольку известно  $U_k^k = 0$ , то уравнение, соответствующее  $k$ -му узлу из системы (6.2), исключается. Далее оно используется для определения токов к. з. в месте повреждения.

Тогда система (6.2) принимает вид

$$\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^n Y_{ij} \right) U_i^{(k)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^{n-1} (Y_{ij} U_j^{(k)}) = I_i, \quad i \neq k. \quad (6.3)$$

Решением системы являются остаточные напряжения в узлах схемы  $U_i^{(k)}$ , с помощью которых можно получить значения токов к. з. в ветвях схемы:

ток к. з. в месте повреждения

$$I_k = I_k + \left( \sum_{j=1}^{n-1} (Y_{kj} U_j^{(k)}) \right);$$

токи в ветвях схемы сети

$$I_{ij} = Y_{ij} (U_i^{(k)} - U_j^{(k)});$$

токи от каждого источника в схеме сети

$$I_{ni} = (E_i - U_i) / X_i.$$

Решение системы (6.3) возможно многими методами (например, итерационным методом Гаусса — Зайделя). В основу данного алгоритма и программы, разработанных в Киевском отделении УГПИ «Тяжпромэлектропроект», положен метод треугольных множителей, позволяющий получить точное решение.

Для расчета токов к. з. составляется схема замещения. Для этой схемы известны параметры ее ветвей и электродвижущие силы (э. д. с.) в момент короткого замыкания. Источниками э. д. с. считаются узлы схемы с  $U = 1$  (в относительных базисных единицах). На схеме замещения выделяются узлы, в которых должны определяться токи к. з.

Для всех узлов (за исключением источников) с неизвестным напряжением составляется уравнение

$$U_i = \sum_{l=1}^n (Y_{li} U_l) / \sum_{l=1}^n Y_{li}.$$

Решая систему узловых напряжений (последовательно для каждой точки к. з.), получаем значения остаточных напряжений во всех узлах схемы замещения.

Токи в генерирующих ветвях в начальный момент к. з. определяются (для  $i$ -й генераторной ветви):

$$I_{gi} = (1 - U_i) Y_{ii},$$

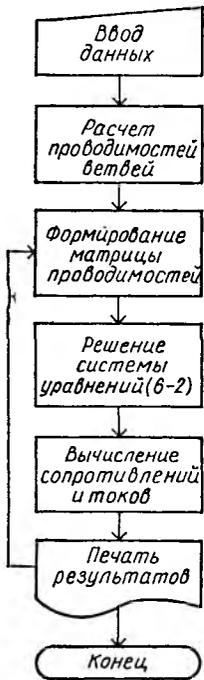


Рис. 6.7. Укрупненная блок-схема алгоритма расчета токов к. з.

где  $U_l$  — остаточное напряжение узла, ближайшего к источнику  $E$ ;  $Y_{il}$  — проводимость ветви, которая соединяет источник  $E$  с узлом  $l$ .

Ток в точке к. з. в начальный момент равен сумме токов всех генерирующих ветвей схемы:

$$I_k = \sum_{i=1}^m I_{ri}.$$

Результирующее сопротивление схемы находится из выражения

$$X_{рез} = 1/I_k,$$

где  $I_k$  — в относительных единицах.

Коэффициенты распределения тока по генерирующим ветвям определяются из выражения (для  $i$ -й генерирующей ветви):

$$C_i = I_{ri}/I_k.$$

Расчетное сопротивление для  $i$ -й генерирующей ветви:

$$X_{расч} = X_{рез} S_{Hi}/(C_i S_0).$$

Базисный ток вместе к. з.:

$$I_0 = S_0/(\sqrt{3} U_0).$$

Номинальный ток источников э. д. с.:

$$I_H = S_H/(\sqrt{3} U_H),$$

где  $U_0^*$  — базисное напряжение точки к. з.;  $S_H$  — номинальная мощность источников э. д. с. (включая все учитываемые в расчете двигатели).

Укрупненная блок-схема алгоритма расчета токов к. з. приведена на рис. 6.7.

Основой расчета является схема замещения СЭС, в которой пронумерованы все узлы. Узлами схемы замещения являются:

источники э. д. с. (система, двигатели), которым всегда присваивается номер 1;

точки короткого замыкания и фактические узлы схемы, которые обозначаются номерами от 2 и выше по направлению от системы.

Точки короткого замыкания на схеме выделяются стрелками.

Ветвью схемы замещения считается элемент, расположенный между двумя узлами. Генерирующая ветвь — эквивалентный источник э. д. с. между первым и любым фактическим узлом (система или двигатель).

Параметры элементов схемы замещения для каждой ее ветви записываются в табл. 6.4.

В гр. 4 табл. 6.4 параметры элементов должны приводиться строго в той последовательности, которая указана ниже в скобках после названия соответствующего элемента.

Таблица 6.4. Параметры элементов схемы замещения короткозамкнутой цепи

№ п/п	Начало ветви	Конец ветви	Параметры элементов схемы
1	2	1	СИ/1890/
2	2	3	Л/0.4, 6, 115/
3	3	4	Т2/18, 63/
4	3	7	Т3/18, 63/
5	4	5	Р/25, 63/ (Р/25, 6.3/)
6	4	6	Р/25, 6.3/
7	7	8	Р/25, 6.3/
8	7	9	Р/25, 6.3/
9	7	10	Р/25, 6.3/
10	6	1	Д/0.136, 7/
11	6	1	Д/0.23, 0.74/; Д/0.28, 0.74/ Д/0.23, 0.74/; Д/0.23, 0.74/ Д/0.23, 0.74/
12	8	1	Д/0.23, 0.74/; Д/0.2, 0.38/
13	9	1	5×Д/0.2, 0.59/; Д/0.23, 0.74/ 4×Д/0.19, 0.47/
14	10	1	4×Д/0.2, 1.47/

Если ветвь состоит из нескольких элементов схемы (соединенных последовательно или параллельно), то в одной строке гр. 4 приводятся все элементы ветви со своими параметрами.

Принимаются следующие обозначения элементов схемы и их параметров (и последовательность записи этих параметров):  
система

$$СИ(S_{к.з.}),$$

где  $S_{к.з.}$  — мощность к. з., МВА;

линия (воздушная, кабельная)

$$Л(x_0, l, U_n),$$

где  $x_0$  — реактивное сопротивление линии, Ом/км;  $l$  — длина линии, км;  $U_n$  — номинальное напряжение линии, кВ;

трансформатор двухобмоточный

$$Т(U_k \%, S_T),$$

где  $U_k \%$  — напряжение к. з.;  $S_T$  — номинальная мощность трансформатора, МВА;

трансформатор трехобмоточный

$$ТВ(U_{вн}, U_{вс}, U_{сн}, S_T);$$

$$ТС(U_{вн}, U_{вс}, U_{сн}, S_T);$$

$$ТН(U_{вн}, U_{вс}, U_{сн}, S_T),$$

где  $U_{вн}$ ,  $U_{вс}$ ,  $U_{сн}$  — напряжение к. з. между обмотками, %;  $S_T$  — номинальная мощность трансформатора, МВА;

трансформатор с расщепленной обмоткой

$$Т1 \Rightarrow 0; \quad Т2(U_{вн}, S_T); \quad Т3(U_{вн}, S_T),$$

где  $U_{вн}$  — напряжение к. з., %;  $S_T$  — номинальная мощность, МВА;

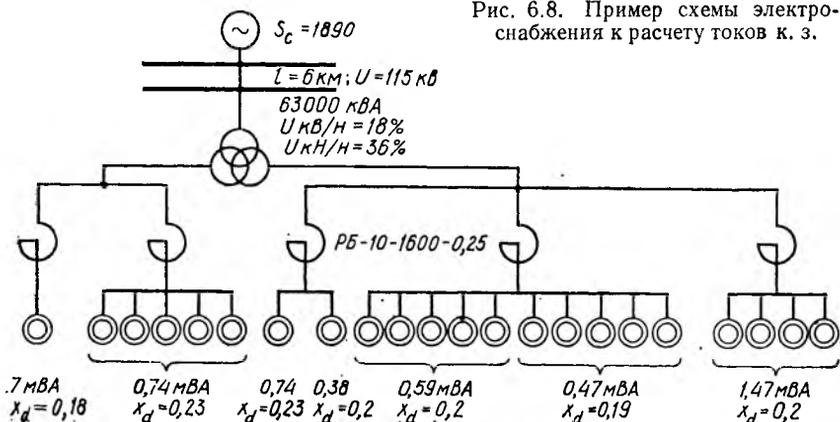


Рис. 6.8. Пример схемы электро-снабжения к расчету токов к. з.

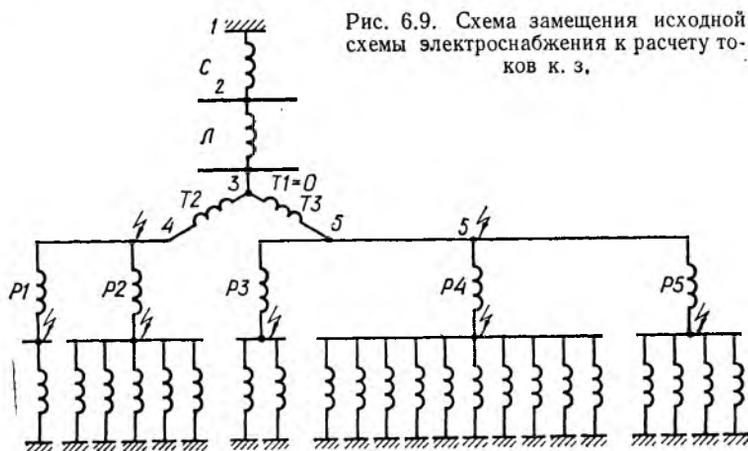


Рис. 6.9. Схема замещения исходной схемы электро-снабжения к расчету токов к. з.

реактор

$$P(X_n, U_c),$$

где  $X_n$  — реактивное сопротивление реактора, Ом;  $U_c$  — напряжение сети в точке установки реактора, кВ;

реактор двоянный

$$P1(K, X, U_c); P2(K, X, U_c); P3(K, X, U_c),$$

где  $K$  — коэффициент связи;  $X$  — реактивное сопротивление, Ом;  $U_c$  — напряжение сети в точке установки реактора;

двигатели синхронные

$$D(X_d^*, S_d),$$

где  $S_d$  — номинальная мощность, МВА;  $X_d^*$  — сверхпереходное сопротивление.

На рис. 6.8 приведен пример схемы электро-снабжения, а на рис. 6.9 — принцип нумерации ее узлов при составлении схемы замещения.

В результате работы программы для каждой точки к. з. определяются следующие параметры: базисный ток; ток к. з. в начальный момент времени; результирующее сопротивление; остаточные напряжения во всех узлах схемы; номинальные токи всех генерирующих ветвей; коэффициенты распределения тока к. з. по ветвям; расчетные сопротивления генерирующих ветвей; токи к. з. в ветвях схемы.

### 6.8. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ПУСКА И САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В СЕТЯХ 6—10 КВ

Расчеты пусковых режимов и режима самозапуска электрических двигателей напряжением 6—10 кВ по ПМ 9 выполняются для оценки возможности и выбора способа пуска мощных двигателей, оценки ответственности размахов напряжения при пуске требованиям стандартов, а также для оценки устойчивости узлов нагрузки и возможности самозапуска двигателей при кратковременном исчезновении питающего напряжения. Результаты такого расчета влияют как на схемные решения сетей 6—10 кВ, так и на мощность трансформаторов ГПП и схемные решения подстанции.

Программный модуль ПМ 9 реализует алгоритм расчета, основанный на общепринятой методике [35], и включает в качестве исходных данных характеристики механизма, приводного двигателя и электрической сети. Требуется знать также механические постоянные времени агрегатов двигатель — механизм:

$$T_i = GD_i^2 n_n^2 / (364 P_n);$$

$$GD_i^2 = GD_d + GD_m n_m^2 / n_d^2,$$

где  $GD_d$ ,  $GD_m$  — маховые моменты двигателя и механизма,  $T_m^2$ ;  $n_m$ ,  $n_d$  — номинальные скорости вращения механизма и двигателя, об/мин;  $P_n$  — номинальная мощность двигателя.

Программный модуль позволяет определить: продолжительность пуска каждого агрегата, с; нагрев пусковой обмотки, °С; нагрев обмотки статора, °С; понижение напряжения при пуске каждого двигателя, %; длительность самозапуска отдельных агрегатов при заданной длительности перерыва в электроснабжении, с; длительность группового самозапуска, с; максимальные понижения напряжения для всех случаев, %.

Результаты расчета служат основанием для выбора схемы пуска двигателей (прямой, реактивированный), изменения мощности трансформаторов ГПП, а также изменения схемных решений, например, раздельного подключения двигателей и цеховых ТП к глубоко секционированным шинам распределительных устройств.

При пуске и самозапуске производится также оценка колебаний напряжения на шинах цеховых КТП. На основании анализа состава, мощностей и режимов работы электроприемников в цеховых сетях выявляются достаточно крупные ЭП и проверяется возможность их пуска от трансформатора заданной мощности при его предварительной загрузке. Решение этой задачи с помощью ПМ 10 позволяет установить минимальную по условиям колебания напряжения мощность

трансформаторов цеховых ТП и рассматривать ее в качестве дополнительного ограничения при оптимизации мощности цеховых трансформаторов.

Рассмотрим режим пуска электродвигателя при максимальной нагрузке трансформатора, поскольку именно при этих условиях создаются наиболее неблагоприятные условия для работы присоединенных к сети приемников электроэнергии.

Условия допустимости пуска короткозамкнутого двигателя прямым включением в сеть состоят в следующем:

пускаемый двигатель должен сдвинуть с места и развернуть до нормальной скорости присоединенный к нему механизм;

снижение напряжения на шинах ТП при пуске не должно нарушить работу присоединенных к сети электроприемников;

колебания напряжения при пуске не должны оказывать заметного влияния на работу осветительных ламп.

Коэффициент мощности при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя  $\cos \varphi_n$  определяется как среднее арифметическое величин, подсчитанных по двум следующим формулам:

$$\cos \varphi_n' = \cos \varphi_n \left( \frac{m_n}{(1 - S_n) K_i} + \gamma K_i (1 - \eta_n) \right);$$

$$\cos \varphi_n'' = \frac{\eta_n \cos \varphi_n}{1 - S_n} \cdot \frac{m_n + 0,025 K_i^2}{K_i},$$

где  $\cos \varphi_n$  — коэффициент мощности;  $\eta_n$  — коэффициент полезного действия;  $m_n$  — кратность начального момента;  $K_i$  — кратность пускового тока;  $S_n$  — скольжение при номинальных нагрузке и напряжении асинхронного двигателя;  $\gamma$  — коэффициент, равный отношению переменных потерь активной мощности в двигателе к суммарным потерям.

Пусковой ток двигателя при номинальном напряжении на зажимах определяется по каталожным данным двигателя:

$$I_n = K_i I_n.$$

Для сокращения записи вводим обозначение:

$$A_d = \sqrt{3} (R_d \cos \varphi_n + X_d \sin \varphi_n) / U_n.$$

Снижение напряжения на зажимах двигателя при пуске:

$$U_d' = 1 / (1 + A_d I_n).$$

Расчетный пусковой ток с учетом снижения напряжения:

$$I_n' = U_d' I_n.$$

Величина относительного снижения напряжения при пуске асинхронного двигателя (%):

$$\Delta U = A_d I_n' 100.$$

По модулю ПМ11 производится оценка перегрузочной способности по реактивной мощности синхронных двигателей в сетях 6—10 кВ.

Реактивная мощность, генерируемая синхронными двигателями (СД), зависит от их загрузки активной мощностью и относительных

значений напряжения на вводах. При номинальных условиях отдельный СД способен генерировать мощность:

$$Q_i = a_m P_n \operatorname{tg} \varphi_n / \eta_n,$$

где  $P_n$  — номинальная активная мощность;  $\operatorname{tg} \varphi_n$ ,  $\eta_n$  — соответствующим номинальным условиям;  $a_m$  — максимальная допустимая перегрузка СД реактивной мощностью.

Исходными данными для расчета по ПМ11 служат те же табл. 6.1 и 6.2, что и для ПМ2, а значения  $a_m$  находятся в БД в зависимости от типа двигателей.

Решение данной задачи в виде

$$Q_d^B = \sum_{i=1}^n Q_i$$

позволяет учесть возможность компенсации реактивных нагрузок с помощью СД в задаче выбора оптимальной мощности цеховых ТП.

### 6.9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И ЧИСЛА ЦЕХОВЫХ КТП С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК

Выбор экономической мощности  $S_s$  и числа цеховых трансформаторных подстанций  $N_n$  является достаточно сложной технико-экономической задачей, которая решается с помощью ПМ12 и позволяет построить структуру (принципиальную схему) системы электропитания промышленного предприятия. До настоящего времени в практике проектирования  $S_s$  определялась по кривой  $S_s = f(\sigma)$ , связывающей  $S_s$  только с одним показателем — удельной плотностью электрической нагрузки  $\sigma$ , кВА/м<sup>2</sup>. Такой упрощенный подход к задаче, характерный для традиционного ручного способа проектирования, совершенно неприемлем в условиях автоматизированного проектирования. Задача определения  $S_s$  и  $N_n$  должна решаться во взаимосвязи с другими задачами САПР, а ее решение должно приводить к снижению затрат в СЭС при сохранении показателей надежности и требований к качеству электрической энергии. Поскольку СЭС имеют выраженную иерархическую функциональную структуру, определение  $S_s$  и  $N_n$  представляет собой задачу структурного синтеза и ее результат во многом определяет проектные решения на последующих этапах проектирования.

Однако аналитический подход к моделированию не позволяет учесть дискретный характер изменения параметров, влияющих на  $S_s$  и  $N_n$ , в результате чего оптимальное решение может оказаться вне области допустимых значений.

Для построения логически непротиворечивой системы допущений, позволяющих обосновать экономико-математическую модель задачи, рассмотрим основные факторы и связи, влияющие на выбор  $S_s$  и  $N_n$ .

СЭС, построенная на основе принципов теории сетей, содержит следующие функционально-структурные подсистемы (рис. 6.10):

ПП ( $S$ ,  $N$ ) — подсистема цеховых ТП (КТП);

Р ( $S$ ,  $N$ ) — подсистема распределительных устройств 6—10 кВ;

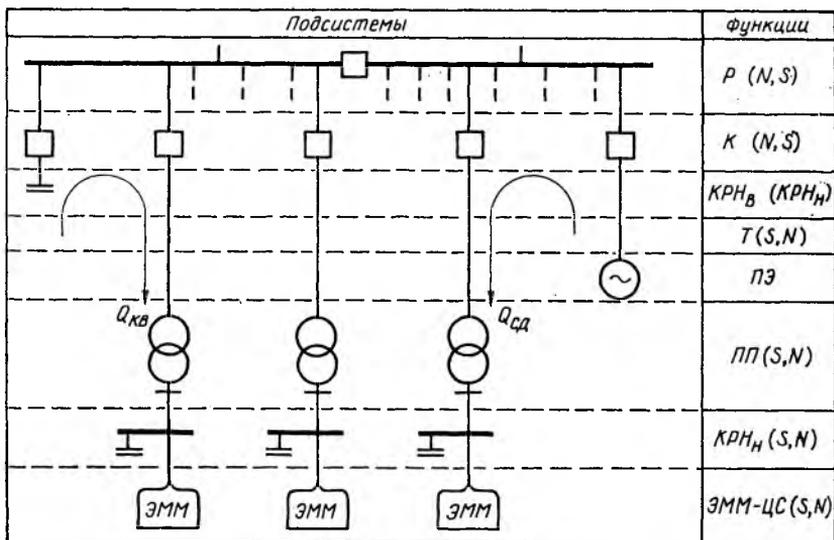


Рис. 6.10. Функциональные подсистемы СЭС в задаче оптимизации мощности и числа цеховых ТП.

$T(S, N)$  — распределительные сети 6—10 кВ;

ЭММ-ЦС — цеховые электрические сети 0,38—0,66 кВ;

$KPH(S, N)$  — компенсирующие устройства в цеховых сетях (КУ — 0,38—0,66 кВ);

$KPB(S, N)$  — компенсирующие устройства в сетях 6—10 кВ.

Каждая из подсистем выполняет свои специфические функции в общей структуре СЭС:

$P(S, N)$  — распределение электроэнергии (согласование узлов различного уровня в иерархии СЭС);

$K(S, N)$  — коммутацию (управление потоком электроэнергии по единичному признаку);

$KPB(S, N)$  — компенсацию реактивных нагрузок на напряжении свыше 1000 В;

$T(S, N)$  — транспортировку энергии (согласование координат источник — приемник);

ПЭ — преобразование электроэнергии в другие виды;

ПП(S, N) — преобразование параметров потока энергии (согласование по уровню напряжения, роду тока, частоте);

$KPH(S, N)$  — компенсацию реактивных нагрузок на напряжении до 1000 В;

ЭММ-ЦС — создание комплексной экономической модели цеховых сетей 0,38—0,66 кВ.

Постановка задачи выполняется для этапа структурного синтеза внутривзаводского электроснабжения, что отвечает технико-экономическому обоснованию на стадии рабочего проекта или начальному этапу технического проекта при одно- и двухстадийном проектировании по СН 202-81. При этом известны активная и реактивная расчетные нагрузки объекта на напряжении до 1000 В ( $P_M^H, Q_M^H$ ); активная и ре-

активная расчетные нагрузки объекта, совмещенные по вводам либо по уровням предполагаемых питающих напряжений ( $P_m^c, Q_m^c$ ); заданные энергосистемой значения реактивных нагрузок в период максимальных ( $Q_{s1}$ ) и минимальных ( $Q_{s2}$ ) нагрузок ЭЭС.

Необходимые число и мощность трансформаторов ГПП (ПГВ) зависят от расчетной нагрузки:

$$S_m = \sqrt{P_m^2 + Q_{s1}^2}.$$

При этом должно соблюдаться требование ЭЭС к режиму реактивных нагрузок ( $Q_\phi \leq Q_{s1}$ ).

Число и мощность трансформаторов ГПП (ПГВ) оказываются независимыми от способа компенсации  $Q_m^c$  до значения  $Q_{s1}$  и от числа  $N_n$  и мощности  $S_T$  цеховых ТП. В данной постановке условие  $Q_\phi \leq Q_{s1}$  рассматривается как техническое задание подсистемы, которое подлежит безусловному исполнению. Поэтому на решение задачи выбора оптимальной мощности и числа цеховых трансформаторных подстанций будут влиять только параметры ЭММ рассмотренных подсистем. Общая ЭММ указанной задачи должна учитывать взаимное влияние параметров моделей каждой из этих подсистем.

В цеховые электрические сети должна быть передана активная нагрузка  $\bar{P}_n = P_m^H$  и реактивная нагрузка: либо  $\bar{Q}_n = 0$  при полной компенсации реактивных нагрузок на напряжении цеховых сетей, либо  $\bar{Q}_n = Q_m^H$  — при полном отсутствии средств компенсации на напряжении до 1000 В.

При повышении единичной мощности трансформаторов в случае  $S_T N_n = \text{const}$  снижаются их удельные стоимость и потери мощности, суммарная длина и потери в сетях 6—10 кВ, число ячеек РУ 6—10 кВ, но возрастают капитальные вложения, потери мощности и энергии в цеховых сетях 0,38—0,66 кВ.

Компенсировав реактивную нагрузку на напряжении до 1000 В ( $Q_n^H$ ), можно добиться снижения суммарной установленной мощности цеховых ТП:

$$S_T N_n \beta_c = \sqrt{P_m^2 + (Q_m^H - Q_n^H)^2},$$

где  $\beta_c$  — среднее значение коэффициента загрузки. Это, в свою очередь, ведет к снижению суммарных затрат в СЭС.

При снижении единичной мощности цеховых трансформаторов наблюдается обратное явление: снижаются затраты в цеховые сети при росте затрат в сетях 6—10 кВ и соответствующих РУ.

Анализ соотношения затрат в различные подсистемы СЭС (табл. 6.5) показывает, что основная доля капитальных вложений приходится на силовые трансформаторы. Следовательно, сетевые факторы в общей ЭММ не имеют особого значения и, используя достаточно простые модели для сетей напряжением до и свыше 1000 В, можно получить хорошее решение задачи выбора  $S_n$  и  $N_n$ .

Применение упрощенных моделей электрических сетей обуславливается принципиальной неопределенностью проектной ситуации: параллельное проектирование сетей 10 (6) кВ и 0,4 кВ возможно только

Таблица 6.5. Соотношение затрат в элементы СЭС

Элементы СЭС	Капитальные вложения, %	Потери электроэнергии, %
Силовые трансформаторы и распределительные устройства	79,6	38,7
Электрические сети напряжением свыше 1000 В	7,4	19,6
Электрические сети напряжением до 1000 В	13,0	41,7
Итого	100	100

после выбора  $S_T$  и  $N_n$ , а для решения этой задачи требуются оценки экономических показателей этих сетей. На практике такая задача решается путем нескольких итераций, число которых зависит от опыта и эвристических способностей проектировщика.

Поскольку многие данные на этапе решения этой задачи отсутствуют или являются недостаточно достоверными, глобальный экстремум целевой функции (при формулировке задачи в терминах математического программирования) принципиально недостижим. Указанная задача является задачей нелинейного дискретного программирования (например, относительно  $S_T$  и  $N_n$ ); методы решения таких задач еще не разработаны ввиду их многоэкстремальности, а их сведение к линейным аналогам может дать результат, совершенно отличный от оптимального.

Введение некоторых допущений позволяет решить эту задачу путем простого перебора вариантов на дискретно-целочисленной решетке, что обеспечивает получение глобального экстремума. Если считать, что многие параметры задачи являются случайными величинами или оценками случайных процессов, полученное решение может быть экономически неустойчивым и, наряду с оптимальным, следует получить все близкие к нему решения.

На основании изложенного можно сформулировать следующие допущения.

Основным допущением является предположение о равенстве мощностей применяемых трансформаторных подстанций. Считается, что в основных цехах и подразделениях предприятия применяются КТП с трансформаторами одинаковой мощности. Такое допущение предполагает, что отступление от оптимума не будет значительным вследствие уменьшения объема складского резерва трансформаторов (обычно не учитываемого при решении данной задачи), а также за счет ускорения и индустриализации монтажа и снижения издержек эксплуатации и ремонтов. При этом реализуется принцип унификации.

Требования к нагрузке отдельных трансформаторов с учетом бесперебойности и надежности электроснабжения потребителей различных категорий учитываются введением среднего коэффициента загрузки  $\beta_c$ . Поскольку обычно от каждой из цеховых КТП питаются электроприемники различных категорий, предлагается учитывать это

введением коэффициента

$$\beta_c = 1/(2\delta + 1,43\gamma + \lambda), \quad (6.4)$$

где  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  — удельный вес электроприемников различных категорий (1-, 2- и 3-й соответственно) в суммарной нагрузке объекта на напряжении до 1000 В.

Выбор цеховых трансформаторов производится по расчетной нагрузке, которая определяется суммированием по отдельным цехам (корпусам) средних нагрузок за максимально загруженную смену:

$$P_m^H = \sum_{j=1}^m P_{cj}; \quad Q_m^H = \sum_{j=1}^m Q_{cj}.$$

Такое предположение позволяет учесть большие, по сравнению с проводниками сети, постоянные времени нагрева трансформаторов.

При заданной единичной мощности трансформатора цеховой подстанции  $S_i$  их число при известных активных и реактивных нагрузках при  $U_n < 1000$  В изменяется от  $N_{\min}$  до  $N_{\max}$ .

$$N_{\min} = P_m^H / (\beta_c S_i).$$

Этот случай соответствует полной компенсации реактивных нагрузок на напряжении до 1000 В.

$$N_{\max} = \sqrt{P_m^2 + Q_m^2} / (\beta_c S_i),$$

при этом полагают, что реактивные нагрузки на напряжении 0,4 кВ не компенсируются.

Принимают, что нагрузки по всему объекту (цеху, корпусу, блоку цехов) распределены равномерно; РУ 6—10 кВ, питающие КТП, размещены у наружных стен зданий, либо по их центральным осям; цеховые КТП размещаются в центрах нагрузок, обслуживаемых ими участков.

Средняя длина линии распределительной сети 6—10 кВ определяется выражением

$$L_c = 0,5K_k \sqrt{\Pi}, \quad (6.5)$$

где  $\Pi$  — площадь объекта, км<sup>2</sup>;  $K_k$  — коэффициент конфигурации, который равен 1,4—2,0.

Предполагается, что компенсирующие устройства в сети 0,38 кВ устанавливаются на шинах низшего напряжения цеховых ТП. Поскольку стоимость КТП намного выше разницы в стоимости компенсирующих устройств на напряжении 6—10 и 0,4 кВ, можно считать, что снижение числа КТП (или же суммарной мощности) до оптимального значения всегда оправдано. При этом реактивная мощность на напряжении свыше 1000 В (куда входят реактивные нагрузки электроприемников и преобразователей с напряжением свыше 1000 В, потери реактивной мощности в КТП и сетях, а также часть реактивной мощности  $Q_n^H$  в сетях напряжением до 1000 В, которая остается некомпенсированной) генерируется синхронными двигателями или конденсаторными установками сети 6—10 кВ:

$$Q_m = Q_B + \sum_{i=1}^N \Delta Q_i + (Q_m^H - Q_n^H) - \sum_{r=1}^k Q_{kr}^B.$$

Тогда, при заданном энергосистемой значении реактивной мощности  $Q_{s1}$ , которую экономически целесообразно передать предприятию в период максимальных нагрузок системы, на напряжении свыше 1000 В должно быть скомпенсировано:

$$Q_k^H = K_n \left( Q_M - Q_{s1} - \sum_{m=1}^M \Delta Q_m \right),$$

где  $\sum_{m=1}^M \Delta Q_m$  — суммарные потери реактивной мощности в трансформаторах ГПП (ПГВ);  $K_n$  — коэффициент учета напряжения.

Рассмотренные допущения позволяют свести задачу определения экономической мощности и числа цеховых КТП к вычислению приведенных затрат по всем указанным подсистемам СЭС. Подобный подход к задаче предполагает возможность получения не единственного числового решения, а ограниченного (в силу допущения 1) множества решений, из которого проектировщик может обоснованно выбрать наиболее подходящее для конкретных условий.

Технико-экономическая модель СЭС для данной задачи представляет собой сумму приведенных затрат по всем взаимосвязанным подсистемам для каждого рассматриваемого варианта:

$$Z_i = Z_{pi} + Z_{pi} + Z_{li} + Z_{ki}^H + Z_{ki}^B + Z_{ci}, \quad (6.6)$$

где  $Z_{pi}$  — приведенные затраты на КТП, тыс. руб./год;  $Z_{pi}$  — то же на распределительные устройства 6—10 кВ;  $Z_{li}$  — то же, на сети 6—10 кВ;  $Z_{ki}^H$  — то же, на конденсаторные установки 0,4 кВ;  $Z_{ki}^B$  — то же, на компенсирующие устройства в сетях 6—10 кВ;  $Z_{ci}$  — затраты по цеховым сетям 0,4 кВ.

Варианты СЭС синтезируются следующим образом.

Для КТП с трансформаторами заданной мощности  $S_{Ti}$ , соответствующей стандартному ряду мощностей (400—2500) кВА и  $(2 \times 400 - 2 \times 2500)$  кВА, определяется минимальное и максимальное (при заданной нагрузке) число подстанций:

$$N_{\min} = \varepsilon (P_M^H / (\beta_c S_T n_T) + 0,5); \quad (6.7)$$

$$N_{\max} = \varepsilon \left( \sqrt{P_M^2 + Q_M^2} / (\beta_c S_T n_T) + 0,5 \right), \quad (6.8)$$

где  $n_T$  — число трансформаторов на каждой КТП.

Для  $N_{\min}$  вычисляются затраты  $Z_{li}$ . Далее число КТП увеличивается на единицу и определяются затраты  $Z_{2i}$ . Этот процесс продолжается с шагом  $\Delta N = 1$  до  $N_{\max}$ , причем на каждом шаге вычисляются  $Z_{li}$ . В выражениях (6.7), (6.8)  $\varepsilon$  — оператор выделения целой части числа.

Для получения корректной модели поставленной задачи определяются отдельные составляющие (6.6).

Капитальные вложения в КТП

$$K_{n/i} = C_{ni} N_{li},$$

где  $C_{ni}$  — стоимость КТП с трансформаторами  $S_{Ti}$ , тыс. руб.

## Капитальные вложения в РУ 6—10 кВ

$$K_{pji} = C_{pi} N_{ji} n_{ti} K_n,$$

где  $C_{pi}$  — стоимость ячейки РУ с выключателем, тыс. руб.;  $K_n$  — коэффициент присоединения, учитывающий возможность подключения к одному выключателю одного, двух или трех трансформаторов ( $K_n = 1,0; 0,5; 0,33$ ).

Капитальные вложения в распределительные сети 6—10 кВ в соответствии с ПУЭ выбираются по экономической плотности тока с округлением полученных значений (в меньшую сторону) до ближайших стандартных и проверкой по нагреву в нормальном и послеаварийном режимах. Кроме того, учитывая необходимость проверки сечений кабелей по термической стойкости к действию токов к. з., считается, что сечения кабелей  $F_k$  не могут быть ниже 50 мм<sup>2</sup>. Экономическая плотность тока определяется из выражения

$$j_s = \sqrt{p_d a_d 10^3 / (3 \rho m)},$$

где  $p_d$  — суммарный коэффициент отчислений от капиталовложений в линии 6—10 кВ;  $a_d$  — зависящая от сечения проводника часть капиталовложений в линии 6—10 кВ, тыс. руб./мм<sup>2</sup> · км;  $\rho$  — удельное сопротивление материала проводников, Ом · мм<sup>2</sup>/км;  $m$  — стоимость потерь электроэнергии, тыс. руб./кВт. год.

Расчетный ток нормального режима определяется по формуле

$$I_{pi} = K_1 S_{Ti} \beta_c K_M / (\sqrt{3} U_n),$$

где  $K_1$  — коэффициент, приближенно учитывающий потери мощности в трансформаторах ( $K_1 = 1,05$ );  $U_n$  — напряжение распределительной сети, кВ;  $K_M$  — среднее значение коэффициента максимума нагрузки.

Экономическое сечение проводника

$$F_s \leq I_{pi} / j_s.$$

Выбирается меньшее стандартное сечение и проверяется по нагреву в нормальном режиме

$$I_{pi} \leq I_d.$$

При необходимости сечение усиливается до  $F_n'$ . Выбранное сечение проверяется по условиям нагрева в послеаварийном режиме:

$$I_p' = K_1 \cdot S_{Ti} \cdot 1,4 \cdot K_n / (\sqrt{3} U_n) \leq I_d.$$

При необходимости сечение усиливается до  $F_n''$ . Находится большее из всех сечений  $F_s, F_k, F_n', F_n''$ .

Капиталовложения в распределительные сети определяются по формуле

$$K_{лji} = K_y(F) L_c n_{ti} N_{ji},$$

где  $K_y(F)$  — удельная стоимость одного километра кабеля для выбранного сечения  $F$ , тыс. руб./км;  $L_c$  — средняя длина сети 6—10 кВ, км, определяемая по (6.5).

Капитальные вложения в КУ 0,4 кВ находятся по формуле

$$K_{кji}^H = C_k^H Q_{кji}^H, \quad (6.9)$$

где  $C_k^H$  — удельная стоимость конденсаторов 0,4 кВ, тыс. руб./квар. Значение  $Q_{кji}^H$  в (6.9) зависит от принимаемых в данном варианте мощности и числа КТП

$$Q_{кji}^H = Q_M^H - \sqrt{(N_{ji} n_{\tau i} \beta_c S_{\tau i})^2 - P_M^2},$$

где  $P_M$  — расчетная активная среднесменная нагрузка при напряжении до 1000 В;  $Q_M^H$  — то же, реактивная.

Капитальные затраты в электрические сети напряжением до 1000 В определяются в виде кусочно-линейных зависимостей для различных конструктивных исполнений сети:

$$K_{ц1} = F_1(S_{\tau i}, \beta_c, N_{ji});$$

$$K_{ц2} = F_2(S_{\tau i}, \beta_c, N_{ji}).$$

Эти зависимости получены путем аппроксимации по методу наименьших квадратов результатов моделирования цеховых сетей.

Капитальные затраты в КУ 6—10 кВ

$$K_{кji}^B = C_k^B Q_{кji}^B,$$

где  $C_k^B$  — удельная стоимость конденсаторов на напряжение выше 1000 В (с учетом коммутационной и защитной аппаратуры), тыс. руб./квар;  $Q_{кji}^B$  — определяется по формуле

$$Q_{кji}^B = Q_M^C - Q_{э1} - Q_{кji}^H - Q_d,$$

где  $Q_M^C$  — расчетная реактивная нагрузка по предприятию в целом;  $Q_{э1}$  — реактивная мощность, которую энергосистема может передать в сеть предприятия в период максимальных нагрузок;  $Q_d$  — реактивная мощность, генерируемая синхронными двигателями.

Приведенные затраты по КТП определяются с учетом стоимости потерь энергии в трансформаторах

$$C_{эп} = \Delta P_{ni} \beta_c^2 N_{ji} n_{\tau i} m + \Delta P_{xi} n_{\tau i} N_{ji} m_0,$$

где  $\Delta P_{ni}$  — номинальные активные нагрузочные потери в трансформаторе мощностью  $S_{\tau i}$ , кВт;  $\Delta P_{xi}$  — то же, холостого хода, кВт;  $m$  — стоимость одного киловатта нагрузочных потерь, тыс. руб./кВт · год;  $m_0$  — то же, потерь холостого хода.

Тогда приведенные затраты по КТП определяются из выражения

$$Z_{nji} = \rho_n K_{nji} + C_{эп},$$

где  $\rho_n$  — суммарный коэффициент отчислений от капиталовложений в КТП, принимаемый равным 0,193.

Приведенные затраты по РУ 6—10 кВ без учета потерь, которыми можно пренебречь, определяют по формуле

$$Z_{py} = \rho_p K_{pyi},$$

где  $\rho_p$  — суммарный коэффициент отчислений от капиталовложений в РУ, равный 0,193.

Приведенные затраты в распределительных сетях 6—10 кВ определяют с учетом суммарных потерь мощности

$$\Delta P_{Mj} = 3I_{pi}^2 r_{0i} L_c N_{ji} n_{Ti} 10^{-3},$$

стоимости потерь энергии

$$C_{эпj} = m \Delta P_{Mj}$$

и рассчитываются по формуле

$$З_{лji} = \rho_{л} K_{лji} + C_{эпj},$$

где  $\rho_{л}$  — суммарный коэффициент отчислений от капиталовложений в линии 6—10 кВ ( $\rho_{л} = 0,152$ ).

Приведенные затраты в КУ 0,4 кВ определяются следующим образом. Вычисляются потери активной мощности в конденсаторах

$$\Delta P_{kj}^H = \Delta P_{y} Q_{kji}^H.$$

Находится стоимость потерь

$$C_{эkj} = \Delta P_{kj}^H m.$$

Определяются приведенные затраты

$$З_{кji}^H = \rho_{к} K_{кji}^H + C_{эkj},$$

где  $\rho_{к}$  — суммарный коэффициент отчислений от капиталовложений в КУ 0,4.

Приведенные затраты в цеховой сети 0,4 кВ рассчитываются путем ее моделирования (аналогично капитальным вложениям) в виде кусочно-линейных зависимостей:

$$З_{ц1} = \Phi_1(S_{Ti}, N_{ji}, \beta_c);$$

$$З_{ц2} = \Phi_2(S_{Ti}, N_{ji}, \beta_c).$$

Принцип аппроксимации кривых затрат для ЭММ цеховых сетей показан на рис. 6.11. Кривые 1—3 соответствуют различным конструктивным исполнениям сети.

$З, \text{ тыс. руб.}$

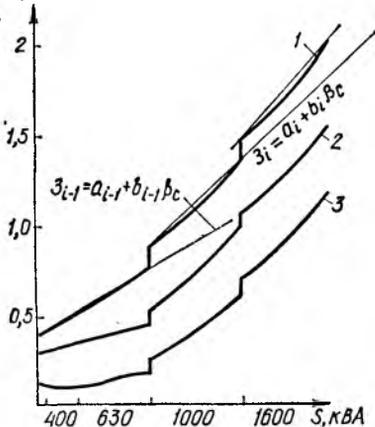


Рис. 6.11. Принцип аппроксимации функции затрат в ЭММ цеховых сетей.

$З, \text{ тыс. руб.}$

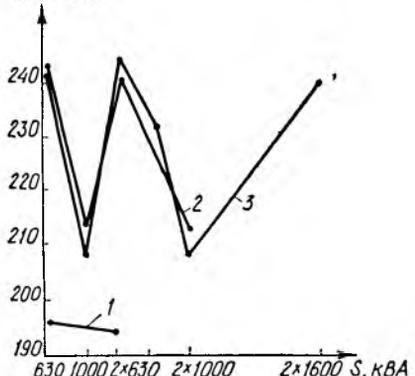


Рис. 6.12. Пример интерпретации результатов выбора оптимальной мощности и числа подстанций.

Таким образом, решение задачи сводится к вычислению функции затрат в узлах дискретно-целочисленной решетки, одной из осей которой является дискретная шкала мощностей трансформаторов ( $S_{Ti}$ ), а второй — целочисленная ось числа подстанций  $N_{ji}$ .

Пример интерпретации результатов вычислений (рис. 6.12) показывает, что целевая функция является многоэкстремальной. Ломаные линии 1—3 на рисунке соответствуют трансформаторным подстанциям Хмельницкого, Чирчикского и Армянского трансформаторных заводов, отличающимися конструкцией распределительных шкафов низшего напряжения.

## 6.10. ФОРМИРОВАНИЕ ОПИСАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6—10 кВ МЕТОДОМ АДРЕСНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Выбор элементов, расчет режимов и определение параметров электрических сетей 6—10 кВ возможны, если задан альтернативный вариант схемы этих сетей (ПМ13).

Поскольку расчет режимов электрической сети базируется на фундаментальных уравнениях Кирхгофа, большое значение приобретают вопросы автоматизации составления этих уравнений, их редактирования и преобразования. При этом основную роль играют топологические матрицы (матрицы инциденций), требующие больших объемов памяти ЭВМ и обладающие низкой степенью заполненности.

Традиционным стал матричный метод расчета электрических сетей, требующий задания информации о топологии сети в виде матрицы инциденций. Первая матрица соединений по узлам (инциденций) служит для обобщенного аналитического представления схемы соединений узлов и ветвей (вершин и ребер) в направленном графе, отражающем схему электрической сети. При этом используются коэффициенты соединений.

Коэффициент соединения равен положительной единице (+1), если какой-либо узел  $i$  является начальной вершиной ветви  $j$ ; нулю, если узел  $i$  не является вершиной ветви  $j$ ; отрицательной единице (—1), если узел  $i$  является конечной вершиной ветви  $j$ . В матрице соединений строки соответствуют номерам узлов, а столбцы — номерам ветвей. На пересечении строки  $i$  и столбца  $j$  располагаются коэффициенты инцидентности. Матрица является прямоугольной, поскольку в общем случае число узлов схемы не равно числу ветвей ( $N_u \neq N_b$ ).

Данный способ описания структуры сети в ЭВМ предполагает возможность использования матричной формы записи уравнений Кирхгофа для электрической сети и применения стандартных программ преобразования матриц, что ведет к ускорению процесса программирования и упрощения программ. Однако он весьма неэкономичен с точки зрения требуемого объема памяти ЭВМ и затрудняет возможность обнаружения ошибок исходной информации и их исправления, редактирования.

В начале 60-х годов на кафедре электрических сетей и систем КПИ был разработан метод, основанный на работах института кибернетики АН УССР по адресному программированию, который позволил преодолеть затруднения, связанные с представлением в памяти ЭВМ ин-

формации о топологической структуре сети, справочных таблиц и массивов, с программированием соотношений, выражающих законы Кирхгофа и т. д. В дальнейшем этот метод получил название метода второго адресного отображения или ВАО.

Сущность метода состоит в том, что в программе указываются не собственно числа, с которыми предстоит производить вычисления, а адреса этих чисел в исходных списках. Такой подход позволяет экономить память ЭВМ при решении задач на сетях достаточно большого объема и предполагает произвольную нумерацию и размещение данных о топологии сети в памяти ЭВМ.

Программы для ЭВМ с использованием этого метода дают возможность непосредственного применения форм записи информации, удобных для человека, либо обеспечивают возможность автоматической переработки информации в форму, удобную для ЭВМ. Применение алгоритмов и программ, использующих метод ВАО, позволяет предельно упростить процесс подготовки исходных данных и обработки результатов расчетов.

Применение ВАО в САПР электроснабжения может оказаться наиболее эффективным, поскольку системы электроснабжения современных предприятий имеют достаточно сложную топологическую структуру и число отдельных электроприемников обычно достигает нескольких тысяч. Кроме того, разработанные к настоящему моменту методы проектирования требуют форм представления информации в ЭВМ наиболее близких к человеческому восприятию.

Принципы формирования адресных отображений удобно рассматривать на примере фрагмента электрической сети. Предположим, задана сеть (рис. 6.13). Необходимо занести информацию о топологической структуре данной сети в ЭВМ, причем должны быть выполнены следующие условия:

- информация должна занимать, по возможности, минимальный объем памяти ЭВМ;

- не должны существовать определенные правила по составлению исходной информации и нумерации пунктов сети, что обычно ведет к существенному усложнению процесса подготовки исходных данных для ЭВМ;

- необходимо обеспечить возможность произвольной нумерации элементов сети, причем под номерами будем понимать не только цифровые обозначения, но и собственные имена, названия, марки оборудования;

- в списках участков сети должна допускаться обратная запись (т. е. в список начала участков может быть занесен индекс конца какого-либо участка и наоборот);

- должна допускаться произвольная последовательность записи информации об узлах и ветвях сети в исходные списки.

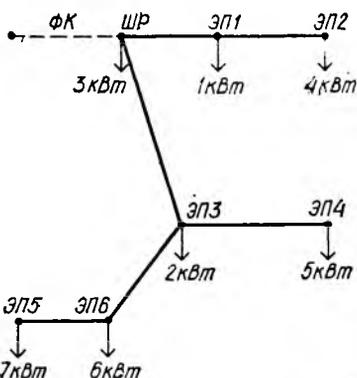


Рис. 6.13. Схема электрической сети для примера составления массивов ВАО.

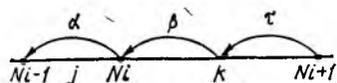


Рис. 6.14. Принцип установления ассоциативных связей ВАО на графе сети.

Исходные списки обозначений узлов и ветвей сети по рис. 6.13 приведены в табл. 6.6.

Для построения ВАО необходимо задаться некоторой структурой ассоциативных связей элементов графа сети, причем возможно построение целого ряда таких структур, каждая из которых имеет свои преимущества и должна задаваться в зависимости от структуры математической модели решаемой задачи.

На рис. 6.14 приведена одна из возможных структур ассоциативных связей, которая позволяет установить соответствие между последовательностью соединения элементов графа сети и их местом в исходных списках.

Параметр ассоциативной связи  $\alpha$  устанавливает соответствие между номером элемента в списке узлов и номером питающей этот узел ветви в списке ветвей.

Параметр  $\beta$  устанавливает соответствие между номером рассматриваемой ветви в списке наименований ветвей и номером узла (в списке наименований узлов), питающего эту ветвь.

Параметр  $\tau$  устанавливает соответствие между номером рассматриваемой ветви и номером узла, питающегося от этой ветви.

Задавшись указанной структурой, можно построить таблицу ВАО (табл. 6.7), в которой указаны уже не узлы и ветви графа, а их адреса в соответствующих строках табл. 6.6.

Логика составления таблицы ВАО следующая. Рассматривается первый узел в списке наименований узлов (ЭП1). В массив А — ВАО заносится число, обозначающее номер ветви в списках исходных данных, от которой питается данный узел. Такой ветвью является ветвь ШР — ЭП1, которая в соответствующем списке находится под номером 3. Поэтому первым элементом массива А — ВАО будет цифра 3. Аналогично для второго узла (ЭП3) питающей ветвью является ветвь ШР — ЭП3, расположенная в начальном списке ветвей под номером 6. Эта цифра и помещается в массив А — ВАО под вторым номером. Рассмотрим ветвь ЭП6 — ЭП5, расположенную в списке наименований ветвей под первым номером. Для этой ветви питающим является узел ЭП6, расположенный в списке наименований узлов под номером 6.

Таблица 6.6. Исходные данные для электрической сети по рис. 6.13

№ п/п	Наименование узлов	Наименование ветвей	
		начало ветви	конец ветви
1	ЭП1	ЭП6	ЭП5
2	ЭП3	ЭП3	ЭП4
3	ШР	ШР	ЭП1
4	ЭП2	ЭП3	ЭП6
5	ЭП4	ЭП1	ЭП2
6	ЭП6	ЭП3	ШР
7	ЭП5	ФК	ШР

Таблица 6.7. Массивы ВАО, соответствующие исходным данным табл. 6.6 и рис. 6.14

№ п/п	Массивы вторых адресных отображений		
	А	В	Т
1	3	6	7
2	6	2	5
3	7	3	1
4	5	2	6
5	2	1	4
6	4	3	2
7	1	3	3

Это число заносится в качестве первого элемента массива В — ВАО. Узлом, питаемым этой же ветвью, является узел ЭП5, занимающий в списке наименований узлов седьмое место. Поэтому цифра 7 является первым элементом массива Т — ВАО. В табл. 6.7 содержатся массивы ВАО для заданных списков исходных данных и структуры ассоциативных связей рис. 6.14.

Поручить составление массивов ВАО проектировщику — означает резко повысить вероятность появления ошибки и загрузить его рутинной механической работой. Поэтому необходимо, чтобы массивы ВАО составляла ЭВМ по спискам исходных данных, а также поручить ей контроль введенных исходных данных. Этот контроль может быть основан на требовании связности исходного графа сети, представленного соответствующими списками узлов и ветвей.

Предположим, ЭВМ выделяет первый элемент списка наименований узлов (ЭП1). Узел может быть корнем дерева (в таком случае он обязательно входит в комбинацию наименований фиктивной ветви) или висячей вершиной графа (в списках наименований ветвей он встретится только один раз). Это означает, что данному узлу можно поставить в соответствие ветвь из списка наименований ветвей, причем единственную, а следовательно, занести в один из массивов ВАО соответствующую цифру.

Наиболее сложным является случай, когда анализируемый узел является промежуточным, например узел ЭП1. В списках наименований узлов этот узел встречается дважды. Это означает, что существует ветвь графа сети, питающая узел, и ветвь, питающаяся от него. Имеются две комбинации: ШР — ЭП1 и ЭП1 — ЭП2. Просматривая повторно списки наименований ветвей, но уже сопоставляя имена ШР и ЭП2, можно установить, что ШР является корневой вершиной дерева сети и, следовательно, питающей ЭП1, а ЭП2 — висячей вершиной и, следовательно, питающейся от ЭП1. Это позволяет занести в массивы ВАО цифры, соответствующие номерам этих ветвей в исходном списке.

Таким образом, путем использования операции сравнения при просмотре списков исходных данных процесс составления массивов ВАО может быть автоматизирован.

После составления массивов ВАО списки исходных данных, как это видно из алгоритмов, оказываются уже не нужными для расчетов — можно передать во внешнее запоминающее устройство, где они будут храниться до вывода на печать результатов расчета. Следовательно, три массива ВАО, имеющие размерность М, полностью и однозначно определяют структуру графа сети в памяти ЭВМ.

Значение М численно равно количеству узлов рассматриваемой сети. Требуемый объем памяти

$$V_1 = 3 \cdot M.$$

Это во много раз меньше (для сетей большой размерности), чем необходимо при составлении матрицы инциденций

$$V_2 = M(M - 1).$$

Преимущества этого метода ВАО следующие: малый требуемый объем оперативной памяти ЭВМ; максимальная простота процесса подготовки исходных данных; отсутствие сложных правил предвари-

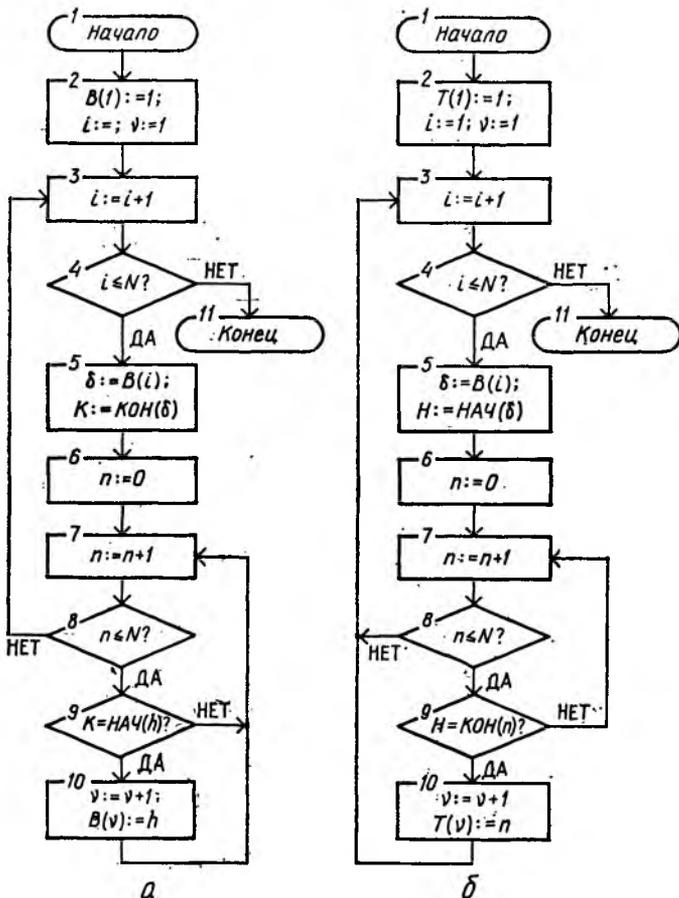


Рис. 6.15. Упрощенная блок-схема алгоритма формирования массивов ВАО.

тельной нумерации и ранжирования элементов графа сети (метод используют с именами и названиями, заданными в виде буквенно-числовых комбинаций); возможность построения основных массивов ВАО программным путем, что снижает вероятность появления ошибок; возможность программного контроля исходной информации; простота корректировки исходных данных (можно вычеркнуть при помощи дисплея и светового пера любой элемент списков исходных данных и ввести корректирующий элемент в любое место исходных списков), не требующая полной их замены; возможность организации эффективного диалога проектировщик — ЭВМ, поскольку действия ЭВМ и представление в ней информации очень близки к естественному ходу мышления проектировщика:

Упрощенная блок-схема алгоритма формирования ВАО [2], не содержащая операций проверки связности сети и диагностики ошибок, приведена на рис. 6.15. Данный алгоритм положен в основу модуля

Таблица 6.8. Составление ВАО по упрощенному алгоритму

№ п/п	Ветви схемы		В-массив	Т-массив
	начало	конец		
1	0	6	1	1
2	2	4	3	1
3	6	7	6	1
4	2	1	5	3
5	7	3	7	3
6	6	2	2	6
7	7	5	4	6

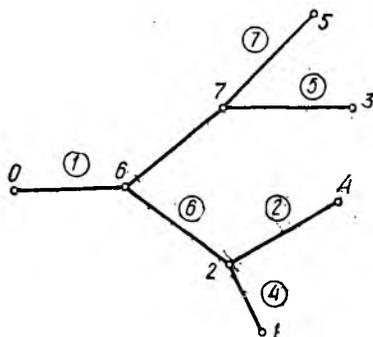


Рис. 6.16. Пример электрической сети для построения упрощенного алгоритма формирования ВАО.

ПМ-14 и отличается от представленного на рис. 6.14 принципа задания ассоциативных связей.

Для алгоритма составления ВАО списки начальных и конечных узлов разомкнутой электрической сети задаются соответствующими одномерными массивами НАЧ и КОН; задается также значение  $N$  — общее число ветвей схемы.

Первый элемент массивов  $B$  и  $T$  всегда равен единице, т. е.  $B(1) = 1$ ;  $T(1) = 1$ .

Для составления массива  $B(i)$  организуется его последовательный просмотр. В общем случае, рассматривая  $i$ -й элемент, значение которого  $\delta = B(i)$ , находят концевой узел ветви с номером  $\delta$  и обозначают этот узел через  $k = \text{КОН}(\delta)$ . Далее узел  $k$  находят в списке начальных ветвей сети. Те ветви, для которых узел  $k$  является началом, записываются подряд в массив  $B(i)$ . После полного просмотра списка начальных узлов рассматривается очередной  $(i + 1)$ -й элемент массива  $B(i)$ . Принцип составления  $B$ -массива рассмотрен на примере сети (рис. 6.16). В данном методе формирования  $B$ - и  $T$ -массивов ветвь, исходящая из центра питания (или балансирующего пункта), записывается в списках первой, а остальные ветви могут быть заданы в произвольном порядке.

В табл. 6.8 представлены исходные массивы НАЧ и КОН, а также образуемые  $B$ - и  $T$ -массивы (таблица содержит результат построения этих массивов).

Проверяется последовательность заполнения массивов  $B(i)$  и  $T(i)$  на основании блок-схем, приведенных соответственно на рис. 6.15, а и 6.15, б. Для  $i = 1$  устанавливается значение  $B(1) = 1$ . Концом ветви с номером  $\delta = 1$  служит узел б, который является начальным для ветвей 3 и 6. Эти ветви последовательно записываются в список:  $B(2) = 3$  и  $B(3) = 6$ .

Далее рассматривается  $B(2) = 3$ , который указывает на конечный узел ветви 3. Поскольку это узел 7, то в массив записываются последовательно номера 5 и 7, под которыми узел 7 значится в списке начал ветвей (т. е.  $k = \text{КОН}(\delta)$ ).

Для составления  $T$ -массива также организуется просмотр элементов  $B$ -массива, начиная с  $i = 2$ . Для рассматриваемого элемента

находится ветвь  $\delta = B(i)$ , а далее в списке концов ветвей находится начальный узел этой ветви — НАЧ ( $\delta$ ). Та ветвь, для которой узел НАЧ ( $\delta$ ) является конечным, фиксируется в  $T$ -массиве. Если же такой ветви в списке не оказывается, то это означает висячую вершину и в  $T$ -массиве она не отображается.

### 6.11. ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ И МЕСТ УСТАНОВКИ ИРМ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

При классической постановке задачи выбора компенсирующих устройств считаются заданными нагрузки узлов, конфигурация и параметры сети и требуется минимизировать функцию приведенных затрат [1]:

$$Z = Z(Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{km}) \rightarrow \min \quad (6.10)$$

при учете ограничений по балансу реактивной мощности, по допустимым мощностям источников реактивной мощности (ИРМ), напряжений в узлах и токов в ветвях схемы. Более подробно (6.10) можно записать в виде аддитивной функции

$$Z = \sum_{i=1}^m Z_{ki}(Q_{ki}) + I_n,$$

где  $Z_{ki}(Q_{ki})$  — затраты на установку и эксплуатацию ИРМ;  $I_n$  — издержки, связанные с потерями активной мощности и электроэнергии в элементах сети.

Для регулируемых компенсирующих устройств (КУ) напряжением 0,4 кВ структура затрат имеет вид

$$Z_k(Q_k^H) = p_k(K_0 n_c + K_y Q_k^H) + I_k(Q_k^H),$$

где  $K_0$  — затраты на установку коммутирующего аппарата для одной секции КУ;  $n_c$  — число секций;  $K_y$  — удельная стоимость КУ;  $p_k = p_n + p_a + p_0$  — суммарный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $I_k(Q_k^H) = \Delta P_k Q_k^H t$  — издержки, связанные с потерями мощности в конденсаторах.

Дополнительные потери мощности в синхронных двигателях, связанные с их использованием для генерирования реактивной мощности, можно оценить из выражения

$$\Delta P_d = D_1 Q_d^H / Q_{нд} + D_2 Q_d^2 / Q_{нд}^2,$$

где  $D_1, D_2$  — коэффициенты, определяемые для каждого типа двигателей;  $Q_{нд}$  и  $Q_d$  — номинальное и используемое значения реактивной мощности СД. Стоимость этих потерь определится как

$$I_d(Q_d) = \Delta P_d t.$$

Энергосистема как источник реактивной мощности рассматривается в расчетах распределительных сетей в виде эквивалентного генератора с функцией затрат вида [2]:

$$Z_c(Q) = Z_{1c} Q_c + Z_{2c} Q_c^2,$$

где  $Z_{1c}, Z_{2c}$  — коэффициенты, задаваемые энергосистемой или определяемые по специальным методикам.

Величина годовых издержек, связанных с потерями мощности и энергии в элементах сети (в линиях, трансформаторах), определяется по известным выражениям.

Алгоритм оптимизации традиционно состоит из прямого и обратного ходов.

Процесс оптимизации разделяется на ряд шагов, на каждом из которых в рассмотрение включается очередной узел возможной (или существующей) установки ИРМ.

На первом шаге рассматривается размещение ИРМ в первом узле и анализируется лишь часть сети, содержащая первый источник. Для этой части сети строится эквивалентная характеристика  $Z_1(Q_{к1})$ , представляющая собой зависимость минимальных приведенных затрат на компенсацию реактивных нагрузок на рассматриваемом участке от суммарной реактивной мощности  $Q_{к1}^p$  охватываемых источников.

Очевидно, что на первом шаге оптимизации  $Q_{к1}^p = Q_{к1}$ , а затраты  $Z_1 = Z_1(Q_{к1})$ . Величина  $Z_i(Q_{кi})$  далее будет называться характеристикой висячей ветви. Эквивалентирование характеристик ветвей сети и расчет затратных характеристик ИРМ выполняются в соответствии с алгоритмом (рис. 6.17), базирующимся на представлении топологии сети массивами ВАО.

Блок 1 обеспечивает переход на последующую  $i$ -ю строку таблицы ВАО — ТАО при ее просмотре снизу вверх, а блоком 2 фиксируются соответствующие значения адресных отображений  $B(i)$  и  $T(i)$ . Блок 3 проверяет принадлежность рассматриваемой ветви  $B(i)$  к висячим и при положительном решении блоком 4 проверяется наличие ИРМ в конечном узле этой ветви. Если ИРМ отсутствует, управление передается блоку 1 и рассматривается следующая по порядку ветвь схемы. При наличии ИРМ блоком 5 выполняется расчет характеристики затрат ИРМ — ветвь; элементу вспомогательного массива меток  $M2(B)$  присваивается единичное значение, а ветви  $T(i)$  — характеристика ветви  $B(i)$ . Это присвоение выполняется в блоке 8 при условии  $M2(T) = 0$ , определяемом блоком 7. В случае  $M2(T) \neq 0$  блоком 15 выполняется эквивалентирование характеристик  $B(i)$  и  $T(i)$  методом динамического программирования и запись результата в строку  $T(i)$ . После этого в массив меток  $M2(T)$  записывается единица (блок 9), показывающая, что эквивалентирование данной ветви уже выполнено, и начинается просмотр следующей строки исходной таблицы.

Если же блоком 3 определено, что рассматриваемая ветвь не является висячей, управление передается блоку 10, проверяющему наличие

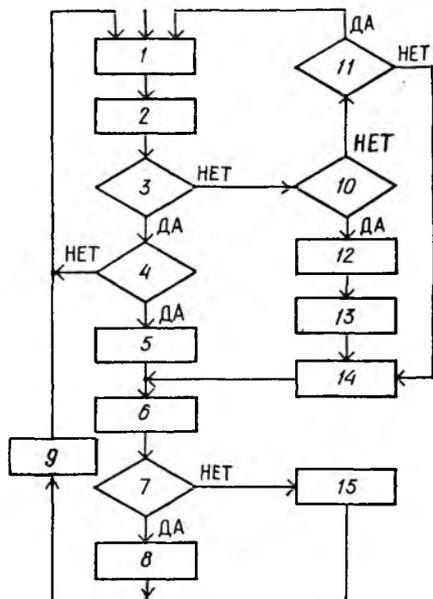


Рис. 6.17. Блок-схема алгоритма выбора мощности и расстановки ИРМ в сети.

ИРМ в конце общей ветви. При отсутствии источника реактивной мощности и нулевом значении элемента — метки  $M2(B)$  в блоке 11 происходит обращение к блоку 1. В случае, когда  $M2(B) \neq 0$  выполняется переход на блок 14, в котором рассчитываются потери мощности в общей ветви. При положительном решении блока 10 выполняется расчет характеристики затрат ИРМ (блок 12) с последующим эквивалентированием этой характеристики с характеристикой ветви  $B(i)$  по методу динамического программирования и переходом к блоку 14.

На втором шаге выполняется совместная оптимизация первых двух ИРМ, причем рассматривается участок сети, включающий оба этих источника. Минимизация выполняется по рекуррентному соотношению

$$Z_2(Q_{k2}) = \min_{Q_{k2}} \{Z_2(Q_{k2}) + Z_1(Q_{k2} - Q_{k1})\}, \quad (6.11)$$

при этом мощность второй ветви —  $Q_{k2}$ , а первой ветви —  $Q_{k1} = Q_{k2} - Q_{k2}$ .

Оптимизация по (6.11) ведется для каждого допустимого дискретного значения мощности первых двух источников.

Функциональное уравнение Беллмана для первого шага оптимизации запишем в виде

$$Z_i(Q_{ki}) = \min \{Z_i(Q_{ki}) - Z_{i-1}(Q_{ki} - Q_{ki})\}. \quad (6.12)$$

Построение этой функции может выполняться на интервале  $Q_{ki\min}^3 \leq Q_{ki}^3 \leq Q_{ki\max}^3$  с заданным шагом дискретизации  $h$ .

Минимизация с учетом (6.12) осуществляется для каждого фиксированного значения  $Q_{ki}^3$  путем простого перебора по всем возможным значениям мощности  $Q_{ki}$   $i$ -го источника. Условно-оптимальное значение этой мощности фиксируется в памяти ЭВМ в виде зависимости  $\bar{Q}_{ki}(Q_{ki}^3)$ ; запоминается также значение  $Z_i(Q_{ki}^3)$ . Величину мощности ИРМ  $Q_k$  целесообразно представить в программе в виде некоторого упорядоченного набора, вычисляемого на каждом внутреннем шаге (при заданном  $h$ ) в виде

$$q = Q_k/h + 1.$$

Поскольку в число рассматриваемых вариантов включаются и значения  $Q_{ki} = 0$  (что означает отсутствие ИРМ в  $i$ -м узле), то практически одновременно решается вопрос о наиболее эффективном распределении ИРМ.

В процессе расчетов условно-оптимальные решения, полученные в результате оптимизации на предыдущем шаге, являются исходными для последующего шага.

На последнем шаге в критерии оптимальности учитываются и затраты  $Z_0(Q_c)$  на генерацию и передачу реактивной мощности из энергосистемы:

$$Z_c(Q_c) = Z_0 \left( \sum_i q_i + \sum_j \Delta Q_j - Q_{km}^3 \right).$$

Величина суммарных потерь мощности  $\sum_j \Delta Q_j$  должна соответствовать условию оптимального выбора ИРМ в распределительной сети, и,

наряду с  $Z_i(Q_{ki}^3)$  и  $\bar{Q}_{ki}(Q_{ki}^3)$ , необходимо фиксировать значения активных и реактивных потерь:

$$\Delta P_i^3(Q_{ki}^3) = \Delta P_i + \Delta P_{i-1}^3;$$

$$\Delta Q_i^3(Q_{ki}^3) = \Delta Q_i + \Delta Q_{i-1}^3.$$

Особенностью алгоритма [2] является то, что при прямом ходе оптимизационного процесса наблюдалось свертывание сети, а на обратном ходе сеть постепенно развертывается с одновременным распределением суммарной мощности  $Q_{km}^3$  между всеми рассматриваемыми ИРМ. По сути задачей этого этапа является нахождение в памяти ЭВМ для каждого ИРМ необходимой характеристики  $\bar{Q}_{ki}(Q_{ki}^3)$ , определенной на прямом ходе. Оптимальные значения мощностей ИРМ находят:

при известной суммарной мощности  $Q_{km}^3$  по характеристике  $\bar{Q}_{km}(Q_{km}^3)$  определяют наивыгоднейшую мощность последнего ИРМ —  $Q_{km} = \bar{Q}_{km}(\bar{Q}_{km}^3)$ ;

суммарную оптимальную мощность оставшихся источников —  $\bar{Q}_{k(m-1)} = \bar{Q}_{km}^3 - \bar{Q}_{km}$ ; далее, аналогично для  $\bar{Q}_{k(m-1)}$  и всех последующих ИРМ.

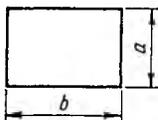
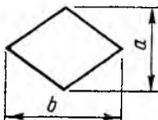
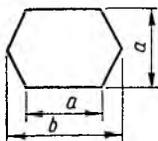
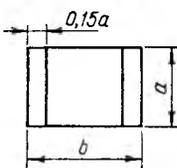
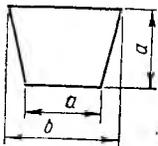
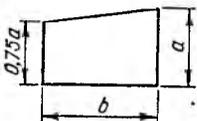
Укрупненная блок-схема описанного алгоритма приведена на рис. 6.18, где:

1. Ввод исходных данных.
2. Выбор  $i$ -го источника и построение его затратной характеристики  $Z_i(Q_{ki})$ .
3. Все ли источники рассмотрены? (если да, то переходят на блок 16).
4. Определение границ рабочего участка эквивалентной характеристики.
5. Выбор очередной расчетной точки на этой характеристике.
6. Весь ли рабочий участок характеристики  $Z_i(Q_{ki}^3)$  просмотрен? (если да, то возвращаются к блоку 2 и рассмотрению следующего источника).
7. Определение предельных значений мощности  $Q_{ki}$ , учитываемых в переборе при заданной величине  $Q_{ki}^3$ .
8. Выбор величины мощности  $Q_{ki}$  из диапазона допустимых значений.
9. Все ли допустимые значения  $Q_{ki}$  просмотрены? (если да, то переходят на блок 11).
10. Расчет функции затрат.
11. Нахождение оптимальной мощности рассматриваемого источника.
12. Фиксация  $\bar{Q}_{ki}$  и  $Z_i$  для заданного значения мощности  $Q_{ki}^3$ .
13. Рассматриваемый источник является последним?
14. Расчет затрат на реактивную мощность, получаемую от источника питания.
15. Определение суммарных затрат в сети.
16. Нахождение оптимальной мощности  $\bar{Q}_{km}^3$  последнего источника (1-й шаг обратного хода).

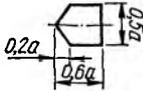
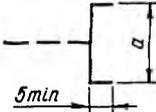


# П Р И Л О Ж Е Н И Я

## П Р И Л О Ж Е Н И Е 1. ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В СХЕМАХ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ (согласно ГОСТ 19.003—80)

Обозначение и основные размеры	Наименование и функция
	Процесс: выполнение операции или группы операций, в результате которых изменяется значение, форма представления или расположение данных
	Решение: выбор направления выполнения алгоритма или программы в зависимости от некоторых переменных условий
	Модификация: выполнение операций, изменяющих команды или группы команд, изменяющих программу
	Предопределенный процесс: использование ранее созданных и отдельно описанных алгоритмов или программ
	Ручная операция: автономный процесс, выполняемый вручную или при помощи неавтоматических средств
	Ручной ввод: ввод данных вручную при помощи неавтономных устройств с клавиатурой

Обозначение и основные размеры	Наименование и функция
	<p>Ввод — вывод: преобразование данных в форму, пригодную для обработки (ввод) или отображения результатов обработки (вывод)</p>
	<p>Неавтономная память: ввод — вывод данных в случае использования запоминающего устройства, управляемого непосредственно процессором</p>
	<p>Документ: ввод — вывод данных на бумажный носитель</p>
	<p>Магнитная лента: ввод — вывод данных, носителем которых служит магнитная лента</p>
	<p>Магнитный диск: ввод — вывод данных, носителем которых служит магнитный диск</p>
	<p>Дисплей: ввод — вывод данных, если непосредственно подключенное к процессору устройство воспроизводит данные и позволяет оператору вносить изменения в процессе их обработки</p>
	<p>Соединитель: указание связи между прерванными линиями потока, связывающими символы</p>
	<p>Пуск — останов: начало, конец, прерывание процесса обработки данных или выполнения программы</p>

Обозначение и основные размеры	Наименование и функция
	Межстраничный соединитель: указание связи между разведенными частями схем алгоритмов, расположенными на разных местах
	Комментарий: связь между элементом схемы и пояснением

В соответствии с рекомендациями ЕСПД, размер  $a$  должен выбираться из ряда 10, 15, 20, ... мм. Размер  $b$  равен  $1,5 a$ . При ручном выполнении схем алгоритмов и программ допускается устанавливать  $b = 2a$ .

## П Р И Л О Ж Е Н И Е 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ МНОЖЕСТВ

Характерной чертой современной математики является господство теоретико-множественной точки зрения. Основное место в теории множеств занимает теория отношений. Применение кругов Эйлера и диаграмм Венна для иллюстрации алгебраических операций над множествами и их свойств позволяет дать наглядное представление понятий теории множеств в привычной для инженера графической или табличной форме [11].

Понятие множества является исходным неопределимым понятием в математике. Под множеством понимают совокупность (систему, класс) объектов, называемых элементами множества, для которых можно указать набор свойств, позволяющий включить их в данное множество. Таким образом, множество определяется своими элементами.

Тот факт, что  $m$  является элементом множества  $M$  ( $m$  принадлежит  $M$ ), записывается так:

$$m \in M.$$

Отрицание такого утверждения ( $m$  не принадлежит  $M$ ) записывается следующим образом:

$$m \notin M.$$

Множество, имеющее конечное число элементов, называется *конечным* (бесконечным в противном случае).

Два множества  $M_a$  и  $M_b$  равны тогда и только тогда, когда они состоят из одних и тех же элементов.

Имеется несколько способов задания множеств, из которых наиболее часто используются два:

1. С помощью перечисления элементов, которые записываются внутри фигурных скобок через запятую:

$$M_a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}.$$

При этом перестановка элементов такого списка не меняет множества. Например, множества  $\{1, 3, 5, 7\}$  и  $\{1, 7, 3, 5\}$  совпадают.

2. С помощью характеристического свойства — общего свойства, которым обладают все элементы данного множества  $M_a = \{a \mid a \text{ обладает свойством } R\}$ . Например, если  $N = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$ , то множество  $K = \{k/k = 2n; n \in N\}$  есть множество всех четных чисел. Характеристическое свойство может быть задано в неявном виде:  $K = \{2, 4, 6, 8, \dots\}$ .

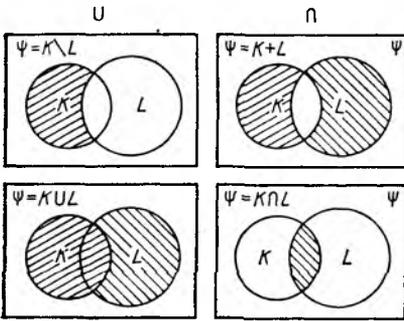


Рис. П.1.

Множество  $K$  является подмножеством множества  $L$  (т. е.  $K$  входит в  $L$ ) тогда и только тогда, когда каждый элемент  $K$  принадлежит  $L$ :

$$K \subset L \text{ или } L \supset K.$$

Множество, не содержащее никаких элементов, является пустым множеством (обозначение —  $\emptyset$ ). Поскольку любое множество является своим собственным подмножеством ( $K \subset K$ ), то и  $\emptyset \subset \emptyset$ .

Число всевозможных подмножеств любого конечного множества, состоящего из  $N$  элементов, равно  $2^N$ . Например, у множества  $K = \{1, 2, 3\}$  имеется восемь подмножеств:

$$\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1, 2\}, \{2, 3\}, \{1, 3\}, \{1, 2, 3\}.$$

Множества  $K$  и  $\emptyset$  являются несобственными подмножествами множества  $K$ , а все остальные — собственными.

Для возможности определения операций над множествами в математике вводится понятие универсального множества (универсума), такое, что все рассматриваемые множества данной предметной области оказываются его подмножествами. Так, в арифметике универсумом считается множество всех рациональных чисел.

Пересечение двух множеств  $K$  и  $L$  ( $K \cap L$ ) определяется следующим образом:

$$K \cap L = \{k \mid k \in K \text{ и } k \in L\}. \quad (\text{П.1})$$

Объединение двух множеств ( $K \cup L$ ) определяется так:

$$K \cup L = \{k \mid k \in K \text{ или } k \in L\}. \quad (\text{П.2})$$

Дополнение ( $\bar{K}$ ) множества  $K$  до универсального множества является одноместной операцией:

$$\bar{K} = \{k \mid k \in \Psi \text{ и } k \notin K\}. \quad (\text{П.3})$$

Разность двух множеств ( $K \setminus L$ ) определяется так:

$$K \setminus L = \{k \mid k \in K \text{ и } k \notin L\}. \quad (\text{П.4})$$

Из (П.4) ясно, что  $\bar{K} = \Psi \setminus K$ .

Все рассмотренные операции замкнуты на множестве  $\Psi$ , т. е. и операнды и результаты операций входят в  $\Psi$ . Они обычно иллюстрируются при помощи диаграммы Венна или кругов Эйлера (рис. П.1), где заштрихованы результаты соответствующих операций.

Операции пересечения и объединения обладают свойством ассоциативности:

$$\begin{aligned} (K \cap L) \cap M &= K \cap (L \cap M); \\ (K \cap L) \cup M &= K \cap (L \cup M). \end{aligned} \quad (\text{П.5})$$

Свойство (П.5) позволяет судить о пересечении или объединении произвольного числа множеств:

$$\begin{aligned} K_1 \cap K_2 \cap \dots \cap K_n &= \bigcap_{i=1}^n K_i; \\ L_1 \cup L_2 \cup \dots \cup L_m &= \bigcup_{j=1}^m L_j. \end{aligned}$$

Определение операции произведения множеств вводится посредством понятий кортежа (вектора) и компонента (координаты), которые также являются неопределимыми в математике. Кортеж из двух компонентов называется парой, из трех — тройкой, ..., из  $n$  —  $n$ -й и задается перечислением компонентов через запятую в круглых скобках:

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n).$$

В отличие от множества, кортеж может иметь повторяющиеся компоненты (1, 2, 3, 1, 2), причем число их называется длиной кортежа.

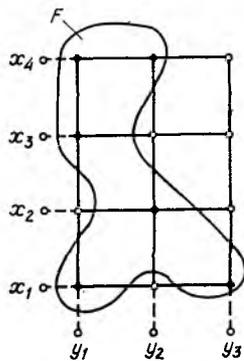
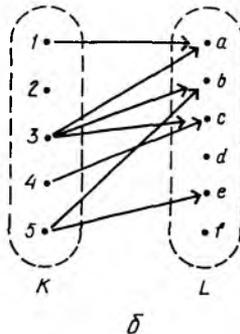
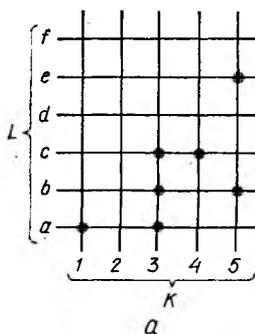


Рис. П.2.

Рис. П.3.

Два кортежа считаются равными, если равны их длины и соответствующие компоненты равны между собой.

Предположим  $K$  и  $L$  — два множества. Тогда их произведением называется множество

$$R = \{(k, l) \mid k \in K, l \in L\} \quad (\text{П.6})$$

всевозможных пар  $(k, l)$ , что обозначается следующим образом:

$$R = K \times L.$$

Если  $n$  и  $m$  — числа элементов  $K$  и  $L$  соответственно, то  $R$  содержит  $mn$  элементов.

Множество всех упорядоченных пар  $(k_1, k_2)$  элементов из  $K$  является квадратом множества  $K$  (обозначается  $K^2$ ):

$$K^2 = \{(k_1, k_2) \mid k_1 \in K \text{ и } k_2 \in K\}. \quad (\text{П.7})$$

Любое подмножество  $P \subset K \times L$  произведения множеств  $K$  и  $L$  называется бинарным соответствием из  $K$  и  $L$ . При этом множество  $K$  называется областью отправления, а  $L$  — областью прибытия соответствия  $P$  [11].

Соответствие предполагает, что некоторым или всем элементам множества  $K$  поставлены в соответствие элементы множества  $L$ . Например:

$$K = \{1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$L = \{a, b, c, d, e, f\};$$

$$P = \{(1, a), (3, a), (3, b), (3, c), (4, c), (5, b), (5, e)\}.$$

Для задания соответствия чаще всего пользуются графиками (рис. П.2, а) или стрелочным представлением (рис. П.2, б).

Любое подмножество  $P \subset K^2$  называется бинарным отношением на  $K$ , т. е. частный случай соответствия с равными областями отправления и прибытия.

Имеются два граничных соответствия из  $K$  в  $L$ :

$$P \subset K \times L \text{ — полное соответствие;}$$

$$\emptyset \subset K \times L \text{ — пустое соответствие.}$$

Образом элемента  $k \in K$  при соответствии  $P \subset K \times L$  (или левым сечением соответствия  $P$  по элементу  $k$ ) называется множество

$$S_{\text{л}}(k, P) = \{l \mid l \in L \text{ и } (k, l) \in P\}. \quad (\text{П.8})$$

Гробразом элемента  $l \in L$  при том же соответствии  $P \subset K \times L$  (или правым сечением  $P$  по  $l$ ) называют множество

$$S_{\text{п}}(P, l) = \{k \mid k \in K \text{ и } (k, l) \in P\} \quad (\text{П.9})$$

Соответствие  $\varphi \subset K \times L$  из  $K$  в  $L$  называется функцией (функциональным соответствием), если образ (левое сечение)  $\varphi$  по каждому элементу состоит из одного элемента. Например, соответствие, представленное на рис. П.3, не является функцией.

Используются также отношения эквивалентности и порядка, которые кратко приведем для бинарных отношений.

Если  $R$  — бинарное отношение  $K$ , то имеется ряд свойств для таких отношений:

- C1.  $R$  — рефлексивно, если  $kRk$  для всех  $k \in K$ ;
- C2.  $R$  — антирефлексивно, если  $(k, k) \notin R$  для всех  $k \in K$ ;
- C3.  $R$  — симметрично, если из  $kRa$  следует  $aRk$ ;
- C4.  $R$  — антисимметрично, если из  $kRa$  и  $aRk$  следует  $a = k$ ;
- C5.  $R$  — транзитивно, если из  $kRa$  и  $aRb$  следует  $kRb$ .

При этом использовали обозначение  $kRk$  вместо  $(k, k) \in R$ . Не следует путать C2 с понятием нереклексивное отношение, так как в этом случае для некоторых  $k \in K$  (но не для всех) возможно  $kRk$ .

Бинарное отношение  $R$  называется эквивалентностью, если для него справедливы C1, C3, C5. Например:

полное бинарное отношение  $R = k^2$ ;

отношение «быть на одном курсе» на множестве всех студентов факультета;

отношение «иметь одинаковый остаток при делении на 3» (сравнимость по mod 3).

С каждым отношением эквивалентности на  $K$  связано разбиение этого множества на классы эквивалентности — непустые непересекающиеся подмножества  $K$ , объединение которых равно  $K$ . Таким образом,  $\{B_1, \dots, B_n\}$  является разбиением  $K$  ( $B_i \subset K$ ), если и только если справедливы:

$$K = \bigcup_{i=1}^n B_i;$$

$$B_i \cap B_j = \emptyset \text{ при } i \neq j; \tag{П.10}$$

$$B_i \neq \emptyset.$$

На основе разбиения дается следующее определение эквивалентности.

Отношением  $R$  на  $K$  называется эквивалентность, если существует разбиение  $\{B_1, \dots, B_n\}$  множества  $K$  такое, что  $kRb$  выполняется тогда и только тогда, когда  $k$  и  $b$  принадлежат одному и тому же классу разбиения  $K$ .

Бинарное отношение  $R$  на множестве  $K$  называется отношением частичного порядка, если для него выполняются C1, C4, C5 и обозначается знаком  $\leq$ , например:

отношение  $\leq$  (не больше) на множестве целых чисел;

иерархия на предприятии есть частичный порядок на множестве должностей

и т. д.

Основные понятия теории множеств позволяют построить описание технических систем кибернетического типа по принципу вход — выход.

Простейшим описанием такой системы может служить тройка (рис. П.4, а, б):

$$ПП = \{X, Y, O\},$$

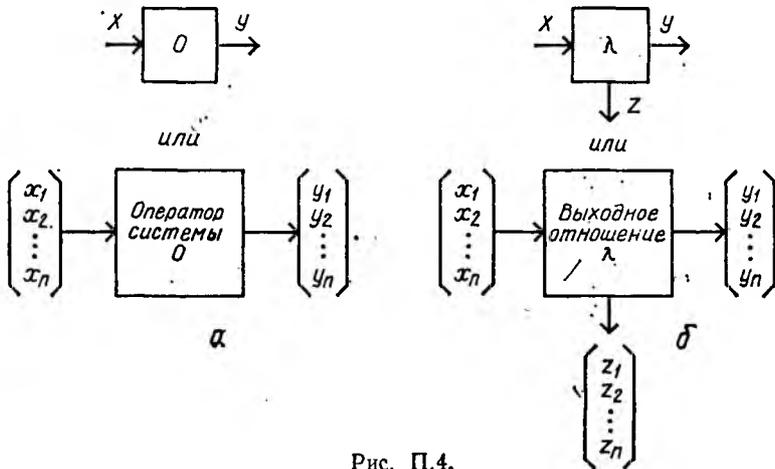


Рис. П.4.

где  $X$  — множество входных величин  $X = \{X_i | i = \overline{1, n}\}$ ;  $Y = \{y_j | j = \overline{1, m}\}$  — множество выходных величин;  $O$  — оператор системы (преобразование):  $O : X \rightarrow Y$ .

Системы типа вход — выход устанавливают относительную связь переменных по входу и выходу, не учитывая различия в последовательности состояний или характеристики их изменения во времени. Они отражают лишь тот факт, что определенной комбинации входных величин ставится в соответствие определенная комбинация состояний выхода.

Существуют три возможные постановки задач в таких системах:

- а) определение выхода системы  $Y$ ;
- б) определение входа системы  $X$ ;
- в) определение оператора системы  $O$ .

Ситуации а) и б) соответствуют этапу анализа, когда по принципиально известному оператору системы и состоянию входа (или выхода) анализируется состояние выхода (или входа).

Ситуация в) соответствует синтезу, когда требуется установить оператор системы  $O$  по известным состояниям входа  $X$  и выхода  $Y$ .

Известно следующее определение: тройка  $(X, Y, O)$  представляет общую систему по типу вход — выход, если  $X$  и  $Y$  являются множествами, а  $O$  — непустое отношение ( $O \neq \emptyset$ ).

Тогда  $O \subset X \times Y$  или  $XOY$ .

Под парой вход — выход будем понимать

$$(x, y) \in X \times Y \text{ или } (x, y) \in O.$$

Достижимые для  $x \in X$  элементы  $y \in Y$  обозначаются  $xO$  и можно записать:  $xO := \{y | y \in Y \forall xOy\}$ , где  $\forall$  означает «для любого  $xOy$ ».

Возможные, при заданном  $O$ , элементы  $x \in X$ , приводящие к  $y \in Y$ , обозначаются выражением

$$Oy := \{x | x \in X \forall xOy\}.$$

Достаточно простое решение задачи синтеза получается при взаимном соответствии входных и выходных величин.

Путем комбинации подобных элементарных систем (описаний) могут быть описаны более сложные системы (табл. П.2.1).

Справедливо также обратное описание, т. е. возможна декомпозиция сложных систем в виде комбинации простых схем элементарных систем.

Системы общего типа  $(X_1, Y_1, O_1)$  и  $(X_2, Y_2, O_2)$  могут интерпретироваться как: декартово произведение; последовательная схема; объединение; пересечение; обратная связь.

Соответствующие описания таких систем приведены на рис. П.5.

Аналогичные схемы применяются при разработке сложных программ, причем  $X_i$  и  $Y_i$  представляют собой данные, являющиеся составной частью определенного состояния обработки. При этом схема программных модулей определяется операциями алгебры множеств на базе данных. На рис. П.5 приведен пример последовательно-параллельной схемы описания алгоритма.

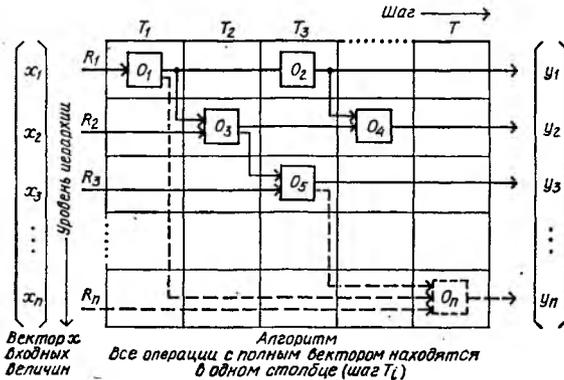
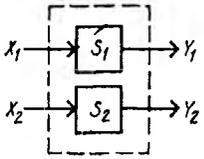
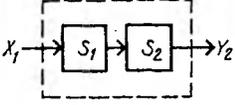
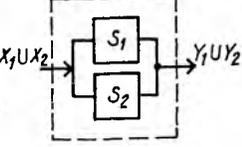
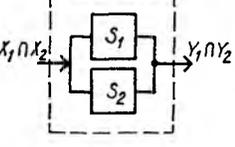


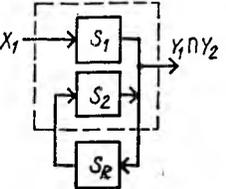
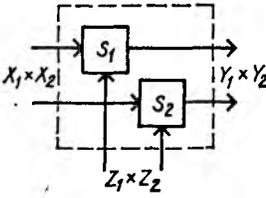
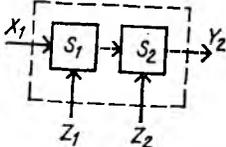
Рис. П.5.

Система  $(X, Y, O)^{-1}$ , инверсная системе  $(X, Y, O)$ , определяется как  $(X, Y, O^{-1})$ , т. е. определенному решению соответствует определенная постановка задачи  $X$ . Подобная интерпретация используется при диагностике ошибок в программных комплексах.

Ограничение  $(X, Y, O)$  до  $M$  определяется как  $(X, Y, O \cap M)$  для  $M \subset X \times Y$ . Ограничения возникают случае, когда  $X$  неполно и, таким образом, оператор  $M \subset X \times Y$  описывает невозможные отношения.

Наименование	Представление	Описание
Декартово множество		$(X, Y, S) := (X_1, Y_1, S_1) \otimes (X_2, Y_2, S_2)$ $X := X_1 \times X_2$ $Y := Y_1 \times Y_2$ $S := \{(X_1, X_2), (Y_1, Y_2) : X_1 S_1 \Phi_1 \wedge X_2 S_2 Y_2\}$
Последовательная схема		$(X, Y, S) := (X_1 Y_1 S_1) \rightarrow (X_2, Y_2, S_2)$ $X := X_1$ $Y := Y_2$ $S := S_1 \otimes S_2$
Пересечение		$(X, Y, S) := (X_1, Y_1, S_1) \otimes (X_2, Y_2, S_2)$ $X := X_1 \cap X_2$ $Y := Y_1 \cap Y_2$ $S := S_1 \cap S_2$
Объединение		$(X, Y, S) := (X_1, Y_1, S_1) \otimes (X_2, Y_2, S_2)$ $X := X_1 \cup X_2$ $Y := Y_1 \cup Y_2$ $S := S_1 \cup S_2$

Продолжение табл. П. 2.2

Наименование	Представление	Описание
Обратная связь		$(X, Y, S) := (X_1, Y_1, S_1) \otimes (X_2, Y_2, S_2)$ $X := X_1$ $Y := Y_1 \cap Y_2$ $S := \{(x, y) : x S_1 y \wedge y S_2 x\}$
Декартово множество		$\text{par } S := \text{par } S_1 \otimes \text{par } S_2$ $(X, Y, Z, p) := (X_1, Y_1, Z_1, p_1) \otimes (X_2, Y_2, Z_2, p_2)$ $X := X_1 \times X_2$ $Y := Y_1 \times Y_2$ $Z := Z_1 \times Z_2$ $p : Z_1 \times Z_2 \rightarrow P((X_1 \times X_2) \times (Y_1 \times Y_2))$ $p(Z_1, Z_2) := \{(X_1, X_2), (Y_1, Y_2) : X_1 p_1(Z_1) Y_1 \wedge X_2 p_2(Z_2) Y_2\}$
Последовательная схема		$\text{par } S := \text{par } S_1 \otimes \text{par } S_2$ $Z := Z_1 \times Z_2$ $p := Z_1 \times Z_2 \rightarrow P(X_1 \times X_2) : (Z_1, Z_2) \rightarrow p(Z_1, Z_2)$ $p(Z_1, Z_2) := p_1(Z_1) \otimes p_2(Z_2)$

В системах вход — выход общего вида между входными и выходными величинами устанавливается только относительная связь. Подобное отношение входа — выхода возникает в случаях, когда для одинаковых входных величин  $x \in X$  имеется несколько возможных решений, т. е. элементов множества  $xO$ . Например, в проектировании при одинаковых исходных данных могут быть получены различные решения в зависимости от состояния окружающей среды.

Можно определить не относительную, а функциональную связь, используя понятие параметризации состояния общей системы, т. е. декомпозицию отношения  $O$  на комплекс функциональных отношений (кривые параметров, горизонталы), которые в своей совокупности покрывают  $O$ .

Четверка  $(X, Y, Z, P)$  называется параметризацией состояния  $\text{par } O$  общей системы  $(X, Y, O)$ , если справедливо:

$$P: Z \rightarrow P(X, Y)$$

для  $O$ , т. е. когда действительно  $\forall_{z \in Z} p(z)$  функционально и  $U p(z) = O$ ;  $X$  и  $Y$  — множества входных и выходных величин соответственно;  $p(X \times Y)$  — множество произведений  $X \times Y$ ;  $Z$  — множество состояний;  $P$  — отображение параметризации  $O$ ;  $xP(Z) y$  — параметризация состояния, предполагающая в состоянии  $Z$  при наличии входа  $x$  выход  $y$ .

Под отношением выхода  $\lambda$  понимается отображение  $Z \times X$  в  $Y$  для заданной параметризации состояния  $\text{par } O = (X, Y, Z, p)$ :  $\lambda \subset (Z \times X) \times Y$ , причем  $(z, x) \times \lambda y : \rightarrow xp(z) y$ . Заметим, что параметризация состояния не отражает временной последовательности отдельных состояний системы (табл. П.2.2).

Если  $\text{par } O$  обратима, то можно также определить обратную параметризацию состояния:

$$(\text{par } O)^{-1}; \quad z^{-1} = z.$$

Тогда

$$p^{-1}: z \rightarrow p(X \times Y): z \rightarrow p^{-1}(z) := p(z^{-1}).$$

Ограничение параметризации  $(\text{par } O) \setminus M$  до  $(X, Y, O \cap M)$  определяется как

$$(\text{par } O) \setminus M := (X, Y, Z, p'),$$

где

$$p': Z \rightarrow p(X \times Y): Z \rightarrow p'(Z) := p(Z) \cap M.$$

### П Р И Л О Ж Е Н И Е 3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЛОГИКИ ВЫСКАЗЫВАНИЙ

*Высказыванием* называется повествовательное предложение, о котором можно сказать в данный момент, что оно истинно или ложно, но не то и другое одновременно. «Истинность» или «логичность» предложения есть истинное значение высказывания. Каждому высказыванию, если оно истинно, можно сопоставить переменные  $I$  и  $O$ , если высказывание ложно. Если имеются высказывания  $P$  и  $Q$ , то можно образовывать новые высказывания ( $P$  или  $Q$ ;  $P$  и  $Q$ ; не  $P$ ), введя операции дизъюнкции  $\vee$ , конъюнкции  $\&$  и отрицания. Действия этих операций задаются таблицами истинности (табл. П.3.1 — дизъюнкция; табл. П.3.2 — конъюнкция и табл. П.3.3 — отрицание), каждой строке которых взаимно однозначно соответствует набор значений составляющих высказываний и соответствующее значение составного высказывания [11].

Операции дизъюнкции, конъюнкции и отрицания читаются соответственно как ИЛИ, И, НЕ.

Основными законами, определяющими эти операции, являются:

закон идемпотентности дизъюнкции и конъюнкции

$$a \vee a = a, \quad a \& a = a;$$

закон коммутативности дизъюнкции и конъюнкции

$$a \vee b = b \vee a, \quad a \& b = b \& a;$$

закон ассоциативности дизъюнкции и конъюнкции

$$a \vee (b \vee c) = (a \vee b) \vee c, \quad a \& (b \& c) = (a \& b) \& c;$$

Таблица П.3.1.

P	Q	$P \vee Q$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица П.3.2.

P	Q	$P \& Q$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица П.3.3

P	$\bar{P}$	Q	$\bar{Q}$
0	1	1	0
1	0	0	1

закон дистрибутивности конъюнкции относительно дизъюнкции и дизъюнкции относительно конъюнкции (учитывая, что операция  $\&$  более старшая, чем  $\vee$ )

$$a \& (b \vee c) = a \& b \vee a \& c;$$

$$a \vee (b \& c) = (a \vee b) \& (a \vee c);$$

закон двойного отрицания

$$\bar{\bar{a}} = a; \quad \bar{\bar{b}} = b;$$

закон Моргана

$$\bar{a \vee b} = \bar{a} \& \bar{b}, \quad \bar{a \& b} = \bar{a} \vee \bar{b};$$

закон склеивания

$$a \& b \vee a \& \bar{b} = a, \quad (a \vee b) \& (a \vee \bar{b}) = a;$$

закон поглощения

$$a \vee a \& b = a, \quad a \& (a \vee b) = a;$$

законы, определяющие действия с константами 0 и 1:

$$a \vee 0 = a; \quad a \& 0 = 0; \quad a \vee 1 = 1;$$

$$a \& 1 = a; \quad a \vee \bar{a} = 1; \quad a \& \bar{a} = 0.$$

Функцию  $f$ , принимающую одно из двух значений (0 или 1), от  $n$  переменных, каждая из которых принимает одно из двух значений (0 или 1), называют булевой функцией  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  от  $n$  переменных.

Любое высказывание  $f$ , зависящее от  $n$  переменных, может быть задано в виде таблицы истинности, содержащей  $2^n$  строк.

Например, функция  $f(x_1, x_2, x_3)$  вида

$f(x_1, x_2, x_3) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3$   
 может быть представлена таблицей истинности (табл. П.3.4).

Таблица П.3.4.

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$f(x_1, x_2, x_3)$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
1	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Для операций с двумя переменными используются пятнадцать булевых функций, которые приводятся здесь без доказательства:

$$f_0(x_1, x_2) = 0 \text{ — константа ноль;}$$

$$f_1(x_1, x_2) = x_1 x_2 \text{ — конъюнкция;}$$

$f_2(x_1, x_2) = x_1 \bar{x}_2 = x_1 \vee x_2 = x_1 \rightarrow x_2 = x_1 \mapsto x_2$  — левая коимпликация (читается «не если  $x_1$ , то  $x_2$ »);

$$f_3(x_1, x_2) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2 = x_1 \oplus x_2;$$

$$f_4(x_1, x_2) = \bar{x}_1 x_2 = x_1 \vee x_2 = x_1 \leftarrow x_2 = x_1 \leftarrow x_2 \text{ — правая коимпликация;}$$

$$\text{Функция } f_5(x_1, x_2) = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 x_2 = x_2;$$

$f_6(x_1, x_2) = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 x_2 = x_1 \oplus x_2$  — сложение по модулю два или функция неравнозначности;

$$f_7(x_1, x_2) = \bar{x}_1 \vee x_2 \text{ — дизъюнкция;}$$

$$f_8(x_1, x_2) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 = x_1 \vee x_2 = x_1 \circ x_2 \text{ — функция Вебба;}$$

$f_9(x_1, x_2) = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 = x_1 \sim x_2$  — функция равнозначности (эквивалентности);

$$f_{10}(x_1, x_2) = \bar{x}_2 \text{ — отрицание;}$$

$f_{11}(x_1, x_2) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2 = \bar{x}_2 \vee x_1 = x_1 \leftarrow x_2$  — правая импликация (читается, «если  $x_2$ , то  $x_1$ »);

$$f_{12}(x_1, x_2) = \bar{x}_1 \text{ — отрицание;}$$

$f_{13}(x_1, x_2) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2 = \bar{x}_1 \vee x_2 = x_1 \rightarrow x_2$  — левая импликация (читается, «если  $x_1$ , то  $x_2$ »);

$$f_{14}(x_1, x_2) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2 = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 = x_1 \mid x_2 \text{ — функция Шеффера;}$$

$$f_{15}(x_1, x_2) = 1 \text{ — константа единица.}$$

Основной областью использования приведенных функций является синтез логических схем, что позволяет также использовать их при оценке допустимых состояний коммутационных аппаратов в схемах электроснабжения.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. *Авакумов В. Г.* Постановка и решение электроэнергетических задач исследований операций.— К. : Вища шк. Головное изд-во, 1983.— 240 с.
2. *Арион В. Д., Журавлев В. Г.* Применение динамического программирования к задачам электроэнергетики.— Кишинев : Штиинца, 1981.— 124 с.
3. *Атре Ш.* Структурный подход к организации баз данных.— М. : Финансы и статистика, 1983.— 317 с.
4. *Баранов С. И.* Синтез микропрограммных автоматов.— Л. : Энергия, 1979.— 232 с.
5. *Башлыков А. А.* Проектирование систем принятия решений в энергетике.— М. : Энергоатомиздат, 1986.— 120 с.
6. *Буцц У.* Предпосылки и возможности применения вычислительной техники в процессе проектирования систем электроснабжения // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Горная электромеханика и автоматика.— 1978.— С. 42—45.
7. *Ван Тассел Д.* Стиль, разработка, эффективность, отладка и испытание программ.— М. : Мир, 1985.— 332 с.
8. *Введение в технику работы с таблицами решений / Г. Фрейтаг, В. Годе, Х. Якоби.*— М. : Энергия, 1979.— 88 с.
9. *Вельбицкий И. В.* Технология программирования.— К. : Техніка, 1984.— 279 с.
10. *Веников В. А., Веников Г. В.* Теория подобия и моделирования.— М. : Высш. шк., 1984.— 286 с.
11. *Горбатов В. А.* Основы дискретной математики : Учеб. пособие.— М. : Высш. шк., 1986.— 311 с.
12. *Гудман С., Хидетниemi С.* Введение в разработку и анализ алгоритмов.— М. : Мир, 1981.— 368 с.
13. *Дружинин В. В., Конторов Д. С.* Системотехника.— М. : Радио и связь, 1985.— 200 с.
14. *Иванов В. В.* Методы вычислений на ЭВМ.— К. : Наук. думка, 1986.— 584 с.
15. *Комплекс общетраслевых руководящих методических материалов по созданию АСУ и САПР.*— М. : Статистика, 1980.— 96 с.
16. *Краснощевков П. С., Петров А. А.* Принципы построения моделей.— М. : Изд-во Моск. ун-та, 1983.— 264 с.
17. *Литаев В. В.* Качество программного обеспечения.— М. : Финансы и статистика, 1983.— 263 с.
18. *Мальшиев Н. Г.* Структурно-автоматные модели технических систем.— М. : Радио и связь, 1986.— 168 с.
19. *Микропроцессорные средства и системы.*— М. : ГКНТ, 1986.— с. 33.
20. *Моисеев Н. Н.* Математические задачи системного анализа.— М. : Наука, 1981.— 488 с.
21. *Норенков И. П.* Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем.— М. : Высш. шк., 1986.— 304 с.
22. *Оре О.* Теория графов.— М. : Наука, 1980.— 336 с.
23. *Петренко А. И., Семенков О. И.* Основы построения систем автоматизированного проектирования.— К. : Вища шк. Головное изд-во, 1984.— 296 с.
24. *Построение современных систем автоматизированного проектирования / К. Д. Жук, А. А. Тимченко, А. А. Родионов и др.*— К. : Наук. думка, 1983.— 248 с.
25. *Праховник А. В., Розен В. П., Дегтярева В. В.* Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий.— М. : Недра, 1985.— 232 с.

26. *Проектирование* промышленных электрических сетей / В. И. Крупович, А. А. Ермилов, В. С. Иванов, Ю. В. Крупович ; Под ред. В. И. Круповича.— М. : Энергия, 1979.— 328 с.
27. *Проектирование систем электроснабжения: Учеб. пособие* / В. Н. Винославский, А. В. Праховник, Ф. Клеппель, У. Бутц.— Киев : Выща шк. Головное изд-во, 1981.— 360 с.
28. *Симонс Дж.* ЭВМ пятого поколения: компьютеры 90-х годов.— М. : Финансы и статистика, 1985.— 173 с.
29. *Системы автоматизированного проектирования: Учеб. пособие: В 9 кн.* / Под ред. И. П. Норенкова.— М. : Высш. шк., 1986.— Кн. 1 : Принципы построения и структура.— 127 с.
30. Кн. 2: Технические средства и операционные системы / Д. М. Жук, В. А. Мартынюк, П. А. Сомов.— 159 с.
31. Кн. 3: Информационное и прикладное программное обеспечение / В. Г. Федорук, В. М. Черненко.— 159 с.
32. Кн. 4: Математические модели технических объектов / В. А. Трудношин, Н. В. Пивоварова.— 160 с.
33. Кн. 6: Автоматизация конструкторского и технологического проектирования / Н. М. Капустин, Г. Н. Васильев.— 191 с.
34. *Системы автоматизированного проектирования* / Ю. К. Лушников, В. А. Морозов, А. П. Частиков и др.— М. : Знание, 1984.— 64 с.
35. *Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет* / А. С. Овчаренко, М. Л. Рабинович, В. И. Мозырский, Д. И. Розинский.— К. : Техніка, 1985.— 279 с.
36. *Фейнберг В. З.* Геометрические задачи машинной графики больших интегральных схем.— М. : Радио и связь, 1987.— 176 с.
37. *Щукин Б. Д., Лякоз Ю. Ф.* Применение ЭВМ для проектирования систем электроснабжения.— М. : Энергоиздат, 1982.— 176 с.
38. *Ягун В. Г.* Автоматизированный расчет тиристорных схем.— Харьков : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986.— 160 с.
39. *Аnwendung* algebraischer Methoden bei der Modellierung des Projektierungsprozesses / U. Butz, N. Hämmerling, W. N. Winoslawsky, W. I. Taradaj // *Energietechnik*, 31. Jg. Heft 4.— April, 1981.— S. 143—147.
40. *Wötzold G.* Entwicklung von Dialogsystemen mit Hilfe von Zustandsdiagrammen / *Wissenschaftliche Zeitschrift der T. H.*— Leipzig, 1982.— 6.
41. *Zur Gestaltung* von Projektdatenspeichern in CAD — Systemen für Elektroenergieanlagen / U. Butz, D. Heinze, V. Honeit // *Elektrie*,— 1985.— 12.— S. 445—447.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	5
<b>Глава 1. Принципы и задачи проектирования систем электроснабжения</b> . . . . .	<b>8</b>
1.1. Уровни и этапы проектирования. Типовые проектные процедуры . . . . .	8
1.2. СЭС промышленных предприятий как объект проектирования . . . . .	20
1.3. Принципы, цели и задачи автоматизации проектирования СЭС . . . . .	25
1.4. Структура и состав САПР электроснабжения . . . . .	28
<b>Глава 2. Характеристика основных видов обеспечения САПР</b> . . . . .	<b>34</b>
2.1. Техническое обеспечение САПР (основные технические средства) . . . . .	34
2.2. Лингвистическое обеспечение САПР . . . . .	47
2.3. Программное обеспечение САПР . . . . .	49
2.4. Информационное обеспечение САПР . . . . .	56
2.5. Математическое обеспечение САПР . . . . .	60
<b>Глава 3. Разработка программного обеспечения пользователя</b> . . . . .	<b>67</b>
3.1. Алгоритм, его описание и этапность разработки . . . . .	68
3.2. Принципы и методы повышения эффективности процессов разработки программного обеспечения . . . . .	71
3.3. Стратегия разработки программного обеспечения . . . . .	72
3.4. Структурное программирование . . . . .	74
3.5. Средства документирования при разработке программ . . . . .	76
<b>Глава 4. Моделирование процесса проектирования и принципы разработки проблемно ориентированных диалоговых систем</b> . . . . .	<b>92</b>
4.1. Концептуальная модель САПР электроснабжения . . . . .	92
4.2. Основные понятия и правила теории конечных автоматов . . . . .	97
4.3. Применение теории конечных автоматов к моделированию процесса проектирования СЭС . . . . .	105
4.4. Принципы построения и виды проблемно ориентированных диалоговых систем . . . . .	108
4.5. Методы описания структуры и процессов ПДС . . . . .	114
4.6. Обобщенная модель управления диалоговыми системами . . . . .	119
<b>Глава 5. Функционально-логическое моделирование объекта проектирования в САПР</b> . . . . .	<b>126</b>
5.1. Функционально-ориентированный подход к моделированию СЭС . . . . .	127
5.2. Принципы упорядочения моделей при функциональной декомпозиции СЭС . . . . .	135
5.3. Моделирование СЭС на этапе схмотехнического проектирования . . . . .	140
5.4. Описание функционально-структурных связей с помощью переключаемых (коммутационных) функций алгебры логики . . . . .	147
<b>Глава 6. Учебная САПР электроснабжения на базе многотерминальной мини-ЭВМ</b> . . . . .	<b>152</b>
6.1. Особенности учебно-исследовательских САПР . . . . .	152
6.2. Состав и структура учебной САПР . . . . .	153
6.3. Состав задач и реализуемый маршрут проектирования . . . . .	155
6.4. Расчет электрических нагрузок . . . . .	158
6.5. Определение числа и мощности трансформаторов ГПП . . . . .	162

6.6. Выбор оптимальной трассы ЛЭП внешнего электроснабжения . . . . .	164
6.7. Расчет токов короткого замыкания на шинах центрального РП . . . . .	166
6.8. Расчет режимов пуска и самозапуска электрических двигателей в сетях 6—10 кВ . . . . .	171
6.9. Определение оптимальной мощности и числа цеховых КТП с учетом компенсации реактивных нагрузок . . . . .	173
6.10. Формирование описания электрических сетей 6—10 кВ методом адресных отображений . . . . .	182
6.11. Оптимизация мощности и мест установки ИРМ методом динамического программирования . . . . .	188
Приложения . . . . .	193
Список рекомендуемой литературы . . . . .	205

Учебное пособие

Винославский Василий Николаевич, Тарадай Виктор Иванович  
Бутц Ульрих, Хайнце Дитер

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Переплет художника Г. М. Балюна  
Художественный редактор С. П. Духленко  
Технический редактор С. Л. Светлова  
Корректор Л. Л. Любимова

ИБ № 8939

Сдано в набор 29.12.87. Подписано в печать 26.07.88. БФ 02696. Формат 60×90/16.  
Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 13. Усл.  
кр.-от. 13. Уч.-изд. л. 14,39. Тираж 3000 экз. Изд. № 7425. Зак. 422. Цена 90 к.

Головное издательство издательского объединения «Выща школа», 252054,  
Киев-54, ул. Гоголевская, 7

Отпечатано с матриц Головного предприятия республиканского производ-  
ственного объединения «Полиграфкнига», 252057, Киев, ул. Довженко, 3,  
в Белоцерковской книжной фабрике 256400, г. Белая Церковь, ул. Карла  
Маркса, 4.

