

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
СИБИРСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМ Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА

# СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКОЙ

Ответственные редакторы  
член-корреспондент РАН *А.П. Меренков*  
доктор технических наук *Л.В. Массель*



НОВОСИБИРСК  
"НАУКА"  
СИБИРСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ РАН  
1997

УДК 681.142.4 + 51.001.57 + 620.4  
ББК 31.19  
С34

А в т о р ы

*Антонова Н.Н., Бобырева И.Н., Бычкова Н.В. и др.*

Системы поддержки принятия решений для исследования и управления энергетикой / Н.Н. Антонова, И.Н. Бобырева, Н.В. Бычкова и др. / Под ред. А.П. Меренкова. — Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1997. — 162 с.  
ISBN 5-02-031367-X

В монографии рассмотрены методические и научно-практические вопросы построения систем поддержки принятия решений в энергетике. Выделены общестодологические аспекты проблемы, вопросы применения методов искусственного интеллекта и систем, основанных на знаниях, реализации систем поддержки принятия решений в отраслевых системах энергетики, а также в исследованиях энергетической безопасности страны, описаны некоторые математические модели и инструментальные средства, предлагаемые для поддержки решений в энергетике.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и реализацией систем поддержки принятия решений в различных проблемных областях, а также для аспирантов и студентов вузов, специализирующихся в информатике и энергетике.

Табл. 10. Ил. 52. Библиогр.: 122 назв.

Рецензенты

доктор технических наук И.И. Голуб  
доктор технических наук А.В. Петров

Утверждено к печати ученым советом  
Сибирского энергетического института СО РАН

ТП-97-И-№ 141

ISBN 5-02-031367-X

© Н.Н. Антонова, И.Н. Бобырева,  
Н.В. Бычкова и др., 1997

© Российская академия наук, 1997

© Оформление. СП "Наука" РАН, 1997

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Энергетика России представляет собой сложную технико-экономическую систему, для изучения и управления которой применяют многоуровневый подход, представляя систему как совокупность моделей, каждая из которых описывает ее поведение с точки зрения того или иного уровня абстрагирования. В настоящее время в основном установились определенные уровни выделения и рассмотрения подсистем энергетики, три из которых наиболее употребительны:

— **отраслевые** (электро- и теплоснабжение, нефтеснабжение, газоснабжение, углеснабжение);

— **территориальные** (страна, экономический район, административный район, узел энергоснабжения, энергетическое предприятие);

— **временные** (где выделяют качественно различающиеся этапы развития и этап функционирования; на первом — долгосрочное прогнозирование, планирование и проектирование развития, на втором — долгосрочное и краткосрочное планирование, оперативное и автоматическое управление);

— **ситуативные** (характерные для функционирования энергосистем, где выделяют обычно нормальный, утяжеленный, аварийный и послеаварийный режимы).

Разнообразие свойств энергетических систем и определяемая этим многоаспектность анализа влекут за собой многообразие взаимосвязанных задач, решение которых необходимо для жизнеобеспечения энергетического комплекса. Для каждого из названных уровней и их разумных сочетаний характерны свои специфические задачи. Их выявление, систематизация, выполнение исследований и разработок по созданию и раз-

виту методов решения — предмет постоянной заботы исследователей.

Методология принятия научно обоснованных решений в энергетике постоянно находится в центре внимания. Пройден нелегкий путь от простейших формульных методов расчета с помощью карандаша и арифмометра до сложных систем поддержки принятия решений (СППР), реализуемых с помощью современных средств вычислительной техники. На этом пути, обеспечиваемом бурным ростом возможностей электронных вычислительных машин, выделен ряд характерных этапов. За хитроумными методами расчета систем интегро-дифференциальных уравнений последовала эпоха становления методов оптимизации. Возникали и решались проблемы, обусловленные то большой размерностью моделей, то неопределенностью исходных данных. Теоретические и методические результаты воплощались в создаваемых программных комплексах, с помощью которых находились решения того или иного класса практических задач, обосновывающие принимаемые решения на соответствующем из рассматриваемых уровней.

Развитие вычислительной техники, появление персональных ЭВМ стимулировали создание нового направления, которое мы сейчас называем **новой информационной технологией**. На этой основе в различных отраслях промышленности, в том числе в энергетике, в социальных, естественных и гуманитарных областях, активизировались исследования и разработки, направленные на создание СППР. В определенной части такие разработки опираются на развитые прежде методы решения задач, совершенствуясь в технологии работы с информацией, в другой же — на новые методы, создаваемые одновременно с развитием информационных технологий и методов принятия решений.

Анализ методов решения задач, используемых для изучения и управления системами и объектами энергетики, показывает, что наиболее употребительные математические модели процессов развития и функционирования энергетических систем и объектов базируются на системах алгебраических и дифференциальных уравнений, а наиболее распространенными методами решения задач являются: решение систем уравнений, методы оптимизации, анализа устойчивости динамических процессов, игровые и методы так называемого "имитационного моделирования". По характеру зависимостей и параметров

математические модели, предназначенные для исследования и управления системами энергетики, делятся на статические и динамические, линейные и нелинейные, непрерывные и дискретные; по способу задания исходной информации — на детерминированные, вероятностные и частично неопределенные. Многие из классических математических моделей или методов специализируются в отношении конкретных задач, т.е. математическая модель или метод совершенствуется, опираясь исключительно на специфические особенности прикладной задачи, при решении которой была выявлена такая необходимость. Совокупности математических моделей и методов, ориентированные на решение конкретных практических задач, реализуются обычно в форме комплексов программ для ЭВМ.

Однако есть задачи, для решения которых математические модели, хотя и необходимы, но еще не применяются, и поэтому они решаются "вручную" на основе интуиции, практического опыта и умозрительного анализа существа проблемной ситуации; а есть и такие задачи, решение которых имеющимися методами затруднено. К числу первых можно отнести некоторые задачи, связанные с долгосрочным прогнозированием развития систем энергетики. Ко второй группе можно причислить, например, задачи, связанные с принятием решения в отдельных ситуациях управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС), которые из-за отсутствия исходной информации, дефицита времени или недостатка вычислительных ресурсов невозможно решить строгими математическими методами.

К ним же можно добавить функциональные задачи восстановления ЭЭС после аварий, решение которых с помощью математических моделей установившихся и переходных режимов чрезвычайно трудоемко. Ликвидация возникающего в результате стихийных явлений, технологических нарушений или ошибок управления и развивающегося (каскадного, цепочечного) аварийного процесса требует на том или ином этапе вмешательства оперативного персонала. Восстановление сложных электроэнергетических систем после таких аварий весьма трудоемко и продолжительно, затрагивает значительную долю отраслей экономики. Существующие диспетчерские инструкции и заблаговременные расчеты ввиду сложности ЭЭС и специфичности конкретных аварийных ситуаций не гарантируют полностью того, что действия персонала будут радио-

нальны, ошибочные действия исключены и соответственно последствия для потребителей и системы минимизированы. Множество аварийных сигналов, поступающих оператору в течение короткого времени, не снимающее зачастую дефицита информации о прошлых, текущей и возможных будущих ситуациях, создает психологически напряженную обстановку, чреватую появлением ошибочных управляющих решений или неправильных действий оперативного персонала, способствующих продолжению развития аварийного процесса.

Совокупность реальных процессов, которые могут возникать в системах энергетики при прогнозировании развития или при управлении функционированием, особенно в связи с аварийными ситуациями, существенно богаче, нежели выразительные средства, свойственные численному моделированию. Поэтому большего успеха, по-видимому, можно достичь, комбинируя широко используемые математические методы с возможностями новых информационных технологий, поддерживаемых средствами (языки и процедуры обработки языковых выражений) искусственного интеллекта таким образом, чтобы достоинства одних компенсировать недостатки других в рамках комплекса задач, решение которых необходимо и достаточно для формирования автоматизированных управляющих систем.

Все чаще для этого привлекаются нечисленные модели управляемых процессов и дедуктивные методы, с помощью которых удастся создать средства поддержки оператора при формировании управляющих решений качественного (не количественного) типа в реальном времени. К их числу относятся, например, логико-лингвистические модели; модели, использующие аппарат нечетких множеств; нейронные сети; эвристические модели, опирающиеся на методы искусственного интеллекта и т.п., используемые в экспертных системах.

От традиционных систем обработки данных экспертные системы (как одно из направлений искусственного интеллекта) отличают: символическое представление предметной области, к которой относится решаемая задача, символический логический вывод и эвристический поиск. Эти черты обуславливают не точный, а часто лишь правдоподобный (гипотетический) характер решения, а также отсутствие стопроцентной уверенности в том, что решение вообще может быть получено.

Процесс формирования экспертной системой нечисленных решений в результате последовательности формальных рассуждений при управлении неким объектом, принадлежащим проблемной области, становится возможным благодаря тому, что эти рассуждения основываются обычно на знании общих физических законов и результатов эмпирических наблюдений, характера взаимосвязи участвующих в поведении объекта сущностей (прямая или обратная пропорциональная зависимость между некими атрибутами, тип нелинейности, область расположения и характер бифуркаций, совокупность условий существования данного события и т.п.), структуры и внешних связей управляемого объекта. Эти знания могут быть формализованы с помощью логико-лингвистических моделей. Наполняя базу знаний, множество таких моделей в их взаимосвязи отражает действующее разнообразие элементов, структур, свойств, отношений, а потому способно передать многие стороны реальной картины проблемного мира.

При проектировании СППР для решения конкретных задач в той или иной области энергетики можно выделить много общих черт, присущих процессу анализа проблемы и ее разрешению вообще. Назовем наиболее характерные из них:

- сбор, структуризация и организация информации о поведении и текущем состоянии объекта;
- диагностика;
- прогнозирование;
- постановка целей управления;
- формирование управляющих альтернатив — вариантов способов достижения цели управления;
- формулирование критериев выбора вариантов;
- оценка альтернатив, взвешенных по выбранным критериям;
- оценка влияния неполноты информации о поведении и текущем состоянии объекта;
- организация использования расчетных моделей и получаемых с их помощью результатов;
- обеспечение наглядности и коммуникабельности используемых СППР средств.

Несмотря на это, создание универсального решателя, пригодного в отношении хотя бы не всех, но достаточно широкого класса проблем, пока невозможно. Индивидуальный подход к реализации каждой из подобных систем в связи со сложностью

задачи в целом чрезвычайно трудоемко. Эти обстоятельства обусловили появление методологии, направленной на разработку инструментальных средств. Последние выполняются обычно в форме программной системы, которая предоставляет возможности синтеза СППР для конкретной прикладной системы (объекта) с помощью встроенных в нее типовых конструктивов, приобретающих в процессе проектирования наполнение, определяемое содержанием этого объекта.

Перечисленному кругу вопросов посвящена настоящая коллективная монография, которая обобщает результаты постоянно действующего научного семинара "Информационные технологии в энергетике". В книге четыре главы. В первой отражены методологические аспекты новых информационных технологий для систем поддержки принятия решений в энергетике, во второй рассматриваются методы искусственного интеллекта и системы, основанные на знаниях, применяемые для построения СППР в энергетике. Третья глава включает конкретные математические методы, модели и инструментальные средства для поддержки процесса принятия решений в энергетике. Четвертая глава посвящена вопросам реализации СППР для исследований и управления энергетикой.

Авторы надеются, что приведенные в книге результаты внесут определенный вклад в разработку методических подходов и инструментария для создания систем поддержки принятия решений в энергетике.



## Глава I

# ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И СОЗДАНИЯ СППР В ЭНЕРГЕТИКЕ

### 1.1. Состояние и общеметодологические проблемы построения систем поддержки принятия решений в энергетике

Проблема построения систем поддержки принятия решений (СППР) в энергетике является частью более общей проблемы, связанной с принятием решений специалистами в области управления и контроля в производственной и общественной сферах. Чем серьезнее последствия принимаемого решения, тем большая ответственность возлагается на специалиста (лицо, принимающее решение, или ЛПР). В наше время, когда нужно перерабатывать и осмысливать большие объемы информации, принятие обоснованных решений еще более усложнилось.

Появление новых информационных технологий, которые, казалось бы, призваны облегчить принятие решений, выдвигает дополнительные требования как к составу и качеству необходимой вычислительной техники, так и к подготовке специалистов.

Кроме того, выделяют различные аспекты этой проблемы: психологические, содержательные, математические, методологические, инструментальные и др., комплексное рассмотрение которых, безусловно, желательно, но труднодостижимо в рамках одной работы. Попытаемся тем не менее рассмотреть наиболее важные из них, акцентируя внимание на общеметодологических проблемах, стоящих перед специалистами в области исследований и управления энергетикой.

**СППР в терминах современных информационных технологий.** Определим СППР как совокупность взаимосвязанных информационной, моделирующей и экспертной (интеллектуальной) систем (рис. 1.1). Под информационной системой (ИС) будем понимать базу данных (или совокупность баз данных), созданную на основе универсальной СУБД и содержащую фак-

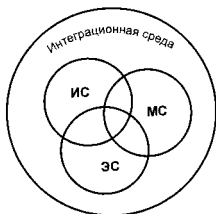


Рис. 1.1. Обобщенная структура системы поддержки принятия решений.

ИС — информационная система;  
 МС — моделирующая система;  
 ЭС — экспертная (интеллектуальная) система.

тографическую информацию, необходимую для принятия решений.

Моделирующая система (МС) включает множество математических моделей для

поддержки решений, реализованных, как правило, в рамках пакетов прикладных программ или отдельных программных модулей, использующих базу данных (информационную систему).

Экспертная (интеллектуальная) система (ЭС) — система, основанная на знаниях, предполагающая создание базы знаний, поддерживающей соответствующие логико-лингвистические модели, реализующие эвристические алгоритмы принятия решений. Интеллектуальная система при формировании выводов может подключать как факты из базы данных, так и алгоритмы (вычислительные процедуры) моделирующей системы.

На практике часто для поддержки решений применяют одну из перечисленных систем (либо одна из них играет ведущую роль, а другие — вспомогательную). Это особенно характерно для так называемых гибридных экспертных систем, где экспертная система является ядром, подключающим по мере необходимости вычислительные процедуры и массивы данных.

Однако при решении большинства задач исследований и управления энергетикой, требующих создания больших баз данных и сложных пакетов прикладных программ, такой подход себя не оправдывает. Необходима интеграция трех равноправных подсистем (информационной, моделирующей и интеллектуальной)\*, которая часто выполняется в рамках специальной оболочки или интеграционной среды (рис. 1.1).

\*Являясь самостоятельными и сложными системами, они в то же время рассматриваются как подсистемы (компоненты) при проектировании архитектуры СППР

Отметим также, что приведенное определение СППР является обобщенным, так как при более детальном рассмотрении в их состав целесообразно включать графические подсистемы (как иллюстративную, так и когнитивную графику), картографический интерфейс (геоинформационные системы) и т.д. Это еще больше усложняет проблему интеграции компонентов СППР, но в общем случае мы можем включать их в состав одной из ключевых систем (например, иллюстративную графику — в состав информационной системы, используя для этого средства СУБД; когнитивную графику — в состав интеллектуальной системы, а картографический интерфейс в случае применения электронных карт для интерпретации результатов вычислительного эксперимента — в состав моделирующей системы).

Приведенное определение СППР не противоречит определениям Decision Support System (DSS) в зарубежной литературе (например, в [1]).

**Состояние в области разработки информационных, экспертных и моделирующих систем как компонентов СППР.** Очевидно, что успех построения СППР определяется состоянием ее компонентов. Достаточно хорошо разработаны научные направления, связанные с созданием систем баз данных и экспертных систем, но несколько хуже обстоят дела с реализацией специализированных баз данных и баз знаний в области энергетики.

К сожалению, в нашей стране не велась целенаправленная и скоординированная работа по созданию баз данных в области энергетики. В частности, отсутствует (в компьютерном виде) полная статистическая информация по авариям в отраслевых системах энергетики (например, за последние двадцать лет), которая была бы необходима при построении СППР для исследований и обеспечения энергетической безопасности. Более того, в ходе реорганизации учреждений, которые занимались сбором таких данных, большая часть информации, имевшейся на бумажных носителях, утрачена, а сохранившаяся информация в условиях коммерциализации отношений фактически недоступна для научных организаций.

В области построения экспертных систем в течение нескольких лет первоочередной оставалась разработка инструментария: оболочек экспертных систем, "пустых" экспертных систем и т.д., что во многом определяло бурное развитие этого

направления. Сейчас, когда основные проблемы создания инструментария решены (появились, например, такие мощные инструментальные системы, как G2 [2]; см. также раздел 2.3), акценты переместились на создание баз знаний. Если эта проблема сравнительно легко решается для областей, где четко зафиксированы эвристические правила, то для более сложных областей проблема извлечения знаний и построения логико-лингвистических моделей становится ключевой при создании экспертных систем. В частности, в энергетике наиболее выигрышной по этим причинам является разработка экспертных систем в областях, где последовательность действий четко определена должностными инструкциями ("советчики диспетчера", диагностические интеллектуальные системы и т.п.) [3—8]. Для областей, менее формализованных, связанных с принятием решений в условиях неопределенности, проблема "извлечения" знаний и создания баз знаний существенно усложняется. Сейчас понятно, что для успешного решения этой проблемы требуется учитывать многие аспекты и в том числе психологические [9—11].

Наиболее проработана в энергетике область создания "моделирующих систем". В частности, многолетние работы Сибирского энергетического института СО РАН в области математического моделирования затрагивают большинство вопросов функционирования и управления развитием систем энергетики и топливно-энергетического комплекса [12—15]. Таким образом, имеются все предпосылки для использования этих моделей при построении СППР.

Следует отметить, что существуют и разрабатываются строгие математические подходы к решению проблемы принятия решений (например, [16—19]). Здесь они не рассматриваются. Предполагается, что они включаются в состав моделирующих систем.

На современном уровне развития информационных технологий целесообразно осуществлять интеграцию компонентов СППР в распределенной вычислительной среде (в рамках локальной вычислительной сети организации или учреждения). Использование современного штатного программного обеспечения (например, операционных систем Windows-95 или Linux) решает некоторые проблемы интеграции, но, как правило, порождает новые, выдвигая повышенные требования к вычис-

лительным ресурсам, и, как следствие, необходимость перехода на более мощные ЭВМ (см. разделы 4.1—4.2).

**СППР и новые информационные технологии в энергетике.** Краткий обзор проблемы поддержки принятия решений в энергетике показывает, что существует устойчивая тенденция к "интеллектуализации" СППР, связанная с успехами в области искусственного интеллекта. Основные усилия разработчиков до последнего времени были направлены на решение задач в области диспетчерского управления и диагностики энергетических объектов. Вместе с тем назрела необходимость создания интеллектуальных СППР для решения таких комплексных проблем, как, например, обеспечение энергетической безопасности страны.

Разработка таких систем осложняется тем, что не решены общеметодологические проблемы построения информационных технологий исследований и управления энергетикой [14]. Общий уровень современных информационных технологий в энергетике (в том числе в научных исследованиях) пока существенно отстает от мирового. В то же время успех большинства современных проектов определяется уровнем используемых информационных технологий.

Примером может служить бурное развитие (на протяжении последних пяти лет) направления, получившего за рубежом название "Business Process Reengineering" — реинжиниринг делового процесса с использованием новейших информационных технологий [20—21]. Используя такие технологии, как распределенные базы данных, экспертные системы, телекоммуникационные сети, средства поддержки решений (доступ к базам данных, программное обеспечение для моделирования и т.п.), удастся осуществлять коренное преобразование предприятий, приводящее к многократному улучшению производственных показателей.

Можно констатировать, что общий уровень информационных технологий в энергетике (в частности, в области построения СППР для исследований и управления энергетикой) характеризуется следующим:

- 1) имеются существенные наработки (методы, модели, алгоритмы, программы) в содержательных (предметных) областях, которые могут составить ядро СППР;
- 2) в области информационных технологий достигнут высокий уровень в части разработки инструментальных средств

общего назначения, которые могут быть использованы для реализации интерфейсов, информационных интеллектуальных систем, распределенной обработки данных в СППР.

В то же время в энергетике:

— существует большой разрыв между современным уровнем информационных технологий и уровнем их использования;

— решение проблемы создания СППР тормозится отсутствием общеметодологического подхода и сложностью интеграции требуемых компонентов СППР;

— отсутствуют взаимопонимание, единый взгляд на проблему и, как следствие, разобщены усилия технологов и программистов в решении проблемы СППР.

При решении этих проблем необходима интеграция усилий специалистов разного профиля (энергетиков, технологов, программистов, специалистов в области искусственного интеллекта) для обмена опытом, анализа успешных реализаций, обобщения результатов с целью выработки общеметодологического подхода к созданию СППР, которые могут стать новым этапом использования информационных технологий в энергетике.

Издание настоящей книги рассматривается как один из шагов по пути такой интеграции.

## **1.2. Проблемы принятия решений при исследованиях и обеспечении энергетической безопасности России**

В последние годы существенно изменились условия функционирования топливно-энергетического комплекса (ТЭК), что делает наиболее актуальной проблему энергетической безопасности страны. При этом под "энергетической безопасностью (ЭБ)" следует понимать состояние защищенности жизненно важных "энергетических интересов" личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз. Подобные интересы сводятся к бесперебойному обеспечению потребителей экономически доступными топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР) приемлемого качества: в нормальных условиях — к обеспечению (снабжению) в полном объеме обоснованных потребностей; в чрезвычайных ситуациях — к гарантированному обеспечению минимально необходимого объема важных потребностей.

Такая трактовка близка к интерпретации ЭБ Мировым энергетическим советом (МИРЭС) как уверенности в том, что энергия будет иметься в распоряжении в том количестве и того качества, которые требуются при данных экономических условиях [22].

Для большинства стран, обладающих незначительными собственными ТЭР, ЭБ сводится преимущественно к надежности, гарантированности внешних поставок; для среднеобеспеченных энергоресурсами стран — к энергетической независимости, способности обойтись при потере внешних поставок собственными ресурсами. Для России решающими при этом являются внутренние факторы. Укрупненно могут быть выделены два основных фактора: а) осязаемое превышение на внутреннем рынке потенциального предложения ТЭР над спросом; б) высокий уровень живучести систем энергоснабжения и энергопотребления, их устойчивость к возмущающим воздействиям при реализации имеющихся потенциальных угроз. В свою очередь, первый фактор определяется двумя условиями: достаточной мощностью систем энергоснабжения (производства, переработки, транспорта и распределения ТЭР) и рациональным ограничением спроса на ТЭР в результате осуществления энергосберегающей политики. Выполнение этих условий обеспечивает помимо прочего наличие необходимых резервов производственных мощностей в отраслях ТЭК и достаточных складских запасов ТЭР.

Что касается упомянутых живучести, устойчивости (второй фактор), то они обеспечиваются широким кругом превентивных и ликвидационных мер разного рода, включая накопление запасов и создание резервов.

**Основные проблемы и угрозы ЭБ.** Можно утверждать, что в настоящее время (1994—1996 гг.) энергетическая безопасность России в основном (стратегически) обеспечивается (хотя локальные сбои случаются довольно часто), несмотря на низкую надежность энергооборудования, а также на слишком малый ввод производственных мощностей (в целом не компенсирующий их выбытия). Причина — значительное ослабление спроса на энергоресурсы в результате спада производства в отраслях-потребителях ТЭР и резкого сокращения объемов строительства жилья и объектов социальной инфраструктуры, а также в результате всеобщего снижения платежеспособности. С этой причиной связано и главное опасение за ЭБ в бли-

жайшие годы: как только спад сменится оживлением, а затем и устойчивым ростом производства продукции в промышленности и строительстве, глубоко изношенный, не имеющий достаточных заделов, технически отсталый (в том числе по показателям надежности) производственный аппарат отраслей ТЭК окажется не в состоянии удовлетворить возросший спрос на ТЭР, тем более что предприятия и отрасли-потребители ТЭР не уделяли должного внимания энергосбережению. Эта тревожная ситуация — одна из главных причин превращения ЭБ в одну из актуальнейших проблем.

Вторая, связанная с первой, причина состоит в том, что неизбежный и необходимый переход (в ТЭК, как и во всем народном хозяйстве) от преимущественно безвозвратного, бесплатного бюджетного (государственного) финансирования инвестиций к преимущественно платному, возвратному их кредитованию либо самофинансированию осуществляется недостаточно последовательно: бюджетное финансирование резко сократилось, а возможности самофинансирования и привлечения внешних источников слабы. В результате произошли резкий спад инвестиционной активности в отраслях ТЭК и отмеченное уже отставание ввода мощностей от необходимого уровня.

Одной из важнейших и принципиально новой экономической угрозой ЭБ является упомянутая в табл. 1.1 нестабильность финансового состояния энергетических предприятий. Ее характеризуют размеры и рост дебиторской и кредиторской задолженности предприятий ТЭК, что чревато прекращением поставок ТЭР потребителю-должнику, приводит к задержке зарплаты своим работникам (следствием чего являются социальная напряженность и забастовки на энергетических предприятиях), прекращению поступления и без того скудных собственных средств в инвестиционный фонд. Кредиторская задолженность приводит к подобным же проблемам у предприятий-смежников, ограничивает предприятиям свободное распоряжение своими средствами, а также возможность пользоваться кредитами банков. Повсеместно растет требование предварительной оплаты. Все это ведет к нарушению нормальных хозяйственных связей, в том числе по поставкам ТЭР, а также товаров и услуг предприятиям ТЭК.

Среди основных экономических угроз энергетической безопасности следует выделить также высокий уровень моно-



Основные угрозы ЭБ и их последствия

Угрозы	Формы реализации	Последствия
Экономические	Финансовая дестабилизация и кризис платежей	Нарушение финансового механизма функционирования
	Дефицит инвестиционных ресурсов	Недостаточные объемы ввода новых мощностей и технического перевооружения СЭ
	Высокий монополизм	Рост стоимости ТЭР и угроза экономической безопасности из-за высокой энергоемкости промышленности
Социально политические	Трудовые конфликты и забастовки	Дефицит ТЭР, сокращение материального производства
	Общественные движения антиэнергетической направленности	Ограничение строительства и функционирования энергетических предприятий
Техногенные	Крупные аварии в СЭ	Снижение производственного потенциала, ограничение потребителей
Природные	Стихийные бедствия	Выход из строя энергетических объектов на обширной территории
	Сильные проявления природных процессов	Ограничение потребителей при отсутствии необходимых резервов в СЭ

политики на федеральном и региональных рынках ТЭР, слабость антимонопольной политики государства и несовершенство механизма государственного регулирования естественных монополий в ТЭК. Монополии, по существу, диктуют уровень цен и тарифов на ТЭР, навязывают потребителям тот уровень устойчивости энергоснабжения, который могут обеспечить, препятствуя зачастую проникновению на рынок альтернативных производителей.

Наряду с рассмотренными, в известном смысле новыми следует назвать по крайней мере три традиционные угрозы ЭБ экономического происхождения: высокий уровень энергоемкости всех секторов экономики России и отсутствие не только каких-либо весомых успехов в сфере энергосбережения, но и

действенного механизма стимулирования последнего; необеспеченность энерготранспортными связями (межрегиональными, межузловыми) по некоторым энергоносителям при значительной энергетической несбалансированности многих регионов и энергоузлов; недостаточная емкость топливохранилищ.

Две последние угрозы лишь с условностью можно отнести к экономическим, скорее, это узкие места в ТЭК, его внутрипроизводственные угрозы ЭБ, как и низкая надежность оборудования, чрезмерная централизация энергоснабжения, концентрация производства, длительность инвестиционного цикла и т.п.

Практически все угрозы социально-политического характера стали реальными в последние 8—10 лет. Ранее о них можно было говорить лишь весьма гипотетически. Важнейшими среди этих угроз являются следующие:

а) трудовые и другие социальные конфликты и забастовки, прежде всего на предприятиях ТЭК и в обеспечивающих ТЭК отраслях. Вполне очевидно, что, например, длительная всеобщая забастовка шахтеров Кузбасса может привести к глубокому нарушению ЭБ страны; подобная же всероссийская забастовка нанесла бы ЭБ России сильнейший удар. Весьма опасной с позиций ЭБ формой действий в социальном или экономическом конфликте является одностороннее прекращение отгрузки топлива (или поставки электрической либо тепловой энергии) потребителям, в том числе как реакция на неплатежи;

б) региональные, этнические и другие политические конфликты, прежде всего сопровождаемые диверсионно-террористическими актами против объектов ТЭК, насильственным их захватом, военными действиями в районах размещения этих объектов. Крупномасштабным проявлением подобной угрозы явились события в Чечне в 1994—1996 гг., менее значительным — осетино-ингушский конфликт;

в) экологические и антиатомные общественные движения, когда они не ограничиваются требованиями более тщательного обоснования, экспертизы и корректировки (с целью обеспечения защиты окружающей среды и учета других социальных аспектов) проектов, прекращения нарушений норм и законодательства действующими энергопредприятиями, а бескомпромиссно блокируют сооружение и эксплуатацию энергообъектов, совершенно необходимых для устойчивости энергоснаб-

жения. Примерами реализации угроз такого рода явились блокирование строительства Северо-Западной ТЭЦ в Москве, Катунской ГЭС на Алтае, Иркутской ТЭЦ № 8, а также мощное постчернобыльское движение за полное прекращение строительства и эксплуатации всех АЭС.

Угрозы ЭБ природного и техногенного происхождения — это в основном вполне традиционные угрозы надежности, устойчивости энергоснабжения (подробнее о них см. в [23, 24]). Заметим, однако, что должны быть осознаны в качестве возможных угроз ЭБ также значительные зимние похолодания в пределах нормативных расчетных температур наружного воздуха. Удовлетворение потребности в тепле при этих условиях основывается на строгом соответствии нормативам котельной мощности, складских запасов топлива, всякого рода потерь тепла и т.п. В реальной жизни эти нормативы часто не выполняются, и оказывается, что в аварийной ситуации даже при незапредельных холодах температура в квартирах снижается до недопустимо низкой, "размораживаются" отопительные системы, возникает необходимость переселения целых жилых массивов. Для другой группы регионов в число важнейших угроз энергетической, а также экологической безопасности все больше выдвигаются аварии на энергетических трубопроводах (газо-, нефте- и нефтепродуктопроводах), "перенасытивших" эту территорию (значительная часть регионов Урала, Поволжья и др.). Другой особенностью проблем энергетической безопасности (и снова, одновременно и экологической безопасности) здесь является слабое развитие газификации сельских поселений и малых городов при "протекании" рядом с ними мощных газовых "рек".

**Мониторинг и индикаторы ЭБ.** Для обоснования решений по обеспечению ЭБ (какие группы действия, где, когда и с какой интенсивностью) необходимо иметь: во-первых, некоторую систему измерителей энергетической безопасности — ее индикаторов; во-вторых, соответствующую возможностям и потребностям общества систему периодически пересматриваемых критических (пороговых, предельно допустимых) значений этих индикаторов, своего рода нормативы; в-третьих, нужно постоянно, с определенной периодичностью отслеживать, рассчитывать и анализировать фактические значения индикаторов в рамках системы общего энергетического мониторинга страны и ее регионов.

По нашему представлению, в качестве основных можно выделить перечисленные ниже 24 объекта мониторинга и индикации, сгруппированные в 4 области.

### 1. Народно-хозяйственные индикаторы.

1.1. Энергоемкость экономики, эффективность использования ТЭР, их динамика.

1.2. Гибкость энергопотребляющих процессов, технологий, аппаратов в отношении вида, сорта, марки энергоносителя.

1.3. Производственные возможности поставщиков основных материалов и оборудования для сооружения и эксплуатации объектов ТЭК.

1.4. Финансовые балансы и платежная дисциплина предприятий ТЭК и потребителей ТЭР.

### 2. Энергоэкономические индикаторы.

2.1. Самообеспеченность страны, регионов, энергоузлов, городов, крупных потребителей производимыми энергоносителями.

2.2. Диверсифицированность приходной части топливно-энергетических балансов тех же территорий и потребителей.

2.3. Инвестиционная активность в сфере ТЭК и энергосбережения, обновление основных фондов.

2.4. Дефицит энергетических балансов, недопоставки ТЭР потребителям, продолжительность и глубина перебоев электро- и теплоснабжения.

2.5. Импорт ТЭР, энергетического оборудования и труб для ТЭК.

2.6. Монополизация в энергоснабжении.

2.7. Полнота и действенность (соблюдение) энергетического законодательства, в особенности его части, связанной с обеспечением ЭБ.

2.8. Охват объектов энергоснабжения и энергопотребления системой мониторинга ЭБ.

### 3. Резервы и запасы.

3.1. Обеспеченность природными ТЭР.

3.2. Резервы энергетических производственных мощностей и пропускных способностей энергетических коммуникаций.

3.3. Запасы топлива всех видов в топливохранилищах разной принадлежности.

3.4. Уровень резервирования электрической и тепловой энергии и топлива в схемах питания потребителей.

3.5. Строительные заделы на сооружениях объектов ТЭК.

3.6. Запасы оборудования, запасных частей и материалов для выполнения работ по устранению последствий аварий и ЧС в системах энергоснабжения.

4. Технические (отраслевые) объекты.

4.1. Степень концентрации производственных мощностей и объектов производства (транспорта) в отраслях ТЭК на уровне агрегатов, объектов, комплексов.

4.2. Соответствие технического уровня отечественного энергооборудования мировым стандартам.

4.3. Износ основных производственных фондов в отраслях ТЭК.

4.4. Эксплуатационная готовность основного оборудования в отраслях ТЭК.

4.5. Продолжительность строительства энергообъектов и быстрота отдачи инвестиций.

4.6. Мощность ремонтно-восстановительных организаций и подразделений в отраслях ТЭК.

Каждому из 24 перечисленных объектов мониторинга (области индикативного анализа) соответствует набор конкретных показателей (индикаторов), определяющих состояние, уровень энергетической безопасности России или отдельного ее региона. Разнообразие индикаторов в рамках одного объекта индикативного анализа определяется наличием разных энергоносителей, разных отраслей экономики, региональными различиями, многоаспектностью анализа в рамках одного объекта и другими причинами. Индикаторы некоторых групп характеризуют ЭБ только на уровне страны, индикаторы других групп важны для анализа состояния ЭБ также на уровне регионов субъектов РФ либо экономических районов) и более мелких территорий (объектов). Общая размерность соответствующего массива составляет несколько сотен показателей.

В рамках исследований проблемы энергетической безопасности существуют два аспекта выполняемых работ: исследовательский (аналитический) и проектный (синтез, построение эффективных с позиций ЭБ экономики и энергетики). Исследования в первом аспекте могут и должны выполняться широким фронтом" комплексно-параллельного решения соответствующих задач.

Что касается второго аспекта, то, как представляется, возможны три принципиально различных подхода к учету фактора ЭБ при выработке и принятии решений по развитию ТЭК и

систем энергетики, а также определенного круга решений по развитию экономики в целом.

Первый состоит в том, что решение предварительно вырабатывается без учета фактора ЭБ, а затем уточняется, корректируется с его учетом. Это позволяет, в частности, непосредственно оценить технические и экономические последствия учета фактора ЭБ, а также определить, на каком уровне решения задачи такой учет наиболее эффективен. Данный подход отчасти носит также исследовательский характер.

Второй подход состоит во включении критерия ЭБ в комплексный критерий эффективности, объединяющий критерии экономической эффективности, экологичности, социальной приемлемости, а в некоторых случаях и критерии надежности, технической безопасности, финансовой реализуемости, качества продукции.

Третий подход базируется на традиционных моделях развития энергетики и на экономическом критерии, но в модель вводятся ограничения на ряд ее параметров, обусловленных учетом требований ЭБ.

Из этих трех подходов наиболее строгим и рациональным представляется второй, но наиболее подготовленным (инструментально и информационно) в настоящее время следует признать первый подход, позволяющий использовать разработанные или разрабатываемые "исследовательские" модели.

**Математические модели для исследования проблем ЭБ.** Требования к инструментарию для исследования проблем ЭБ в значительной мере определяются необходимостью корректного описания объекта исследования, его важнейших внутренних и внешних взаимосвязей, характера протекания имитируемых процессов и их последствий. Этим требованиям отвечают некоторые математические модели, разработанные и разрабатываемые в СЭИ СО РАН (СОФИТ, ДЕФИЦИТ).

Проблема влияния стоимости энергоресурсов на изменение цен в других отраслях может быть исследована с помощью стоимостных моделей межотраслевого баланса (МОБ). При решении широкого круга задач текущего функционирования широкое применение находят экономико-математические модели, сводящиеся к задачам максимизации потока, параметрической оптимизации и др. Одно из центральных мест занимает модель оптимальной корректировки вариантов развития ТЭК в соответствии с требованиями ЭБ.

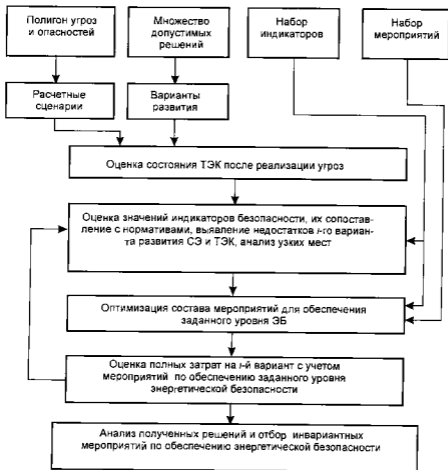


Рис. 1.2. Упрощенная схема решения задачи корректировки вариантов развития СЭ и ТЭК с учетом требований ЭБ.

Задача корректировки вариантов развития ТЭК с учетом требований ЭБ формулируется следующим образом: для всего допустимого множества сценариев развития ТЭК в течение периода времени  $T$  выявить рациональные сценарии развития и оптимальный набор возможных средств и мероприятий для обеспечения требуемого уровня ЭБ при условии возможной реализации прогнозируемого полигона угроз и опасностей.

Технология проведения исследований в рамках данной задачи складывается из следующих этапов:

1) развертка показателей принятого за базу варианта развития энергетики страны и ее регионов с учетом заложенных на рассматриваемую перспективу изменений;

2) формирование сценариев действия возможных угроз;

3) комплексная оценка соответствия сформированных в п. 1 вариантов развития (без учета мер по обеспечению ЭБ) требованиям ЭБ, описанным в форме конечного набора индикаторов безопасности, выявление потенциально возможных узких мест и т.п.;

4) оптимизация состава мероприятий по обеспечению ЭБ в соответствии с комплексной оценкой;

5) отбор наиболее эффективных стратегий развития и инвариантных мероприятий по ЭБ.

Более подробно схема решения задачи изображена на рис. 1.2.

Для наиболее эффективного выполнения этапов 1—5 требуется разработка методических основ и инструментальных средств, результатом которой должна стать (в масштабах страны) информационная система, основанная на использовании современных информационных технологий, усовершенствованные математические модели и компьютерные системы поддержки экспериментальных исследований и принятия решений в области энергетической безопасности на федеральном и региональных уровнях.

### **1.3. Проблемы создания АСДУ центральной электроэнергетической системы Монголии**

Одна из основных проблем энергетики Монголии на современном этапе связана с совершенствованием управления Центральной электроэнергетической системой (ЦЭЭС). Для ее решения необходимо создать автоматизированную систему управления энергетикой страны (типа ОАСУ), в рамках которой первоочередная роль отводится автоматизированной системе диспетчерского управления (АСДУ). Диспетчерское управление в ЦЭЭС будет представлять собой сложный комплекс, функции управления в котором распределяются между верхним и отдельными диспетчерскими центрами нижнего уровня иерархии.



Функции оперативного управления в этом комплексе могут быть условно разделены на несколько групп: информационные; расчетные и оптимизационные; советчики диспетчера, включая тренажеры и экспертные системы; функции автоматического управления.

Информационные функции с помощью разнообразных средств отображения обеспечивают диспетчера информацией, необходимой ему для управления текущим режимом работы ЦЭС, используются для ретроспективного анализа и формируют отчетную диспетчерскую документацию. Информационная группа функций выдает исходные данные для всех остальных функций оперативного управления и является информационной базой для всего комплекса в целом. Она включает оценку состояния и оперативный прогноз потребления.

Расчетные, в том числе оптимизационные, функции оперативного управления предназначены для выполнения таких задач, как идентификация текущего режима с точки зрения его допустимости, дооптимизация текущего режима, обеспечение баланса активной и реактивной мощностей, обеспечение допустимости, надежности и экономичности режима системы и др.

В процессе развития АСДУ в составе комплекса технических средств может происходить постепенная смена моделей ЭВМ для расширения функциональных возможностей системы. Однако архитектура комплексов практически может оставаться неизменной, представляя собой многомашинную иерархическую ассоциацию.

**Особенности ЦЭС Монголии.** В территориальном разрезе ЦЭС охватывает 8 аймаков, территория которых занимает 864,0 тыс. км<sup>2</sup>, или более 55 % всей территории Монголии.

Численность населения в сфере действия ЦЭС составляет более 1,3 млн человек, или почти 70 % населения страны. Формирование ЦЭС было начато в 1967 г. и сейчас в нее входят 5 тепловых электростанций, суммарная установленная мощность которых составляет более 800 МВт, 4 наиболее крупных энергоузла, таких как Улан-Баторский, Дархан-Селенгинский, Эрдэнэт-Булганский и Баганур-Чойрский. Напряжение системообразующих и межузловых ЛЭП-220 кВ. В 1989 г. в ЦЭС было выработано 3090,2 млн кВт·ч электро-

энергии, или более 86 % общего производства электроэнергии Монголии.

Общее электропотребление в 1989 г. по стране достигло 3650 млн кВт·ч, по ЦЭЭС — 3200 млн кВт·ч, или около 87 % всего потребления.

В ЦЭЭС пиковая и полупиковая части графика нагрузки покрываются за счет конденсационной мощности ТЭЦ и импортной мощности из России, в том числе с целью покрытия пиковых мощностей, так как собственные маневренные электростанции и установки, предназначенные для покрытия переменной части графика нагрузки, отсутствуют. В ЦЭЭС мощность самого крупного агрегата составляет 100 МВт с давлением 130 ата, самого маломощного — 12 МВт с давлением 32 ата.

Территориальная близость ЦЭЭС Монголии к крупным энергетическим центрам России создает благоприятные условия для объединения этой системы и превращения ее в перспективе в более мощный узел для энергоснабжения страны.

В конце 1979 г. ЦЭЭС была соединена с энергосистемой Бурятии, ОЭЭС Сибири по двухцепной ЛЭП-220 кВ. Объединение двух систем позволило сократить резервную мощность (в ЦЭЭС Монголии это сокращение достигло 6—8 % от ее максимальной нагрузки) и улучшить режим работы ТЭЦ, тем самым на 5—10 % увеличилось число часов использования установленной мощности электростанций в ЦЭЭС.

В настоящее время заканчиваются проектно-изыскательские работы по строительству ГЭС на р. Этийнгол. Максимальная мощность ГЭС достигнет 220 МВт с четырьмя агрегатами по 55 МВт. Строительство этой ГЭС в значительной мере позволит использовать ее для обеспечения прироста потребности в маневренной мощности в ЦЭЭС Монголии.

Развитие ЦЭЭС, рост охватываемых ими территорий, увеличение мощности и усложнение структуры создают опасность нарушения электроснабжения обширных территорий вследствие неблагоприятного случайного развития аварийных событий. Это влечет за собой весьма ощутимый материальный ущерб из-за сбоев в производственных процессах, а также моральный ущерб населению.

В ЦЭЭС с относительно слабыми связями, характеризующимися сравнительно малой пропускной способностью ЛЭП,

следует учитывать аварийные возмущения, сопровождающиеся сравнительно длительными небалансами активной мощности. Такие небалансы обычно возникают в результате внезапного отключения части агрегатов электростанции или всей электростанции, а также в случае аварийного отключения или снижения пропускной способности ЛЭП-220 кВ ГОГРЭС — Дархан, Дархан — Улан-Батор и т.д.

Среди других специфических особенностей режимов работы ЦЭЭС Монголии следует отметить:

— большую территорию и малую рассредоточенную нагрузку потребителей. Резко переменный характер суточного графика нагрузки из-за преобладания маломощных бытовых нагрузок;

— малые возможности для оперативного управления и обеспечения надежности режима ЦЭЭС из-за однородной структуры генерирующих мощностей ЦЭЭС, состоящей из одних ТЭЦ (отсутствие пикоснимающих станций часто приводит к остановке основного оборудования ТЭЦ или ограничению потребителей);

— сравнительно большой импорт электроэнергии из ОЭЭС Сибири из-за отсутствия резервов мощности в ЦЭЭС;

— отсутствие компенсирующих устройств реактивной мощности для регулирования напряжения отдельных узлов и в целом по ЦЭЭС. Особенно сильно сказывается это обстоятельство во время регулирования генерации ЛЭП в минимальном режиме работы ЦЭЭС (в ночное время);

— слабое развитие телеизмерений (ТИ) и телесигнализации (ТС), а также отсутствие АСДУ для управления режимами ЦЭЭС в реальном времени на основе ЭВМ и современных средств автоматики.

**Основные функциональные задачи АСДУ ЦЭЭС.** В области оперативного управления ЦЭЭС с целью освоения и дальнейшего расширения функций, реализуемых с помощью ОИУК АСДУ ЦЭЭС Монголии, предстоит решить следующие задачи:

— прогнозирования нагрузки с учетом оперативной информации о прогнозе метеорологической обстановки, что должно существенно повысить точность прогноза, а также характеристик, определяющих вероятность отклонения значений нагрузки от прогноза;

— расчета показателей надежности основного оборудования на базе оперативно накапливаемой, ретроспективной инфор-

мации о его отказах, в том числе прогноза этих показателей (для ЛЭП с учетом информации о прогнозе метеорологической обстановки);

— расчета надежности и качества топливоснабжения ТЭЦ и оптимальных запасов топлива в различные периоды времени;

— определения в краткосрочном и суточном циклах управления оптимального состава работающего оборудования и оборудования, формирующего резерв с различным временем его мобилизации;

— оценки состояния для расчетных схем ЦЭС, содержащих 50—70 узлов в информационно-управляющих подсистемах и 200—400 узлов в информационно-вычислительных подсистемах;

— оптимизации режима и коррекции оптимального режима по активной мощности (с периодичностью 20—30 мин) с использованием характеристик относительных приростов и учетом потерь мощности в сети при максимально возможной автоматизации обмена исходной и управляющей информацией;

— оперативной оценки устойчивости (с помощью аналитических методов и методов утяжеления, а также на основе вероятностных методов расчета запасов устойчивости) в текущем и возможных послеаварийных режимах;

— выбора алгоритмов настройки иерархических систем противоаварийной автоматики, предотвращающей нарушения устойчивости, с районными центрами автоматической дозировки управляющих воздействий на объектах и координирующими системами на верхних уровнях управления;

— расчета показателей надежности электроснабжения потребителей, включая показатели безопасности ЦЭС, на различных уровнях иерархии управления и выбора оптимальных путей (с учетом располагаемых средств и возможностей) их доведения до норм;

— контроля за потерями мощности и электроэнергии в сети, состоянием средств связи телемеханики, наличием оперативных резервов мощности для ведения нормального режима и устранения его нарушений, потреблением мощности и электроэнергии для ЦЭС в целом, районов, отдельных более крупных потребителей.

Алгоритмы оценки режимов и выработки советов при этом должны формироваться таким образом, чтобы они были пригодны для использования дежурными диспетчерами, специа-

листами служб режимов и релейной защиты при рассмотрении оперативных заявок, диспетчерской службой в процессе обучения и тренировки оперативного персонала. Должна существовать возможность применения отдельных алгоритмов в автоматическом режиме, в частности для оценки надежности текущего и потенциальных послеаварийных режимов.

В оперативно-информационном управляющем комплексе (ОИУК) диспетчерского пункта электрических сетей должны получить распространение функции:

- контроля состояния схемы распределительной сети, осуществляющие проверку обеспечения питания всех центров нагрузки и отсутствия замкнутых цепей;

- контроля за режимом сети по данным телеизмерений напряжения в узлах, тока и мощности, а также активных и реактивных их составляющих; проверки достоверности телеинформации;

- контроля за электропотреблением и управлением нагрузкой; выбора состава потребителей, подлежащих отключению при действии АЧР или САОН, так, чтобы обеспечивался объем разгрузки и вместе с тем минимизировался ущерб у потребителей;

- определения расстояния до места повреждения на основании фиксирующих приборов и длительности и величины отклонения значения отдельных параметров режима (токов и напряжений) от установленных пределов;

- автоматического изменения параметров настройки устройств релейной защиты и автоматики при изменении схемы сети;

- расчетов уравнивающих токов в сети для оценки возможности отключения разъединителем тока нагрузки в замкнутой схеме;

- моделирования режима распределительной сети для выявления псевдоизмерений, контроля качества электроэнергии;

- оптимизации схемы распределительной сети. До настоящего времени установление точек деления распределительной сети с целью снижения потерь электроэнергии и разгрузки трансформаторов центральной подстанции производится на основании обобщенной информации 1 раз в сезон. Однако по мере насыщения сети оперативными коммутационными аппаратами и внедрения средств телеуправления появится возмож-

ность оперативного (в реальном времени) решения этой задачи;

— оптимизации напряжения в центре питания. Эта задача предполагает оптимизацию текущего режима по напряжению с учетом требований многих потребителей. При этом в соответствии с расчетами, производимыми микроЭВМ, выдаются команды на изменение уставок АРНТ, установленных на трансформаторных подстанциях. Таким образом будет осуществляться в реальном времени корректировка ответвлений, установленных на трансформаторных подстанциях распределительной сети в соответствии с оптимизационными расчетами, выполненными предварительно на соответствующий сезон;

— оптимизации режима работы компенсирующих установок у потребителей. Эффективность оптимизации режима распределительной сети по напряжению может быть повышена путем привлечения к данному процессу компенсирующих установок потребителей. Это может быть осуществлено с помощью работающей в реальном времени ЭВМ, которая, оптимизируя режим, передаст задания потребителям на изменения режима имеющихся у них установок.

**Технические средства** системы АСДУ ЦЭЭС должны соответствовать современному уровню информационной технологии и базироваться на передовой вычислительной технике, отвечающей требованиям практики, т.е. не должны основываться на морально, а во многих случаях и физически устаревшей информационно-вычислительной технике. До последнего времени основная ориентация была на 16-разрядные управляющие мини-ЭВМ, работающие в реальном времени, тогда как в развитых странах уже осуществлен переход на 32-разрядные ЭВМ типа VAX, которые позволяют совместить задачи планирования в краткосрочных циклах управления и задачи реального времени. Широкое распространение получили ПЭВМ, обладающие огромными возможностями сервиса, диалога с пользователем, взаимодействия различных пользователей и баз знаний для принятия коллективных решений на сети ЭВМ.

Эти возможности должны быть учтены в полной мере при разработке концепции и создании комплекса технических средств (КТС) АСДУ ЦЭЭС Монголии.

Для такой небольшой энергосистемы, как ЦЭЭС, имеющей малые ПЭС, используются ОИУК, основанные на мини-ЭВМ (без универсальных ЭВМ). Мини-ЭВМ наряду с осуществ-

лением функций информационно-управляющей подсистемы (ИУП) обеспечивают решение основных задач информационно-вычислительной подсистемы (ИВП). Такая возможность объясняется сравнительно малой размерностью расчетных схем сети, малыми объемами задач, учета и анализа при меньших объемах телеинформации, обрабатываемой для задач оперативного контроля режимов. При этом варианте возможны два режима организации вычислительного процесса: две взаимно резервируемые мини-ЭВМ решают задачи как ИУП, так и ИВП; для задач ИВП выделяется одна из мини-ЭВМ, ИУП принимает на себя ее функции, после чего все задачи ИВП должны решаться с помощью абонентских пунктов (АП).

Обобщенная структура КТС ОИУК АСДУ ЦЭЭС Монголии представлена на рис. 1.3. Его основу составляют две 32-разрядные мини-ЭВМ типа VAX, связанные между собой информационными и управляющими связями. При проектной разработке предлагается ориентироваться на мини-ЭВМ типа CM-1702 или применение техники семейства VAX.

В качестве стандартного программного обеспечения (СТПО) в типовом комплексе ОИУК АСДУ на базе мини-ЭВМ CM-1702 и ПЭВМ используется операционная система МОС ВП2 для CM-1702 и MS DOS для PC [29].

МОС ВП2 обеспечивает работу ряда программных систем, существенно расширяющих ее возможности, в том числе:

1) многофункциональной информационной системы, включающей системы управления базами данных сетевого и реляционного типов, интерактивный процессор запросов, систему управления словарями;

2) средства построения неоднородных локальных и региональных сетей на базе мини-ЭВМ.

Необходимо отметить, что принципы построения АСДУ ЦЭЭС Монголии будут ориентированы на рекомендации Международной организации по стандартизации в части взаимодействия открытых систем (ISO/OSI).

На рис. 1.3 модуль связи с объектом предназначен для приема телеинформации, ее первичной обработки, управления средствами коллективного отображения, передачи информации в кодах телемеханики на выше- и нижележащих уровнях иерархической структуры АСДУ ЦЭЭС.

Модуль связи с объектом может быть построен на различных вычислительных средствах, таких как RPT-80, УТМ

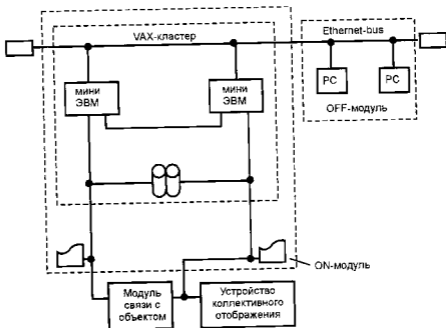


Рис. 1.3. Логическая структура КТС ОИУК АСДУ ЦЭЭС.

"Гранит", СМ-1810 и т.п. Существенными являются только выполняемые функции и протоколы обмена с другими комплексами системы.

К обязательным функциям модуля могут относиться следующие:

- прием телеинформации (ТИ, ТС, АЦИ) из каналов связи от телепередатчиков различных типов устройств телемеханики
- ретрансляция телеинформации;
- кодовый контроль достоверности;
- формирование и передача команд телеуправления и теле регулирования;
- вызов телеинформации по требованию персонала или автоматически;
- контроль состояния каналов связи и автоматически переход с неисправного на исправный канал;
- автоматический обмен данными с ЭВМ ОИУК для дальнейшей обработки;
- управление щитом и пультом;



— автоматический ввод информации от цифровых частотомеров и электронных часов для отображения промышленной частоты и астрономического времени.

Модуль ON-функций на рис. 1.3, предназначенный для решения информационных, расчетно-оптимизационных задач реального времени и оперативного управления, создается на базе двух супермини-ЭВМ, объединенных в малую локальную вычислительную сеть типа VAX-кластер.

Основная особенность VAX-кластера — возможность совместного использования дисковой памяти и механизмов очередей к ресурсам системы всеми узлами кластера.

Именно возможность свободного разделения ресурсов на общие и местные в рамках единой системы обработки данных и управления процессами отличает VAX-кластеры от мультипроцессорных систем с жесткими связями, с одной стороны, и от чисто сетевых архитектур — с другой.

Важным достоинством VAX-кластеров является возможность создания распределенной файловой системы, которая позволяет любому процессору кластера использовать дисковое пространство того или иного накопителя независимо от того, связан этот накопитель с процессором непосредственно или нет, т.е. любой локальный НМД средствами системы может быть сделан доступным для всего кластера, а все НМД, доступные кластеру в целом, есть виртуальные локальные НМД каждого отдельного узла. Распределенная файловая система и система управления данными организуют на уровне кластера доступ к НМД и данным, аналогичным тем, которые имеются для одиночной системы.

Технические средства OFF-функций (OFF-модуль) на рис. 1.3 используются в основном персоналом, не связанным с ведением текущего режима ЦЭС. Из этого следует, что как время доступа к данным, так и время получения ответа обычно не регламентируются и могут быть достаточно большими. Индивидуальный OFF-пользователь должен входить в состав множества других, связанных между собой пользователей и получать следующие услуги:

- электронная почта, т.е. возможность письменной передачи любому другому абоненту сети;
- электронный телефон, т.е. возможность ведения диалога с экрана дисплея;

— обмен файлами, т.е. чтение/запись файлов других абонентов в соответствии с кодами доступа;

— режим виртуального терминала, т.е. возможность работать с собственным терминалом с удаленной ЭВМ в составе сети.

Выполнение этих требований применительно к АСДУ ЦЭС возможно в том случае, если OFF-пользователь будет иметь доступ к средствам локально-региональной информационно-вычислительной сети. С точки зрения локальных сетей (ЛВС) наиболее распространенными являются ЛВС типа Ethernet (ISO 8802.8), ARCNET (ISO 8802.4) и Tokenring (ISO 8802.5). Все они обладают примерно одинаковыми функциональными возможностями, и выбор одной из них (например, Ethernet) в данном случае определяется в основном возможностями создания неоднородной сети с вероятностью подключения к ЛВС, в частности, на уровне Министерства энергетики Монголии.

Системотехническое программное обеспечение выполняет функции, которые являются общими для множества технологических задач, и по существу представляет собой интерфейс между технологическими программами и специалистом в той или иной проблемной области ЦЭС.

Иными словами системотехнологическое обеспечение (СМПО) адаптирует два нижних уровня (СТПО) — стандартное программное обеспечение и СПО — сетевое программное обеспечение к конкретным приложениям. Если СТПО и СПО оперируют с объектами, определяемыми спецификой вычислительного комплекса (файлы, процессоры, узлы и т.п.), то СМПО должно оперировать с объектами конкретного профессионального применения. С этой точки зрения, используя технологию OSI/ISO, можно полагать, что вычислительный комплекс оказывает некоторый набор технологических услуг оператору-технологу.

Под услугой понимаем запрос на выполнение некоторого расчета, любых информационных функций и т.д. Для реализации услуги могут быть задействованы несколько взаимосвязанных процессов и устройств. Поэтому одной из важнейших задач СМПО является обеспечение выполнения услуг.

Основные элементы СМПО:

1. *Диалоговая система.* Переводит описание услуги на ограниченно-профессиональном языке оператора в адекватное

описание на языке ЭВМ. Должна обеспечивать контроль запросов оператора и быть инвариантной к типу дисплея и ЭВМ.

Язык общения оператора с ЭВМ должен обеспечить такие способы запросов, как:

- режим функциональной клавиатуры;
- режим набора командной строки;
- режим "меню";
- режим электронной таблицы.

Диалоговая система должна оказывать дополнительные услуги в виде выдачи "подсказок".

2. Система подготовки экранных форм. Выполняет следующие функции:

- формирование документа произвольного размера и структуры на основе реквизитов описания документа;
- формирование документа списковой структуры;
- формирование графиков;
- размещение данных, вводимых через терминальные устройства в базе данных;

— ввод, подготовка, коррекция всей нормативно-справочной информации, необходимой для формирования системы в целом.

3. Система управления данными, которая позволяет использовать одни и те же глобальные переменные различными процессами без их дублирования, обеспечивает целостность и защиту данных. Система управления данными состоит из двух частей:

- система управления базой данных реального времени и ON-режима (СУБД-ON);
- система управления базой данных OFF-режима (СУБД-OFF).

СУБД-ON должна обеспечивать быстрый доступ к данным на чтение, запись, модификацию, но может обладать ограниченными сервисными возможностями. СУБД-OFF должна обеспечивать диалоговый доступ к данным, их модификацию и первоначальное задание. Требования к реактивности СУБД-OFF значительно ниже, нежели к СУБД-ON.

4. Система обработки телемеханической информации. Специфическая для оперативно-информационных комплексов АСДУ ЦЭС и предназначена для приема и обработки всей информации, поступающей в комплекс от устройства телемеханики. Система обработки ТИ, по существу, обеспечивает

первичной информацией все услуги оперативного управления и контроля текущего режима.

5. Система обеспечения надежности. Предназначена для оказания услуг в основном не технологическому персоналу, а эксплуатирующему вычислительный комплекс (ВК) в целом. Учитывая, что структура ВК может меняться от объекта к объекту, необходимо иметь специальные программные средства, которые бы поддерживали эти структуры.

Основным назначением системы является ведение журнала состояния оборудования ВК и реконфигурация комплекса технических средств и программного обеспечения при выходе из строя тех или иных его элементов.

Структурная схема системно-технологического программного обеспечения приведена на рис. 1.4.

Каждая из подсистем СМПО для взаимодействия с другими элементами комплекса обращается с помощью набора специальных макрокоманд в модуль доступа, в котором на основании данных запроса определяется тип исполнения — локальный (ЛД) или удаленный (УД) доступ. Если тип исполнения локальный, т.е. в данной вычислительной установке, то взаимодействие программ между собой осуществляется средствами СТПО. Если же требуется удаленное исполнение, то через соответствующий модуль УД, используя средства СПО, запрос будет поступать в удаленную установку, где с помощью средств СТПО уже этой удаленной установки запрос передается на исполнение. Возврат результатов будет осуществляться через другую подсистему СМПО.

Таким образом, структурно каждый элемент СМПО, участвующий во взаимодействии многих процессов, состоит из исполняющей части и модулей ЛД и УД.

Естественно, что каждый из этих модулей работает со своими структурами данных, обрабатывает свои протокольные объекты, имеет свои интерфейсы как с внешней средой, так и внутри подсистемы, но структурно все элементы обычно идентичны.

С точки зрения архитектуры каждый модуль СМПО состоит из двух частей: прикладного процесса и функциональной службы. Прикладной процесс обеспечивает выполнение всех сервисных услуг, которые необходимы пользователям СМПО, а функциональная служба, расположенная между прикладным процессом и сетевым (стандартным) программным обеспе-

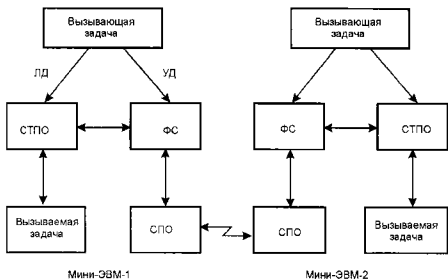


Рис. 1.4. Структурная схема СМПО (ФС-функциональная служба).

чением, выполняет функции пользователя сервиса, представляемого СПО (СТПО), и поставщика сервиса в удобной для прикладного процесса форме.

Поскольку каждый прикладной процесс (ПП) СМПО взаимодействует с множеством пользователей, целесообразно строить его (ПП) с точки зрения организации взаимодействия, ориентируясь на многослойную модель OSI, т.е. каждый прикладной процесс СМПО должен представлять собой, как минимум, систему из двух уровней (прикладной и представительный уровни), в которой прикладной уровень обеспечивает сервис для внешних пользователей, а представительный поддерживает "смысловой" протокол для взаимодействия прикладных процессов. Таким образом, именно представительный уровень прикладного процесса при принятом построении должен обеспечивать создание ассоциаций прикладных процессов для выполнения требуемых услуг.

На рис. 1.5 показан обобщенный алгоритм функционирования программного обеспечения (ПО) комплекса АСДУ ЦЭС в целом, который будет состоять из трех ветвей. Первая — ветвь обработки телемеханической информации. Основными ее функциями являются прием, первичная обработка, масштабирование, дополнительный расчет псевдоизмерений,

контроль параметров режима и т.п. Обработка носит распределенный характер. Результатом обработки будет получение текущих значений ТИ и ТС в базе данных реального времени.

Вторая — ветвь выполнения циклических функций ON-режима. Цикл выполнения примерно от 10 с и выше, а выполняемые функции зависят от объекта и включают в себя такие задачи, как архивирование ТИ, малые диспетчерские задачи, формирование схемы по данным телеизмерений, оценка состояния, оперативный прогноз электропотребления с учреждением от одного до нескольких часов; оперативная коррекция (при необходимости) активной и реактивной мощности, сравнительный анализ фактических и плановых режимов, ведение диспетчерской ведомости и т.п.

Все эти функции будут выполняться в ON-модуле. Периодичность решения и состав ON-функции определяются вычислительными ресурсами ON-модуля и расширяются по мере необходимости.

Третья — ветвь спорадических диалоговых задач. К ним относятся все информационные задачи отображения диспетчерской информации (форма, список, схема, график), расчетные задачи краткосрочного планирования, формирование эквивалентных схем электрических сетей и эквивалентных энергетических характеристик, технико-экономические расчеты и др.

Эти задачи, как правило, будут выполняться на персональных ЭВМ, каждая из которых должна представлять собой автоматизированное рабочее место специалиста в определенной энергетической области.

Алгоритм решения диалоговых задач будет функционировать следующим образом.

Запрос на языке пользователя-оператора поступает в диалоговую систему и в зависимости от вида запроса выполняется в этом узле или через блок удаленного доступа поступает на обработку в указанную ЭВМ. Полученный результат в виде символов через систему отображения будет выводиться на устройство, указанное в запросе (по умолчанию терминал).

В процессе выполнения запроса оператор может вести дополнительный диалог с процессом-исполнителем по его инициативе. Обращение в процесс исполнения к удаленным данным осуществляется средствами СУБД, однако распределение СУБД требует значительных вычислительных ресурсов. В

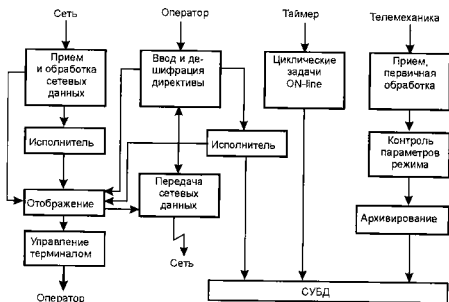


Рис 1.5. Обобщенный алгоритм функционирования.

ближайшие годы пользователи в основном персональных ЭВМ должны будут сами заботиться об обеспечении необходимой информацией своих задач с помощью доступа к удаленным файлам в составе СПО.

**Программно-вычислительные комплексы.** В Сибирском энергетическом институте (СЭИ) в рамках ОИУК разработаны ПВК, которые успешно внедряются во многих энергосистемах как основы АСДУ нового поколения [25]. С нашей точки зрения, эти программно-вычислительные комплексы могут быть успешно внедрены в ЦЭС Монголии в ближайшее время. Условно их можно разделить на четыре группы: "Информация" — ПВК "Расстановка ТМ-Д", "Оценка-РС", "Оптимизация" — ПВК СДО-6", "Надежность" — ПВК "Анарэс", "Динамика" — ПВК "ПАУ" и "Страус" [27—29].

Комплекс "Расстановка ТМ-Д" предназначен для синтеза системы сбора данных в АСДУ ЭЭС. Состав измерений, выбранный с помощью комплекса, обеспечивает [30]:

— наблюдаемость ЭЭС, т.е. возможность расчета режима по данным ТИ как в нормальных режимах работы, так и при различной степени неисправностях в системе сбора и передачи данных;

— минимизацию влияния погрешностей измерений на ошибки определения параметров режима;

— возможность обнаружения плохих данных как при априорном по отношению к оцениванию состояния, так и при апостериорном их анализе.

Комплекс программ оценивания состояния для анализа режимов ЭЭС на ПЭВМ ("Оценка РС") предназначен для получения расчетной модели текущего режима по ТИ и ТС, прошедшим проверку с помощью контрольных уравнений (КУ), и проведения имитационных расчетов на базе полученного режима [29].

Комплекс включает в себя решение следующих задач:

— анализ ошибок в задании пассивных параметров и топологии сети;

— верификацию обобщенных ТС по согласованию их показаний со значениями соответствующих ТИ;

— формирование КУ по измеренным параметрам, верификацию ТИ по анализу невязок КУ и определение их как достоверных, сомнительных, плохих и непроверенных; при этом в интерактивном режиме можно: исключить ошибочное ТИ, заменить на новое значение, вычисленное в программе, увеличить дисперсию;

— уточнение состояния обобщенных ТС с помощью КУ.

По желанию пользователя окончательное решение о состоянии линии принимается в интерактивном режиме:

— оценивание состояния ЭЭС с использованием КУ;

— идентификация дисперсий;

— оперативный анализ режимов, полученных в результате имитационных расчетов (отключение связей, изменение мощностей и т.д.).

ПВК для анализа режимов ЭЭС и управления ими (СДО-6) предназначен для решения задач, возникающих при исследовании, проектировании и эксплуатации ЭЭС [27].

ПВК моделирует действие и работу различных устройств управления режимами ЭЭС (регулирование напряжения, потоков реактивной мощности, противоаварийной автоматики), содержит достаточно полное математическое описание основных элементов ЭЭС (нагрузок, генераторов, линий постоянного и переменного тока, трансформаторов).

К основным функциям ПВК СДО-6 относятся:



— расчет установившегося режима (УР) ЭЭС при детерминированном характере информации с учетом и без учета изменения частоты;

— расчет допустимого УР;

— расчет оптимального УР: по потерям активной мощности в сети ЭЭС, по издержкам на выработку электроэнергии при детерминированном или вероятностном характере информации;

— расчет предельного УР при различных способах и критериях утяжеления, в том числе по заданному сечению;

— формирование эквивалента расчетной схемы ЭЭС, полученного при исключении заданного числа узлов;

— получение эквивалента расчетной схемы сети, адаптивного к заданным расчетным условиям (выделение фрагмента исходной расчетной схемы сети и определение функциональных характеристик отбрасываемой сети, включаемых в граничные узлы);

— расчет статической аperiodической устойчивости режима ЭЭС на основе анализа коэффициента характеристического уравнения.

ПК анализа режимной надежности электрических сетей и главных схем электрических соединений станций и подстанций (АНАРЭС) представляет собой промышленную разработку и предназначен для анализа режимной надежности реальных ЭЭС, с которыми имеет дело диспетчер, инженер службы режимов диспетчерского управления, а также инженер-проектировщик или исследователь-электроэнергетик [30].

Основные функции и составные части комплекса:

— расчеты и анализ нормальных и послеаварийных установившихся режимов ЭЭС переменного и постоянного тока с учетом статических характеристик нагрузок по напряжению и частоте, поперечного регулирования автотрансформаторов, коммутационных схем объектов;

— автоматическое и в интерактивном режиме моделирование одиночных и множественных отказов сетевого и подстанционного оборудования в нормальной и ремонтной схемах электрических сетей и распределительных устройств (РУ) электростанций и узловых подстанций с контролем допустимости параметров послеаварийного режима, анализом предельных режимов, моделированием ПА, вводом в допустимую

область, проведением оперативных переключений в схемах РУ объектов;

— вычисление показателей надежности электроснабжения узлов и системы в целом с дифференциацией по частоте, длительности и глубине нарушений электроснабжения;

— оптимизация потерь активной мощности в электрической сети с выбором управляющих воздействий по реактивной мощности генераторов, уровням напряжения и комплексным коэффициентам трансформации трансформаторов.

ПВК для анализа динамической устойчивости ЭЭС (ПАУ-3) представляет собой промышленную разработку. В нем реализована избыточность моделей различных элементов ЭЭС, позволяющая в зависимости от целей исследований находить компромисс между требованиями точности и быстродействия [26].

Синхронная машина моделируется с учетом демпферных контуров и регуляторов возбуждения сильного и пропорционального действия, а также упрощенно, путем принятия постоянства ЭДС за переходным сопротивлением. Теплотехническая часть электростанции моделируется подробно с учетом процессов в турбинах, трубопроводах, промперегревателях и нечувствительности различных элементов регулятора скорости, а также упрощенно одним уравнением парового обмена или без учета регулятора скорости. Нагрузка моделируется статическими характеристиками по напряжению, постоянной мощностью или шунтом.

Особенность ПВК — большие возможности при моделировании средств управления и ПА. Предусмотрены модели большинства существующих видов ПА, а также модели перспективных средств управления. Кроме традиционного моделирования ПА, заложена возможность пробного представления с учетом пусковых и измерительных органов, формируемых произвольно на основе структурного моделирования в виде комбинации типовых звеньев.

ПВК структурного анализа динамических свойств ЭЭС (СТРАУС) представляет собой опытно-промышленную разработку и предназначен для формализованного выбора расчетных условий и моделей, достаточных для комплексного анализа динамических свойств ЭЭС [25].

Основные функции комплекса:

— формализованное сокращение исходных, расчетных условий (схем, режимов, возмущений), определяющих динамиче-

скую устойчивость ЭЭС, путем группировки близких в силу принимаемых структурных динамических показателей расчетных условий в кластеры. При этом детальные исследования устойчивости будут необходимы не для всего множества расчетных условий, а для единичного представителя каждого кластера, так как характер переходного процесса и его последствия для других расчетных условий данного кластера аналогичны;

— выявление синфазных групп генераторов для их эквивалентного представления при детальных исследованиях устойчивости;

— выявление структурной неоднородности схем, определяющей динамические свойства ЭЭС; выявление "узких" с точки зрения устойчивости мест и сечений в схеме ЭЭС.

#### Этапы развития АСДУ ЦЭС Монголии.

На первом этапе могут решаться задачи, связанные с расчетом оптимальных режимов работы ЦЭС в цикле текущего краткосрочного и длительного управления в период работы ЦЭС в нормальном и переходном режимах. Реализация оптимального режима осуществляется с помощью ЭВМ и диспетчера. Большая часть информации, циркулирующей между различными уровнями ЦЭС, будет передаваться автоматически. Практически на этом этапе закладываются основы автоматической информационной структуры системы управления.

На втором этапе ЭВМ системы управления должны не только автоматически получать и перерабатывать соответствующую информацию о режимах работы ЦЭС, но и обеспечивать автоматическое управление режимами. При этом предполагается установка управляющих ЭВМ на всех основных объектах ЦЭС.

На третьем этапе развития системы управления все функции получения информации, ее переработки и выдачи большинства управляющих команд переходят к ЭВМ; за оперативным персоналом остаются функции разработки и задания программ расчета, контроля за правильной работой элементов автоматики и выдачи команд, не предусмотренных действующими алгоритмами управления. На этом этапе решаются все задачи управления при нормальном, аварийном и послеаварийном режимах работы ЦЭС.

#### 1.4. Сравнение централизованного и рыночного механизмов взаимодействия электроэнергетических систем в объединении

Рынок предполагает не только новые механизмы товарного и финансового обмена, но и новые *принципы информационного обмена* в процессе производства и распределения электроэнергии, а также в процессе ценообразования. Электроэнергетика всегда тяготеет к монопольному сценарию производства с ориентацией всей информационно-управленческой структуры на этот сценарий. Ниже, следуя [31], делается попытка на самых примитивных примерах показать степень устойчивости процесса управления при возможных и даже неизбежных изменениях текущей информации в циклах управления для централизованного и децентрализованного (рыночного) управления. Представляется, что именно адекватность управляющих воздействий текущей информации определяет эффективность и предпочтительность той или иной структуры управления.

Сначала рассмотрим сценарий единого централизованного управления параллельной работой двух электроэнергетических систем (ЭЭС) (рис. 1.6).

Ежечасные затраты каждой ЭЭС на производство электроэнергии равны соответственно  $V_1(P_{r1})$  и  $V_2(P_{r2})$ , где

$$P_{r1} = P_{n1} + P_{12}; \quad (1.1)$$

$$P_{r2} = P_{n2} - P_{12} \quad (1.2)$$

— генерируемые мощности;  $P_{n1}$  и  $P_{n2}$  — нагрузки каждой ЭЭС;  $P_{12}$  — переток из ЭЭС-1 в ЭЭС-2.

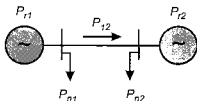
При заданных нагрузках  $P_{n1}$  и  $P_{n2}$  "центр" назначает переток  $P_{12}$ , задавая тем самым мощности и затраты каждой ЭЭС. Критерием выбора перетока для "центра" являются суммарные затраты

$$V_{\Sigma} = V_1 + V_2, \quad (1.3)$$

а оптимальное значение перетока при отсутствии ограничений-неравенств определяется из условия

$$\frac{\partial V_{\Sigma}}{\partial P_{12}} = \frac{\partial V_1}{\partial P_{12}} + \frac{\partial V_2}{\partial P_{12}} = \frac{\partial V_1}{\partial P_{r1}} \frac{\partial P_{r1}}{\partial P_{12}} + \frac{\partial V_2}{\partial P_{r2}} \frac{\partial P_{r2}}{\partial P_{12}} = \frac{\partial V_1}{\partial P_{r1}} - \frac{\partial V_2}{\partial P_{r2}} = 0, \quad (1.4)$$

Рис. 16. Схема взаимодействия.



так как из (1.1)  $\frac{\partial P_{r1}}{\partial P_{12}} = 1$ , а

из (1.2)  $\frac{\partial P_{r2}}{\partial P_{12}} = -1$ .

Условие (1.4) — известное правило равенства относительных приростов  $\frac{\partial B_1}{\partial P_{r1}}$  и  $\frac{\partial B_2}{\partial P_{r2}}$ .

Критериями управления для одной ЭЭС, например ЭЭС-1, будет поддержание заданного перетока, а для другой — заданной частоты, т.е.

$$L_1 = \min C_1 (\bar{P}_{12} - P_{12})^2; \quad (1.5)$$

$$L_2 = \min C_2 [\Delta f (P_{r1} + P_{r2} - P_{n1} - P_{n2})]^2, \quad (1.6)$$

где  $\Delta f$  ( $\Delta P$  — статическая характеристика системы по частоте:

$$\Delta f (\Delta P) \approx \frac{\partial \Delta f}{\partial \Delta P} \Delta P = k_f \Delta P, \quad (1.7)$$

$k_f$  — коэффициент статизма.

Разумеется, возможны и другие штрафные функции за отклонения от заданий "центра", но это не принципиально.

Фактически критерии (1.5) и (1.6) означают, что обе ЭЭС покрывают изменения "своих" нагрузок собственными силами без привлечения мощности "соседа".

Пусть в "центр" поступила искаженная информация о нагрузках  $\bar{P}_{n1}$  и  $\bar{P}_{n2}$  с ошибками  $\Delta P_{n1}$  и  $\Delta P_{n2}$  соответственно, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{n1} &= P_{n1} + \Delta P_{n1}; \\ \bar{P}_{n2} &= P_{n2} + \Delta P_{n2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Тогда "центр" принимает решение  $\bar{P}_{12}$ , которое будет отличаться от оптимального  $P_{12*}$ , и ущерб, который понесет вся система, будет составлять (рис. 1.7)

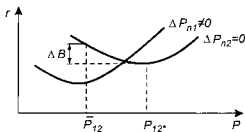


Рис 17 Ущерб  $\Delta B$  от ошибки  $\Delta P_{n1}$

$$\Delta B = B_1(\bar{P}_{n1} - \Delta P_{n1}, \bar{P}_{12}) - B_1(\bar{P}_{n1} - \Delta P_{n1}, P_{12*}) + B_2(\bar{P}_{n2} - \Delta P_{n2}, \bar{P}_{12}) - B_2(\bar{P}_{n2} - \Delta P_{n2}, P_{12*}). \quad (1.9)$$

Однако этот ущерб, скорее всего, никак не почувствуют ЭЭС-1 и ЭЭС-2, так как в их критерии управления (1.5) и (1.6) расход топлива не входит, если однозначно выбираются переток и частота. Соответственно ЭЭС не заинтересованы в передаче "центру" точной информации о нагрузках. Более того, с целью увеличения резерва ЭЭС будут завышать данные о нагрузках, передаваемые в "центр" (если "центр" не имеет собственных измерительных каналов). Аналогично, ЭЭС могут в этих целях завышать информацию о своих издержках на производство электроэнергии, т.е. расходные характеристики  $B_1(P_{r1})$  и  $B_2(P_{r2})$ , что особенно трудно проверить "центру".

Теперь рассмотрим рыночную ситуацию, когда ЭЭС-1 и ЭЭС-2 не прибегают к помощи "центра", а просто взаимодействуют как продавец (ЭЭС-1) и покупатель (ЭЭС-2) перетока  $P_{12}$  по цене  $C$ . Тогда критериями каждой ЭЭС при таком децентрализованном управлении будут соответственно:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= B_1(P_{n1} + P_{12}) - CP_{12}; \\ L_2 &= B_2(P_{n2} - P_{12}) + CP_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Для ЭЭС-1 наиболее выгоден переток  $P_{12}$ , получаемый с учетом (1.1) из условия

$$\frac{\partial L_1}{\partial P_{r1}} = \frac{\partial B_1}{\partial P_{r1}} - C = 0, \quad (1.11)$$

а для ЭЭС-2 — с учетом (1.2) из условия

$$\frac{\partial L_2}{\partial P_{r2}} = -\frac{\partial B_2}{\partial P_{r2}} + C = 0. \quad (1.12)$$

Отсюда также следует, что для каждой ЭЭС выгоден тот переток, при котором относительный прирост равен цене перетока.

Зависимости (1.11) и (1.12), по сути, представляют собой неявные зависимости  $P_{12}(C)$  для продавца и покупателя (рис. 1.8). Эти зависимости при фиксированной нагрузке с точностью до поворота на  $90^\circ$  повторяют для продавца характеристику относительных приростов, т.е.  $\frac{\partial B_2}{\partial P_{12}}$ , а для покупателя — зеркальное отражение относительно вертикальной оси

$$P_{12} = P_{n2} \text{ зависимости } P_{12} \left( \frac{\partial B_2}{\partial P_{12}} \right).$$

Поскольку электроэнергия — нескладируемый товар, работать обе ЭЭС будут при перетоке, полученном в точке пересечения кривых спроса и предложения, при цене перетока, равной значению одинакового для ЭЭС-1 и ЭЭС-2 относительного прироста. Отсюда опять вытекает равенство относительных приростов как условие, в котором уже заинтересованы обе ЭЭС. Заинтересованы они и в назначении оптимальной цены, равной этому общему относительному приросту (рис. 1.9). Продавцу невыгодно увеличивать цену, так как при этом снижение спроса на переток ликвидирует предполагаемое увеличение прибыли, невыгодно и уменьшать цену ниже оптимальной, так как увеличение спроса не компенсирует снижения прибыли. Покупателю невыгодно покупать переток больше оптимального, так как снижение издержек на собственную генерацию не компенсирует роста затрат на покупку; невыгодно и снижать объем покупки, так как при этом возрастание издержек на производство собственной мощности больше, чем экономия на покупке.

Рассмотрим теперь реакцию децентрализованного механизма на ошибки в исходной информации.

Пусть возникает (намеренно или случайно) ошибка в характеристике относительных приростов (ХОП) для ЭЭС-1, что приводит к увеличению объявленной цены перетока на  $\Delta C$ . Оптимальное значение перетока  $P_{12} - \Delta P_{12}$  будет определяться для покупателя ЭЭС-2 из соотношения (при квадратичной аппроксимации ХОП), определяющего рост собственной генерирующей мощности:

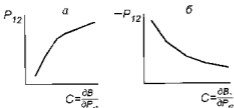


Рис. 1.8 Характеристики предложения (а) для ЭЭС-продавца и спроса (б) для ЭЭС-покупателя

$$\frac{\partial B_2}{\partial P_{12}} + \frac{\partial^2 B_2}{\partial P_{12}^2} \Delta P_{12} - (C + \Delta C) = 0. \quad (1.13)$$

Отсюда

$$\Delta C = \frac{\partial^2 B_2}{\partial P_{12}^2} \Delta P_{12}. \quad (1.14)$$

Но  $\Delta P_{12} = -\Delta P_{11}$ . Поэтому

$$\Delta C = -\frac{\partial^2 B_2}{\partial P_{12}^2} \Delta P_{11}. \quad (1.15)$$

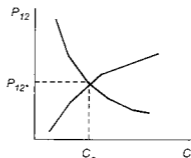
При  $\frac{\partial^2 B_2}{\partial P_{12}^2} = 0$ , т.е. при постоянном значении ХОП, ЭЭС-2 или покупает максимально возможный объем перетока (при  $\frac{\partial B_2}{\partial P_{12}} > C + \Delta C$ ) или вообще отказывается от покупки (при  $\frac{\partial B_2}{\partial P_{12}} < C + \Delta C$ ). Поэтому ниже рассмотрим ситуацию с  $\frac{\partial^2 B_2}{\partial P_{12}^2} \neq 0$ .

Изменение издержек ЭЭС-1 будет

$$\begin{aligned} \Delta B_1 &= [B_1(P_{11} - \Delta P_{12}) - (C + \Delta C)(P_{12} - \Delta P_{12})] - \\ &- [B_1(P_{11}) - CP_{12}] = \left[ B_1(P_{11}) - \frac{\partial B_1}{\partial P_{12}} \Delta P_{12} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B_1}{\partial P_{12}^2} \Delta P_{12}^2 - \right. \\ &- CP_{12} - \Delta CP_{12} + C\Delta P_{12} + \Delta C\Delta P_{12} \left. \right] - \\ &- [B_1(P_{11}) - CP_{12}] = -\frac{\partial B_1}{\partial P_{12}} \Delta P_{12} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B_1}{\partial P_{12}^2} \Delta P_{12}^2 - \end{aligned}$$



Рис. 1.9 Оптимальная цена  $C_*$  и перелом  $P_{12}$ .



$$\begin{aligned}
 & - \Delta C P_{12} + C \Delta P_{12} + \Delta C \Delta P_{12} = \\
 & = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B_2}{\partial P_{12}^2} \Delta P_{12}^2 - \Delta C P_{12} + \Delta C \Delta P_{12}. \quad (1.16)
 \end{aligned}$$

Подставляя из (1.15) значение  $\Delta C$ , получим

$$\Delta B_1 = + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B_1}{\partial P_{11}^2} \Delta P_{11}^2 + \left( \frac{\partial^2 B_2}{\partial P_{12}^2} \right) \Delta P_{12} (P_{12} - \Delta P_{12}). \quad (1.17)$$

Если  $\Delta P_{12} < P_{12}$ , что означает, что покупатель и продавец не меняются местами, то оба слагаемых положительны и вместо ожидавшейся прибыли происходит увеличение издержек.

Если возникает ошибка в определении нагрузки, например  $\Delta P_{11}$ , то это также равносильно мнимому увеличению издержек и приводит к такому же результату, что и завышение данных о ХОП.

Отсюда следует важный вывод: при рыночных взаимоотношениях партнеры должны быть заинтересованы в передаче друг другу точной информации и готовы затратить усилия на ее уточнение. Поэтому управления более адекватны текущей ситуации. Соответственно такой механизм более жизнеспособен и выгоден для общества, чем централизованное управление. Зарубежный опыт показывает, что ЭЭС стараются идентифицировать расходные характеристики своих электростанций  $B_i(P_i)$  по несколько раз в день, в то время как такие характеристики для российских электростанций уточняются в лучшем случае один-два раза в год (для лета и зимы).

Все больший интерес проявляется к введению цен реально-го времени, т.е. цен, изменяющихся в течение суток в соответствии с изменением нагрузок ЭЭС, что, конечно, значительно усложняет взаиморасчеты, но дает заметный экономический эффект [32].

Роль "центра" в условиях децентрализованного (рыночного) механизма может быть консультативной: он может на основе данных, добровольно передаваемых ему от каждой ЭЭС, рассчитывать оптимальные цены и перетоки и рекомендовать их ЭЭС. Именно назначение оптимальной цены отражает "справедливое" распределение общесистемного эффекта от оптимизации между отдельными ЭЭС и определяет заинтересованность каждой ЭЭС в общесистемном эффекте.

То же касается назначения оптимальных цен за общесистемные технические услуги отдельных ЭЭС в интересах всего объединения: поддержания избыточного по сравнению с собственными потребностями  $i$ -й ЭЭС объема резерва, настройки автоматики (в том числе объема отключений при работе системной автоматики отключения нагрузки), резерва реактивной мощности, поддержания параметров режима на уровнях, определяемых интересами соседних ЭЭС, и т.д.

Таким образом, показано на простом примере, что рыночный механизм взаимоотношений между ЭЭС в отличие от централизованного принципа управления заинтересовывает ЭЭС, участников рынка в обмене более точной информацией, для выработки управляющих воздействий, адекватных текущей информации.

Роль "центра" должна быть консультативной и сводиться к выработке рекомендаций для отдельных ЭЭС на основе информации, добровольно поступающей от этих ЭЭС.

### **1.5. Формирование решений для персонала электростанций: психологические аспекты**

При постановке задачи создания системы поддержки принятия решений (СППР) следует попытаться понять, каков механизм формирования решений человеком, для которого, собственно, и предназначается СППР.

Функция принятия решений является, возможно, одной из основных функций человеческого мозга, во всяком случае в той его части, которая связана с сознанием.

Предназначением сознания, по-видимому, можно считать наиболее полную реализацию основополагающего принципа существования мира — принципа "свободы выбора" (известная в философии проблема "противоречия противоположностей"), т.е. реализацию "осознанной" свободы выбора или иначе, реализацию "осознанной воли" [33].

В активном состоянии наше сознание непрерывно занято разрешением альтернатив, и этот процесс ничем не может быть прерван, даже усилием воли (мы можем лишь перевести сознание из активного состояния в пассивное, войдя, например, в известное состояние "транса").

Опыт анализа процесса принятия решений квалифицированными специалистами при создании экспертных систем приводит к предположению, что сознание реализует в основном два главных этапа выбора: начальный — выбор цели и конечный — разрешение альтернатив. Выбор цели адекватен постановке задачи, а разрешение альтернатив, по сути, сводится к выбору оптимального пути достижения цели и в конечном счете к выбору действия, поступка, решения.

Мы не знаем, откуда и каким образом, особенно в экстремальных условиях, в сознание поступает и "прокручивается" в нем огромный массив упорядоченной информации, обеспечивающей аргументацию того или иного альтернативного решения. Полагают, что задача отбора и доставки такой информации решается подсознанием, которое с точки зрения рассматриваемой проблемы может считаться интеллектуальным банком данных неограниченного объема с бесконечно малым временем доступа. Формализация процесса передачи информации от подсознания к сознанию является одной из задач приобретения знаний у эксперта и связана с определенными трудностями психологического характера [34].

Способность индивидуального сознания получать от подсознания необходимую для разрешения альтернатив информацию по начальному импульсу от сознания (задание цели!) определяет уровень интеллекта, если понимать его в классическом смысле как способность человека выявлять причинно-следственные связи.

Как правило, в сознании эксперта как бы "ниоткуда" возникают все новые и новые альтернативы с иными классификационными признаками и соответствующей аргументацией. Это позволяет сознанию рассматривать различные пути достижения цели и сравнивать их между собой по различным критериям оптимальности. При этом для реализации функции выбора решения необходимо, очевидно, иметь шкалу ценностей критериев оптимальности решений, которая определяет уровень этического (духовного) развития конкретного индивидуума, независимо от категории решаемой задачи — моральной, технической или иной.

Таким образом, можно прийти к некоторой условной схеме принятия решения человеком-экспертом (СПРЭ, рис. 1.10) с разделенными специфическими функциями сознания и подсознания.

Функции сознания (выбор цели, формирование иерархии критериев оптимальности, сравнение альтернатив и выбор решения) могут быть в достаточной мере формализованы как логические процедуры, выполняемые экспертом и не связанные с конкретным содержанием решаемой задачи.

Функции подсознания, связанные с информационным обеспечением сознания, наоборот, в общем виде формализованы быть не могут ввиду недоступности для нашего сознания механизма их реализации. Поэтому для функций целевого (интеллектуального) отбора информации, связи с информационным полем (что такое информационное поле? какова его структура?), формирования альтернатив и их аргументации возможны, видимо, лишь частные модели, пригодные для решения конкретных (возможно, типовых) задач и отражающие уровень накопленных знаний, интеллектуального и этического развития разработчиков.

Применительно к проблеме создания СППР из вышеизложенного можно сделать некоторые общие выводы.

1. Невозможно создать универсальную СППР для любых типов задач.
2. Разработки целевых СППР следует вести для точно сформулированных задач, близких по постановке и имеющих достаточное информационное обеспечение.
3. Существенное внимание при разработке СППР следует уделить интеллектуальной информационной системе, направленной на моделирование специфических функций подсоз-



Рис. 1.10. Условная схема принятия решения экспертом (СПРЭ).

нения применительно к данной конкретной задаче: организацию целевого информационного массива, формирование банка альтернативных предварительных решений и их аргументацию.

Ниже излагается попытка автора использовать указанные соображения при создании модели СППР для персонала электростанции.

**Структура СППР для персонала электростанции.** Функции сознания и подсознания, отраженные на схеме принятия решения экспертом (рис. 1.10), могут быть определенным образом сгруппированы и каждая группа приведена в соответствие некоторому функциональному блоку СППР, моделирующему эти функции. Возможный вариант такого соответствия приведен на рис. 1.11.

СППР представляется в виде четырех иерархически связанных подсистем:

- подсистемы первичной информации, необходимой для выбора конкретной цели и обеспечения принятия любого из совокупности возможных решений для всего рассматриваемого класса целей;

- подсистемы выбора информации, ответственной за оптимизацию объема данных, связанных с выбранной целью и

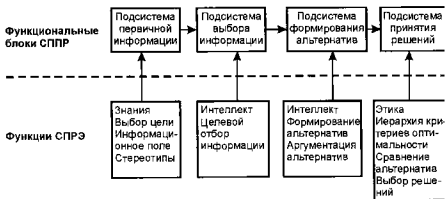


Рис. 1.11. Функциональная связь СППР и СПРЭ.

соответствующей этой цели совокупностью возможных решений;

— подсистемы формирования альтернатив и их аргументации, отражающей в конечном счете уровень интеллекта разработчиков;

— подсистемы принятия решений, осуществляющей процедуру сравнения альтернатив на основе имеющейся шкалы ценностей и определяющей действие, поступок субъекта соответствии с особенностями его индивидуальной этики.

Применительно к СППР для персонала электростанций в общем виде можно сформулировать две главные цели: 1) управление основным оборудованием для наиболее точного выполнения требований энергосистемы и наименьшего ущерба в штатных ситуациях и 2) обслуживание оборудования и систем его обеспечения для поддержания объекта в работоспособном состоянии.

В соответствии с этими задачами СППР должна быть рассчитана на два типа пользователей: для оперативных решений — на дежурного инженера, для неоперативных — на главного инженера и начальников цехов. Однако, поскольку речь идет об управлении и обслуживании одного и того же оборудования, оба вида решений идеологически связаны между собой: управление объектом должно осуществляться с учетом его технического состояния, а поддержание объекта работоспособном состоянии требует организации обслуживания с учетом различных аспектов управления (режимных экономических и т.п.).

В свою очередь, это означает, что два информационных канала по подготовке данных для принятия соответственно оперативных и неоперативных решений могут быть функционально независимы и связаны лишь на верхнем иерархическом уровне, т.е. в подсистеме принятия решений.

Следует, видимо, отметить, что любая сложная система может быть структурирована множеством способов в зависимости от принимаемых классификационных признаков (функции элементов, технология исполнения, информационные потоки, средства передачи информации и т.д.). Каждая структура может принципиально отличаться от другой и рассматриваться отдельно, т.е. считаться условно независимой.

Основной структурой автор считает функциональную, поэтому ей и уделяется больше внимания.

Для обеспечения функции принятия оперативных решений на электростанциях существует автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП), тогда как организованный информационный канал поддержки принятия неоперативных решений практически отсутствует. Функции последнего могут быть возложены на интеллектуальную информационно-диагностическую систему (ИИДС), разработка которой является одной из актуальных текущих задач.

Функциональная структура СППР электростанции соответствует общей структуре СППР, указанной на рис. 1.1, и приведена на рис. 1.12.

Это четырехуровневая модульная структура, на верхнем уровне которой находится интеллектуальный модуль СППР (ИМ СППР), обеспечивающий информационную поддержку принятия решений оперативным и обслуживающим персоналом и объединяющий два функциональных модуля второго уровня — АСУ ТП и ИИДС.

Структура АСУ ТП принципиально представляется состоящей из двух функциональных модулей третьего уровня: собственно АСУ и информационно-измерительной системы технологических параметров (ИИС ТП).

Соответственно на четвертом уровне АСУ ТП выделяются функциональные модули измерений, сбора, обработки и передачи данных для ИИС ТП и модули контроля, защиты и автоматики для АСУ.

Структура ИИДС состоит из трех функциональных модулей третьего уровня: интегрированной экспертной системы диаг-

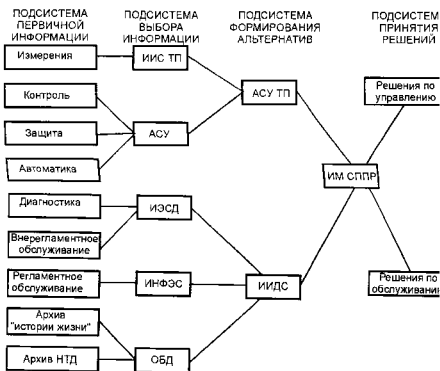


Рис. 1.12 Функциональная структура СППР электростанции.

ностики ИЭСД, информационной экспертной системы ИНФЭ и общестанционной базы данных ОБД.

ИЭСД выполняет функции диагностирования и выработку соответствующих диагнозов рекомендаций по внеплановому обслуживанию объекта.

ИНФЭС решает конкретные задачи регламентного технического обслуживания: планирование ремонтов, анализ результатов текущих регламентных работ и т.п.

ОБД включает в себя две функционально независимые базы данных: архив "истории жизни" оборудования и архив нормативно-технической документации.

Все функциональные модули СППР имеют между собой сложные информационные и программно-вычислительные связи, некоторые из них рассмотрены ниже.

**Практическая реализация концепции СППР.** Изложенная концепция принята к поэтапной реализации на Загорской ГАЭС где в последние годы ведется активная работа по созданию



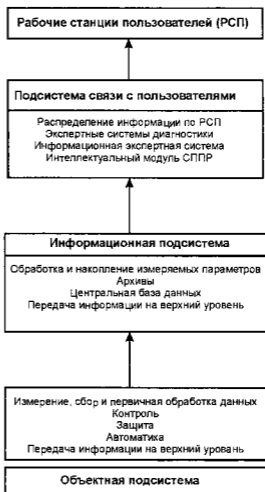
Рис 1.13 Технологическая структура СППР электро станции.

современной АСУ ТП и формированию общестанционной информационнои сети, включая технологическую базу данных и экспертные системы диагностики оборудования [35].

Технологическая структура СППР Загорской ГАЭС естественно привязывается к аппаратно-вычислительному комплексу формируемой АСУ ТП и представляется в виде четырехуровневой системы, состоящей из следующих подсистем (в терминологии [35]): объектной, информационной, подсистемы связи с пользователями и рабочих станций пользователей (рис. 1.13).

Объектная подсистема объединяет всю контрольно-измерительную аппаратуру, устройства связи с объектами (процессоры-контроллеры), локальные производственные сети и обеспечивает работу функциональных модулей "Измерения", "Контроль", "Защита" и "Автоматика" подсистемы первичной информации, указанной на рис. 1.12.

Информационная подсистема технологической структуры СППР представляет собой локальную вычислительную сеть, объединяющую концентраторы информации и файл-серверы, и обеспечивает обработку и накопление измеряемых техноло-



гических параметров, а также работу функциональных модулей "Архив историй жизни" и "Архив НТД" (рис. 1.12).

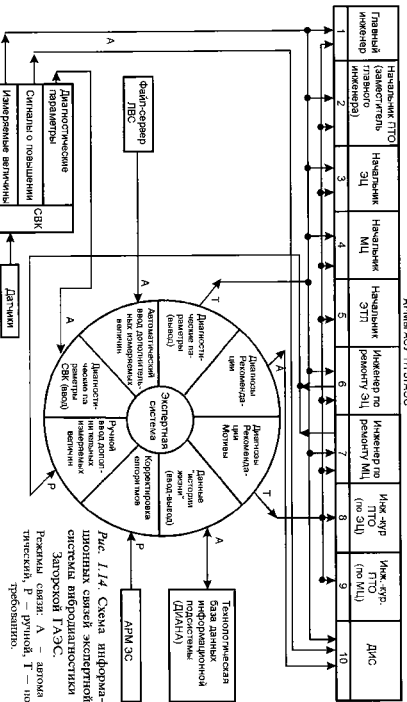
Подсистема связи с пользователями состоит из локальных сетей Arcnet и Ethernet, файл-сервера и каналов прямой и модемной связи с удаленными внешними рабочими станциями. Подсистема обеспечивает работу функциональных модулей "Диагностика", "Внерегламентное обслуживание", "Регламентное обслуживание" и соответственно модулей более высокого уровня: интегрированной экспертной системы диагностики ИЭСД, информационной экспертной системы ИНФЭС, интеллектуальной информационно-диагностической системы ИИДС и интеллектуального модуля ИМ СППР, завершая общий цикл выработки решений в виде рекомендаций по управлению и обслуживанию оборудования.

Вся информация, имеющаяся в СППР на всех уровнях, включая конечные рекомендации, распределяется по рабочим станциям пользователей в соответствии с правилами, утвержденными главным инженером электростанции. Правила определяют объемы информации на каждом рабочем месте и возможность доступа к программным модулям СППР.

На рис. 1.14 в качестве примера приведена схема информационных связей экспертной системы вибродиагностики ВИБРЭКС гидроагрегатов Загорской ГАЭС с автоматизированными рабочими местами пользователей, в числе которых:

- 1) главный инженер,
- 2) начальник ПТО — заместитель главного инженера,
- 3) начальник электроцеха (ЭЦ),
- 4) начальник машинного цеха (МЦ),
- 5) начальник электротехнической лаборатории (ЭТЛ),
- 6) инженер по ремонту ЭЦ,
- 7) инженер по ремонту МЦ,
- 8) инженер-куратор ПТО по ЭЦ,
- 9) инженер-куратор ПТО по МЦ,
- 10) дежурный инженер станции (ДИС).

Источниками первичной информации для экспертной системы ВИБРЭКС являются система вибрационного контроля СВК, файл-сервер ЛВС и технологическая общестанционная база данных ОБД (комплекс ДИАНА). На рисунке показаны виды информации, направления информационных потоков и режимы связи.



**Рис. 1.14.** Схема информационной связей экспертной системы вибродиагностики Затворской ГАЗС.

Выше был сделан вывод о невозможности создания универсальной СППР для задач различного типа. Это также следует из того, что функциональная структура СППР (рис. 1.12) определяется в первую очередь набором специфических функциональных модулей подсистемы первичной информации. От точности формулировки технологических задач модулей нижнего уровня зависит не только общая функциональная структура СППР, но и выбор путей реализации каждого модуля СППР в целом, а также конкретное практическое решение всего аппаратного и программно-вычислительного комплекса СППР.

Так, специфика задачи оперативной оценки вибрационного состояния лобовых частей обмотки статора гидрогенератора определила достаточно общую структуру логического вывода экспертной системы диагностики для объектов с недостаточной статистикой отказов и повреждений, но имеющих большой объем ретроспективной информации о регламентном обслуживании [36]. На рис. 1.15 приведена соответствующая блок-схема, которая, однако, может оказаться совершенно неприемлемой для объектов (задач) другого типа, где возможно, например, использование байесовских соотношений.

Аналогична ситуация и с выбором структуры и программных средств баз данных. Большое количество разработок в этом направлении позволяет выбрать в каждом конкретном случае наиболее подходящую оболочку и на ее основе сформировать необходимую базу данных, отвечающую требованиям соответствующих первичных функциональных модулей СППР. В частности, для Загорской ГАЭС после обсуждения с персоналом станции была принята многоуровневая матричная структура общестанционной базы данных ОБД, реализуемая на программном комплексе ДИАНА. Главная матрица верхнего уровня имеет вид, приведенный на рис. 1.16. Активные точки матрицы, помеченные знаком плюс, означают обращение к матрицам следующего уровня или к соответствующим информационным бланкам. Перечень оборудования и систем его обеспечения, данные, подлежащие хранению и анализу, утверждены главным инженером, а состав матриц более низкого уровня и формуляры выходных бланков разрабатываются совместно с эксплуатационным персоналом ЗГАЭС.

Для задач другого типа структура базы данных может быть совершенно иной.

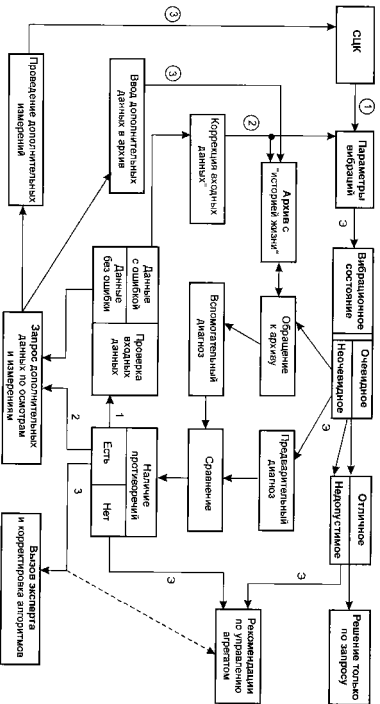


Рис. 1.15. Блок-схема логического вывода экспертной системы "ВИБРАКС".  
 9 — эвристические алгоритмы ("правила"), СЛК — система централизованного контроля.

Вид данных	Т	Г	РУ 15	ТС	ВВ 500	СВГ	СРЧ	СТВ	СТА	СВС	СПЖ	СУА	СЗА	СМА	СОВ	КУ	МНУ
Паспорта	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ремонты	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Измерения	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+		+	+
Контроль	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				+		+	+
Отказы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Дефекты	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Оценка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Структура	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ИНФС	+	+		+	+												

Рис. 1.16. М1: Главная матрица ОБД Загорской ГАЭС.

Т — турбина насос, Г — генератор двигатель, РУ 15 — основное оборудование РУ 15 75 кВ, ТС — трансформаторы силовые 15.75/500 кВ, ВВ 500 — выключатели 500 кВ, СВГ — система возбуждения генератора, СРЧ — система регулирования частоты вращения, СТВ — система технического возбуждения, СТА — система торможения агрегата, СВС — система воздухообеспечения, СПЖ — система пожаротушения, СУА — система управления и автоматизации агрегата, СЗА — система защит агрегата, СМА — система маслоснабжения агрегата, СОВ — система откачки воды с крышки турбины, КУ — компрессорные установки, МНУ — маслонепорная установка МНУ-40.

Таким образом, первые же проработки для Загорской ГАЭС выявили чрезвычайную сложность создания СППР как в методологическом, так и в чисто практическом отношении.

Таким образом, создание эффективной СППР для персонала электростанции потребует уточнения функций АСУ ТП, разработки новых интеллектуальных модулей информационно-диагностической системы, а также интеллектуального модуля верхнего уровня (ИМ СППР, рис. 1.12), что в свою очередь, невозможно без концептуального решения об общей структуре СППР и без методологической проработки структуры ее функциональных блоков (рис. 1.11).

Изложенное приводит к выводу, что при создании СППР необходимо учитывать следующие основные моменты:

- необходимость разработки общей методологии построения СППР с учетом функциональной специфики сознания и подсознания человека;

- существенную зависимость структуры конкретной СППР от четкости определения конечной цели и технологических задач функциональных модулей нижнего уровня;

- целесообразность разработки различных, в том числе альтернативных, моделей функциональных модулей СППР для задач различных типов;
- необходимость учета профессионального портрета конечного пользователя СППР, т.е. уровня его знаний, интеллекта и этики.

## Глава 2

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ЗНАНИЯХ, ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СППР В ЭНЕРГЕТИКЕ

### 2.1. Создание экспертных систем для управления плохоформализуемыми технологическими процессами

В этом разделе ставятся и обсуждаются некоторые вопросы методологии создания экспертных систем для диагностики и управления течением плохоформализуемых технологических процессов, а также вопросы, связанные с проектированием инструментальных средств для разработки конкретных экспертных систем технологического предназначения.

**Предпосылки.** Исходная посылка, которая лежит в основе анализируемых ниже методологических принципов, состоит в том, что, моделируя сложный технологический процесс с всеми отклонениями от нормального течения и сталкиваясь с недостаточной выразительностью численных моделей, приходится дополнять их логико-лингвистическими моделями, создавая на их основе экспертные системы (ЭксСи), играющие роль средств поддержки принятия решений. Тогда диспетчер как лицо, принимающее решения (ЛПР), со средствами поддержки принятия решений в форме ЭксСи, с одной стороны и технологический процесс как управляемый объект — с другой, образуют систему логического управления (СЛУ). Свойства систем управления такого класса, насколько известно автору, исследованы недостаточно. Однако, придерживаясь определенной методологии при создании инструментальной базы ЭксСи, можно подойти к формализации и строгому исследованию свойств указанных систем логического управления. Некоторые результаты названных исследований можно найти в [1, 2]. Здесь же будет дана общая характеристика методологических принципов, использование которых при создании ЭксСи наделяет образуемую с ее помощью систему логического управления прогнозируемыми свойствами, знаниями



которых может способствовать успеху в деятельности как проектировщиков, так и технологов.

Сейчас мы переживаем время, когда имеющиеся логико-математические методы и технические средства позволяют вплотную подойти к созданию экспертных систем для технологических целей, дополнив ими программные вычислительные комплексы и пакеты прикладных программ, созданные на этапе всеобщей АСУтизации промышленных предприятий. Эта задача особенно актуальна в отношении тех технологических процессов, для которых не удастся сформулировать строгие численные модели. Такие процессы ниже будем называть трудноформализуемыми. Наиболее характерны среди них процессы, порождаемые нештатными производственными ситуациями, возникающими вследствие серьезных технологических отклонений, в результате аварий, стихийных бедствий, несанкционированных действий персонала и т.п.

Несмотря на то что в прогрессивных кругах за рубежом экспертные системы делают не первые шаги в технологической практике, а в нашем отечестве тоже ведутся работы по созданию систем такого класса, правда, пока чаще на уровне исследовательских образцов, в мышлении инженера-проектировщика и инженера-технолога весьма силен психологический барьер, существенно осложняющий решение задачи массового проектирования и вторжения ЭкСи в технологическую практику. Но "процесс пошел". По крайней мере, наступила пора активных обсуждений методологических проблем означенной области, выявления возникающих здесь задач, вопросов, сомнений, сопоставления различных взглядов на способы их разрешения. Здесь представлена одна из возможных точек зрения на отдельные аспекты проблемы.

Естественно, что экспертная система для плохоформализуемых технологических процессов должна удовлетворять всем, ставшим уже типовыми, требованиям, предъявляемым к подобным системам, создаваемым в иных проблемных областях [3]. С точки зрения структурной — это наличие в ее составе устройств, обеспечивающих функции накопления и сохранения знаний, дедуктивного вывода, объяснения полученного результата, интерфейса с пользователем. Таких вопросов сейчас касаться, пожалуй, не следует. Однако специфичность рассматриваемой проблемной области и особенности решаемых нами задач не могут не отразиться на особенностях ЭкСи.

Исходная посылка, которая лежит в основе анализируемых ниже методологических принципов, состоит в том, что причины тяжелых технологических отклонений и их последствия рассматриваются как совокупный процесс, течением которого можно и нужно управлять, а ЛПР и аномальный технологический процесс — как система управления. В этой системе управление восстановлением технологического процесса или даже жизнеспособностью предприятия, испытывающего нештатные потрясения, становится возможным благодаря знанию как общих закономерностей течения аномального процесса, так и частных особенностей, обусловленных сопутствующими условиями. Совокупность знаний о классе аномальных процессов, облеченная в некую синтаксическую структуру, образует логико-лингвистическую (не количественную, а качественную) модель, описывающую множество состояний нештатного процесса и связи между ними. Логико-лингвистическая модель базируется на множестве лингвистических переменных, принимающих значения в множестве слов и фраз естественного (или близкого к нему) языка, связанных логическими отношениями.

Опираясь на эту модель и данные о текущем состоянии процесса как на посылки, можно вывести решение поставленной ЛПР одной из актуальных задач, относящихся к сфере его компетенции. Дополняя ее численными моделями данной прикладной области и программными средствами для операций с ними, можно значительно расширить функции ЭксСи, превратив ее в гибридную экспертную систему, но в нижеследующем контексте это не принципиально.

**Принцип единства трех задач.** Как свидетельствует опыт практической деятельности человека, процедура формирования управленческих решений в общем случае включает в себя совокупность следующих задач:

- диагностика текущего состояния объекта на базе имеющейся в распоряжении информации о его поведении;
- поиск альтернатив управления, способных перевести объект из текущего состояния в состояние, соответствующее поставленной цели;
- выбор единственной среди множества альтернатив с учетом прогнозируемой реакции объекта и установленного критерия качества управления.

Поэтому одним из главных методологических принципов создания ЭксСи является принцип единства трех задач: диагностики, прогнозирования и управления.

В самом деле, не зная текущего состояния технологического процесса, технолог не может назначить эффективные меры по восстановлению нормального его течения. Выбирая один из возможных вариантов восстанавливающих мероприятий, разумно опереться на прогнозируемые оценки вероятных последствий и т.п. Так, названные задачи, несмотря на свою относительную самостоятельность, находятся в неразрывной связи и взаимодействии: поиск управления невозможен без решения задачи диагностики, задача выбора из множества альтернатив опирается на задачу прогнозирования, решение которой, в свою очередь, требует решения задачи диагностики. Инструментальная поддержка этой связи — одна из отличительных особенностей предлагаемого подхода к синтезу экспертных систем.

К трем задачам примыкает и четвертая: построение информационной модели управляемого объекта. Она предполагает структурирование знаний о поведении управляемого объекта и их пополнение при накоплении опыта работы с системой, т.е. обучение системы на материалах своего или чужого прошлого, новых инженерных данных и соответствующих профилю технологического процесса научных дисциплин. Эта задача заслуживает особого рассмотрения, и к ней мы вернемся немного позже.

**Принцип динамичности логико-лингвистических моделей.** Источником динамических свойств рассматриваемых процессов является наличие свойственной промышленным технологическим установкам памяти на внешние воздействия. Состояния памяти, будучи зависимы от ретроспективы, оказывают влияние на последующие ответные реакции управляемой установки. Полагая, что последовательности событий, отражая свойственные восстанавливаемому технологическому процессу причинно-следственные отношения, играют существенную роль в определении его состояния как в момент первичного обнаружения нарушений, так и вслед за совокупностью восстанавливающих воздействий, за основу базы знаний ЭксСи следовало бы принять логико-лингвистические динамические модели. Логическая структура модели через лингвистические переменные (так здесь называются переменные, принимающие

значения на множестве слов и фраз естественного языка) даст возможность выразить взаимообусловленные связи между событиями, характеризующими течение аномального процесса. Динамические свойства позволят отслеживать траекторию движения процесса в пространстве качественно отличных друг от друга состояний, прогнозировать это движение и направлять его.

**Принцип обратимости логико-лингвистических моделей.** Чтобы избежать необходимости формирования множества функционально-целевых моделей, поддерживая принцип единства трех задач (диагностики, прогнозирования, управления — поиска последовательностей управляющих воздействий), динамическая логико-лингвистическая модель должна обладать свойством (квази)обратимости, т.е. давать возможность разным группам переменных играть роль то аргументов, то функций, с одной стороны, и из будущего смотреть в прошлое, равно как и из прошлого в будущее — с другой.

Принято считать, что основными способами представления знаний о проблемном мире в экспертных системах являются: фреймы, семантические сети, формально-логические модели, продукции [3]. Последние, опираясь на *modus ponens* (правило вывода дедуктивной системы, базирующейся на логике высказываний), предоставляют возможность наиболее естественного и конструктивного описания причинно-следственных связей проблемного мира, чем и завоевали популярность среди создателей ЭксСи. Однако, будучи единообразными синтаксически (ядро продукции  $X \rightarrow Y$  записывается обычно по схеме: ЕСЛИ  $X$  ТО  $Y$ , где  $X, Y$  — логические формулы, и интерпретируется так: "если выводимо  $X$ , то выводимо и  $Y$ "), продукции, относящиеся даже к одному проблемному миру, могут отличаться друг от друга не только семантически, но и прагматически. В самом деле, для продукции "ЕСЛИ  $X$  ТО  $Y$ "

— интерпретация "ЕСЛИ применить  $X$ , ТО следует ожидать результат  $Y$ " ассоциируется с актом решения задачи прогнозирования;

— интерпретация "ЕСЛИ имеет место  $X$ , ТО ситуация относится к классу  $Y$ " ассоциируется с актом решения задачи диагностики;

— интерпретация "ЕСЛИ требуется достичь  $X$ , ТО следует применить  $Y$ " — с актом решения задачи управления.

Таким образом, результат вывода в каждом случае используется по-разному, и это обстоятельство необходимо учитывать при создании продукционной модели для ЭксСи того или другого назначения. Для решения же комплекса из трех названных задач естественно желание иметь не три специализированных, а одну базовую модель, которую оперативно можно было бы привести к нужному в данный момент виду.

Нетрудно видеть, что процесс функционирования модели, описывающей поведение управляемого объекта, отвечает характеру задачи прогнозирования. Поскольку задачи диагностики и управления в определенном смысле обратны по отношению к задаче прогнозирования, можно полагать, что им адекватны модели, в этом же смысле обратные по отношению к модели поведения объекта. Тогда продукции одного типа должны быть обратимы для того, чтобы удовлетворять принципу единства трех задач, решаемых в одной системе. Этот подход по отношению к моделям, представляемым конечными автоматами, исследовался в работах [1, 2].

**Принцип структурированности модели.** Если располагаемые сведения о проблемном мире позволяют, то динамическая логико-лингвистическая модель должна быть составной по своей конструкции, чтобы быть обозримой для человека, доступимой для ЭВМ по размерам одновременно используемой оперативной памяти, дать возможность использовать информацию о структуре моделируемого объекта для повышения эффективности процесса вывода. Привычные для человека способы структуризации подсказывают целесообразность выделения моделей элементов системы с последующим описанием их взаимовлияния и взаимодействия, а также иерархического вложения, когда элемент вышележащего уровня строится как композиция элементов нижележащего уровня. Основанием для структурирования моделей технологических процессов может быть, например, выделение функциональных классов возможных подпроцессов, обособление физически разединенных подсистем или подсистем, локализованных во времени.

**Принцип учета неполноты информации и неоднозначности решений.** Неполнота имеющейся информации как в описании модели, так и в представлении исходных для решения задач данных — одна из важнейших характеристик наблюдаемого реального мира, к отображению которой должна быть способна экспертная система и к преодолению которой должны быть

готовы алгоритмические средства ее интеллектуального решателя. Следствия неполноты информации проявляются как недетерминированность модели и многовариантность решений, обуславливающие необходимость формирования и программной реализации какой-либо стратегии выбора в пространстве решений. Эти же следствия влечет за собой не только неполнота информации, но и природная некорректность таких задач, как диагностика и управление. Поэтому программное обеспечение, реализующее экспертную систему, должно давать возможность получения и предоставления в распоряжение пользователя некоторого множества вариантов решения такого рода задач для последующего анализа и выбора одного из них или формирования убеждения о необходимости сбора дополнительной информации. С другой стороны, не каждая синтаксическая структура логико-лингвистической модели оказывается работоспособной в условиях недостатка информации. Эти особенности необходимо учитывать еще на стадии эскизного проектирования ядра программного обеспечения ЭкСи, так как принимаемые, обычно так называемые временные упрощенные решения в дальнейшем не всегда могут быть адаптированы под возникшую, казалось бы неожиданно, проблему.

**Принцип адаптивности и обучаемости.** Динамическая логико-лингвистическая модель должна быть открытой, т.е. способной к приему новых сведений о закономерностях рассматриваемого класса взаимообусловленных последовательностей событий, к изменению на этой основе своих качественных и количественных характеристик. Способность к обновлению модели является необходимой предпосылкой для наделения системы управления в целом (имеется в виду комплекс: ЛПР — объект) свойствами адаптивности и обучаемости, улучшающими в итоге оценку качества управления. Однако простое дополнение одних сведений другими — старых новыми (как показывают, например, исследования автоматных моделей [1]) — не обеспечивает в полной мере названных свойств. Это дополнение должно сопровождаться анализом связи нового материала с тем, что уже зафиксировано моделью, и учетом в модели выявленных отношений. По результатам такого анализа возможно появление новых связей (отношений) на множестве прежних элементов модели или изменение ее количественных (весовых, вероятностных и т.д.) характеристик.

**Принцип сочетаемости моделей разного типа.** Существующие в реальном мире объекты и отношения между ними при знаковом моделировании отображаются на множества переменных и устанавливаемые между ними соответствия, адекватным образом представляющие поведение управляемого объекта. Типы используемых переменных и формы установления зависимостей между ними определяют то разнообразие возможных типов моделей, из которого проектировщикам ЭксСи приходится делать выбор. Каждый из типов имеет свои неоспоримые достоинства, но и сопряжен с теми или иными ограничениями.

Выбор типа логико-лингвистических моделей диктуется в основном двумя взаимосвязанными обстоятельствами: возможностью адекватного описания моделируемого класса объектов в классе выбираемых логико-лингвистических моделей и способностями располагаемого или проектируемого интеллектуального решателя, ориентированного на конкретный тип логико-лингвистических моделей, к решению стоящих перед ЭксСи задач. Однако первое из них формулируется настолько неопределенно, что однозначный выбор произвести не очень просто. Впрочем, рассудим так. Если остановиться на выборе семантических сетей или фреймов, то модели такого типа, предоставляющие достаточные возможности для описания характеристик текущих, прошлых или будущих ситуаций реального мира, не очень удобны при описании их динамических взаимосвязей. Так как технологические процессы характеризуются динамичностью связей между возможными физическими состояниями, то фреймовые или сетевые описания статических ситуаций целесообразно дополнить динамикой переходов, выраженных средствами, предоставляемыми семейством автоматов. Наиболее богатый язык в этом семействе, вообще говоря, реализует машина Тьюринга. Но так ли необходим наиболее сложный в этом семействе формальный аппарат, влекущий за собой соответствующее усложнение решателя ЭксСи, если множество моделируемых систем представимо, скажем, в классе более простых автоматов? Только вот точно неизвестно, каких: линейно ограниченных? магазинных? конечных? Для ответа на этот вопрос нужны "натурные" эксперименты, накопление опыта проектирования и использования моделей разного типа.

На первый взгляд, действительно, может показаться, что сведение основных задач технологических ЭксСи к задачам на

конечных автоматах, как самых простых из названного семейства, способных к представлению лишь множества регулярных событий, существенно ограничит их возможности, и следовало бы остановиться на автоматных моделях с более развитыми выразительными средствами. Категорически не возражая против такой точки зрения, отметим все же следующие обстоятельства. В данном контексте речь идет об управлении процессами, описание течения которых преломляется через мышление специалиста, стремящегося донести свои представления наиболее доступными и наглядными способами. Конечный автомат представляется в этом плане наиболее прозрачной синтаксической конструкцией, которая, будучи нагружена семантикой, может позволить с достаточной степенью адекватности отразить процессы рассматриваемого класса. Проблемы размерности, если таковые возникают, снимаются иными средствами, нежели применение более выразительных классических логико-лингвистических моделей. Неклассические модели, переводящие описание "разрывного" мира в "более линейное" формальное пространство и тем самым сокращающие отражаемое разнообразие, автору пока не известны, если не считать отдельных частных приемов на уровне эвристик, которые дают возможность взглянуть на объект с нетрадиционной точки зрения и которые как элементы искусства моделирования применимы и при синтезе конечно-автоматных моделей.

Анализируя языки для описания автоматных моделей, заметим, что набор альтернатив здесь достаточно велик и опираться на конкретные рекомендации вряд ли целесообразно, поскольку выбор в значительной мере может зависеть от субъективных обстоятельств. Тем не менее некоторые признаки, в соответствии с которыми можно было бы классифицировать варианты описаний, следовало бы назвать.

Один из них — это декларативный или процедурный, способ описания автоматной модели. Процедурный способ предполагает алгоритмическое представление моделирующих выражений в форме условных операторов на одном из языков программирования, например Фортран, Паскаль, Си, Ада. При декларативном способе создается единый алгоритмический механизм функционирования автоматной модели, персонификация которого под конкретный автомат осуществляется через набор определенным образом организованных данных (декларацию). Данные представляются на принятом в рамках систе-



мы моделирования языке, ориентированном на пользователя. Именно это делает декларативный стиль более предпочтительным для проблемных, как правило, не программирующих специалистов, способствуя сосредоточению их внимания на описании свойств и отношений моделируемой системы, а не на том, каким образом организовать обработку соответствующих им переменных. Заметим, кстати, что декларативный способ описания логико-лингвистических моделей характерен для такого языка, как Пролог, именно поэтому занимающего особое место в семье языков программирования. Хотя в полной мере текст программы на Прологе не свободен от элементов процедурного стиля и написание программы требует определенных навыков программирования, способ написания моделирующих выражений в форме предикатов и продукционных правил позволяет не думать о способах их реализации [4].

Другой признак — это явное или неявное описание каналов связи в композиции автоматных моделей. В первом случае четко обозначается структура композиции автоматов и тем определяется очередность их функционирования. Во втором — каналы связи выявляются в процессе функционирования композиции по именам связывающих инцидентные полюса активизируемых переменных. Первый случай характерен для синхронной композиции, второй — для асинхронной. Первый случай более эффективен с точки зрения затрат времени на передачу сообщений между элементами композиции и допускает неопределенность исходных данных, зато второй, не имея указанных свойств, не требует информации о структуре композиции автоматов.

Третий классификационный признак — синтаксическая структура "внутренней" автоматной модели. Речь идет не о той модели, что доступна пользователю, а о той, которая, будучи сформирована из первой, используется механизмом решателя для реализации процесса дедуктивного вывода. Для описания элементов композиции моделей может быть пригоден язык предикатов первого порядка, собственный язык автоматов, язык сетей Петри. Последний получил в минувшее десятилетие достаточно широкое распространение. Будучи созданным для описания асинхронных информационных процессов, этот язык приобрел популярность в логическом моделировании благодаря обеспечиваемой им адекватной интерпретации продукционных правил, простоте механизма синтеза составных и многоуровне-

вых моделей, минимальному уровню избыточности при описании причинно-следственных связей, достаточно большим числом степеней свободы при синтезе дополнительных синтаксических элементов, обогащающих выразительные способности моделей такого типа, и т.п. Язык логики предикатов первого порядка активно используется, например, интерпретатором Пролога для представления фраз Хорна, на основании которых решается проблема дедукции. Язык описания автоматов сводится к представлению функций переходов и выходов для множеств состояний основной и вспомогательной памяти.

С целью обогащения выразительных способностей логико-лингвистических моделей в ЭксСи не следует упускать возможности лингвистических переменных (и в этом одно из их существенных отличий от количественных переменных!) для обозначения классов, структурированных по тем или иным семантическим признакам, чтобы отразить разнообразие, взаимосвязь и взаимозависимость элементов технологического процесса. Ряд моделей нижнего уровня по совокупности количественных, качественных или структурных признаков, описывающих возможные ситуации в подсистемах технологического комплекса, могли бы разносить их по классам для последующего логического анализа. Здесь были бы полезны модели разного типа, с функциональной точки зрения осуществляющие логический вывод по правилу *modus ponens*, а с точки зрения конструктивной воплощающие в себе логико-математический механизм, адекватный структуре отражаемого данной моделью декларативного знания.

По сути, речь идет о том, что некоторое множество ситуаций, обладающее свойством "компактности" в определенном пространстве признаков, может быть отнесено к одному классу-образу (понятию) и обозначено неким значением, которое как лингвистическая переменная используется логико-лингвистической моделью при описании его связи с другими образами (понятиями). Подобные обобщения могут быть получены самыми различными способами в зависимости от характера обобщаемых явлений.

Если одним из главных критериев выбора языка внешнего представления модели являются его выразительные способности и возможность создания удобных для пользователя форм выражения знаний о моделируемом объекте, то выбор того или иного внутреннего представления модели определяет алгорит-

мическую структуру решателя и влияет на эффективность процесса дедуктивного вывода. Но эти свойства для пользователя ЭксСи остаются "вещью в себе", поскольку ориентированный на него язык внешнего представления логико-лингвистической модели отображается на внутренний язык не всегда однозначно, а сравнение по эффективности, как правило, недоступно. Так как оценки последствий того или иного выбора не очевидны, то они могут быть и противоречивы, и спорны.

**Принцип коммуникабельности.** Предполагает наличие средств, обеспечивающих возможность удобной связи ЛПР — ЭВМ и их независимость от области применения экспертной системы, будь то практическая работа начинающего стажера или опытного диспетчерского персонала, самостоятельная учебная работа ("тренаж"), накопление и использование собственного опыта или опыта ведущих специалистов. Доверительный контакт между ЛПР и ЭВМ важен психологически, так как обеспечивает комфортность рабочей атмосферы. Поэтому экспертная система должна допускать непосредственный уровень общения с ЛПР без посредников как на этапе решения практических задач, так и на этапе анализа имевших место ситуаций и дополнения новыми представлениями содержимого базы знаний. Необходимость обращения к посредникам (инженерам по знаниям), на взгляд автора, утяжеляет процесс работы с ЭксСи. При этом язык общения с ЭВМ, скорее всего, должен быть достаточно близким к естественному, чтобы быть понятным и служить средством коммуникации множества индивидуумов, но в то же время в определенной мере быть ограниченным, чтобы не перегружать ни эксперта, ни пользователя необходимостью ввода или чтения длинных фраз.

Синтез динамических логико-лингвистических моделей, наполняющих базу знаний, прежде всего процесс творческий, связанный с поиском, пробами, ошибками, переделками. Поэтому средства синтеза должны быть просты и удобны в пользовании, а формируемый с их помощью материал — обзорим и воспринимаем. Целесообразен блочный метод синтеза, когда сложное создается как композиция простых элементов и существует возможность проверки в действии и простого в отдельности, и сложного в комплексе с последующим устранением ошибок любого происхождения. Из приведенных соображений вытекает и принцип единства инструмен-

тальных средств, предназначенных для синтеза, с порожденной при их помощи собственно экспертной системой, а также необходимость взаимодействия названных подсистем в течение всего срока эксплуатации.

**Принцип развития.** Не специфичен и провозглашается при создании любого сколько-нибудь значимого программного продукта. Такой продукт существует некоторый период времени, рождаясь, развиваясь и умирая. Жизненный цикл продукта зависит не только от степени его актуальности, темпов развития информационной технологии и парка вычислительных машин, но и от внутренней структуры его ядра, определяющей возможности дополнения и видоизменения его функций. Когда ядро перестает быть способным поддерживать осуществление новых усовершенствований на основании тех идей, которые были выдвинуты еще на начальной стадии проектирования продукта и которые появились лишь в процессе эксплуатации текущей версии, тогда основанный на нем продукт обречен на умирание. Новое ядро — это уже другой продукт. Поэтому при создании ЭкСн важное значение имеет не только выбор исходных принципов, но и оценка возможностей их реализации по мере развития некоторой начальной программной версии.

**Путь реализации.** Материализация экспертной системы для решения задач диагностики, прогнозирования и управления технологическими процессами складывается из трех компонентов:

- описание логико-лингвистической модели рассматриваемого класса аномальных процессов;
- получение исходных данных и формулирование запроса на решение каждой конкретной задачи;
- наличие программного продукта, осуществляющего решение задачи на основе принятых формализаций и организующего совокупность элементов реализованной информационной технологии.

С точки зрения пользователя, третий компонент представляет собой "вещь в себе" и важен лишь своими внешними проявлениями, обеспечивающими выполнение им основных функций системы в целом. Первый и второй компоненты представляют профессиональный интерес и служат объектом пристального внимания со стороны технологического персонала — пользователя системы. Поэтому, обсуждая пути реа-

лизации рассмотренных принципов, начнем с разговора о средствах, которые могла бы предоставить система непосредственному пользователю.

Из известных автору экспертных систем и инструментальных средств для их создания [3] в большей мере сформулированным выше принципам отвечает находящаяся в настоящее время в стадии исследовательского проектирования инструментальная система (ИС) ДинЛоМо [5]. Обсудим с указанных позиций принятые при ее реализации решения.

В качестве языка для описания логико-лингвистической модели в ИС ДинЛоМо выбран язык продукционных отношений, построенный на множествах событий и состояний. Под событием понимается произвольное утверждение, которое в отдельные моменты времени может быть истинным. Например, "Напряжение в узлах ЭЭС около нормы", "Форсирование нагрузки ЭС", "Взятие аварийных перегрузов" и т.п. Под состояниями понимаются наименования отдельных существенных фаз развития технологического процесса, отличающихся друг от друга тем, что для них найдется хотя бы одно такое воздействие, реакция на которое для разных состояний различна. Например, одно и то же управляющее средство при повышенной или пониженной функции некой подсистемы может дать противоположный эффект. Продукционные отношения, описывающие связь между причинами и следствием, на этих элементах в общем виде выглядит следующим образом: "если имеют место состояние А и событие 1, и событие 2, и ... событие X, то следствием может быть состояние Б, сопровождаемое событием 5, событием 6, ... событием Y". Короче, без вспомогательных слов то же самое выглядит так: "состояние А, событие 1, событие 2, ..., событие X, состояние Б, событие 5, событие 6, ..., событие Y". Если один и тот же набор причин по неизвестным для создателя модели причинам может приводить к разным последствиям, то модель становится недетерминированной, и каждое из последствий следует упомянуть в правой части продукции.

Существуют приемы, позволяющие сократить, насколько возможно, составляемый текст. Так, если некий набор событий в описании совокупности причинно-следственных связей моделируемого процесса повторяется довольно часто, то его можно выписать полностью лишь однажды и, назвав этот набор подходящим именем, использовать затем в продукциях

само имя. Или, если описание события требует более трех — пяти слов, то такое событие тоже можно "окрестить" покороче, пользуясь в дальнейшем этим прозвищем и вызывая на экран полное описание по мере надобности.

Если описание технологического процесса ведется на уровне взаимодействующих подсистем промышленной системы, то модель каждой из них может быть оформлена как самостоятельное описание, а модель их совокупности получена как определенным образом структурированный набор таких описаний. Этот прием позволяет уменьшить объем полной модели, давая возможность использовать сочетания состояний подсистем вместо их перечисления в неструктурированной модели.

На языке тех же событий и состояний, что были взяты для описания причинно-следственных связей, описываются запросы к экспертной системе. Формы запроса для разных задач похожи друг на друга, но содержание существенно зависит от характера задачи.

При известном текущем состоянии процесса ЛПР может поставить две задачи: задачу прогнозирования и задачу назначения управляющих мероприятий. Для первой в запросе нужно будет указать имя текущего состояния и последовательность наборов тех воздействий (событий), реакцию на которые ЛПР хочет определить. Для второй задачи, кроме имени текущего состояния, следует указать набор имен тех событий, свершение которых рассматривается как цель управления. Результатом решения первой задачи явится последовательность наборов тех событий, которые ожидаются после применения заданной в запросе последовательности воздействий, а результатом второй — искомая совокупность мероприятий. Если решение той или другой задачи неоднозначно, то можно будет найти множество вариантов решения.

При неизвестном текущем состоянии процесса решению задач прогнозирования и поиска управляющих мероприятий должно предшествовать решение задачи диагностики. Для ее решения в запросе нужно указать известные сведения о событиях, имеющих место в текущий момент или происходивших в прошлом. Возможные варианты решения этой задачи, когда имеющейся информации недостаточно для однозначного ответа, предъявляются ЛПР для дополнительного анализа и принятия решения о выборе одного из вариантов или о сборе недостающих сведений.

Использованная при решении задачи диагностики информация и информация, полученная в процессе реализации управляющих воздействий, может служить для пополнения логико-лингвистической модели новыми сведениями или для корректировки ее количественных весовых характеристик, т.е. для адаптации и обучения.

Внутренняя, "техническая" сторона дела, недоступная пользователю, но обеспечивающая успешность его деятельности, состоит в следующем. Совокупность производственных отношений в ИС ДинЛоМо описывает закон функционирования конечного автомата или композиции конечных автоматов при задании структурированной модели. Запросом задаются ее начальное состояние и совокупность сигналов, подаваемая на ее входы. Характер задачи устанавливает тип решающих автоматов: прямые для решения задач прогнозирования и обратные для решения задач диагностики и поиска управляющих воздействий. Выходная реакция композиции прямых или обратных автоматов есть результат решения задачи. Все было бы очень просто, если бы не осложнения, вызываемые тем, что в общем случае ни прямые, ни обратные автоматы не являются детерминированными и полностью определенными автоматами, а исходная информация о состоянии управляемого процесса также неполностью определена. Эти обстоятельства заставляют принимать усложненные стратегии процесса поиска решения, не страдая в общем случае от того, что решение может быть неоднозначным или не найденным вовсе. Однако, как показано в [1, 2], причина того не в недостатках той или иной конкретной реализации ЭксСи, а в природных свойствах информационных процессов.

Средствами, позволяющими наделять ЭксСи дополнительными возможностями, могут послужить связанная с ней универсальная база численных данных и совокупность заказных программных модулей для качественного анализа ее содержимого применительно к конкретной проблемной области, в результате которого набор численных показателей преобразуется в значение лингвистической переменной. Основанием к тому служат рост количества полученных в результате научно-исследовательских работ материалов и инженерных наблюдений, на языке цифр описывающих более глубокие стороны физических или химических процессов, обеспечивающих данную технологию. Однако цель анализа числового материала

применительно к логико-лингвистическим моделям есть, как правило, формулирование выводов качественного характера, которые присоединяются к группе анализируемых параметров. Эту роль и выполняют перечисленные средства. Их значение возрастает еще более, когда сведения в базу данных поступают непосредственно от датчиков по внешним каналам связи в реальном масштабе времени.

Среди перспективных направлений совершенствования ЭкСи для решения задач диагностики и управления технологическими процессами можно было бы отметить: совершенствование языка общения с системой путем его последовательного приближения к языку, не ограниченному стандартными словами и заготовленными фразами, в идеале — к естественному разговорному языку; широкое использование графических образов — графиков, схем, рисунков, когнитивных образов и других мультимедийных средств, ассоциированных с анализируемым технологическим процессом.

## **2.2. Применение методов, основанных на знаниях, для моделирования гидравлических режимов каскадов водохранилищ**

При планировании и оперативном управлении режимами каскадов водохранилищ гидроэлектростанций (ГЭС) большое значение имеет учет явлений, связанных с неустановившимся движением воды в открытых руслах. Неустановившееся движение воды влияет на переменность напора ГЭС в течение суток, что сказывается на энергетической эффективности работы ГЭС. Кроме того, каскады ГЭС входят в состав водохозяйственных комплексов, удовлетворяя ограничениям неэнергетических водопользователей. Эти ограничения по уровням и расходам в нижнем и верхнем бьефах определяются условиями рыболовства, навигации и сельского хозяйства, условиями надежности гидросооружений, затопляемости территорий и т.д. Выполнение подобных требований при управлении режимами каскадов ГЭС должно осуществляться с учетом явлений неустановившегося движения воды. Особенно важен такой учет в части ограничений по нижнему бьефу — по уровням (минимальному и максимальному) и амплитудам уровней в створах гидроузлов и в удаленных контролируемых створах.



Для решения поставленной задачи на базе инструментального комплекса G2 [6—8] была разработана проблемно-ориентированная система поддержки оперативного управления гидравлическим режимом каскадов водохранилищ. Система позволяет создавать и использовать имитационные модели каскадов. Удобный графический интерфейс обеспечивает наглядное представление русла, гидроузлов и других компонентов модели. В системе реализован гидравлический расчет волнового перемещения масс воды по бьефам гидроузлов, что позволило учесть явления неустановившегося движения воды и повысить точность прогноза режима уровней воды у плотин гидроузлов в верхнем и нижнем бьефах при определении оптимального режима работы каскада. Ограничения на режим работы ГЭС, основанные на требованиях неэнергетических водопользователей, задаются в виде граничных условий по уровням либо расходам в створах гидроузлов. В рамках принятой модели естественное русло реки представляется в виде схематизированного русла, состоящего из отдельных призматических участков, называемых первичными и отличающихся друг от друга по таким характеристикам, как поперечное сечение, уклон дна, коэффициент шероховатости и т.д. Формализованная таким образом задача из-за низкой точности исходной гидрологической и гидравлической информации не обеспечивает необходимой точности результатов, поэтому для формирования решений необходим анализ банка данных по фактическим режимам, а также экспертные решения пользователей.

Рассматриваемая система позволяет работать с иерархическими описаниями каскадов. В описаниях верхнего уровня, представленных картами-схемами, указываются географические расположения водохранилищ и гидроузлов. На более детальном уровне задаются описания гидроузлов (справочная информация и архивные данные по уровням и расходам для каждого гидроузла) и водохранилищ (гидравлические и морфометрические характеристики первичных участков русла, а также расположение створов выборочной выдачи с архивными данными по расходам и уровням). На базе описания верхнего уровня формируются модели конкретных каскадов, в рамках которых и проводятся расчеты.

Разработчикам моделей система предоставляет следующие возможности:

— формировать и корректировать карты-схемы, содержащие информацию о географическом расположении водохранилищ и гидроузлов;

— просматривать, вводить и корректировать справочную информацию о характеристиках водохранилищ и гидроузлов;

— использовать в картах-схемах географические карты, подготовленные в виде графических файлов (формат GIF);

— формировать и корректировать данные о фрагментах русла — первичных участках — непосредственно на схематическом описании русла;

— формировать и корректировать данные о створах выборочной выдачи, а также подключать архивную информацию по расходам и уровням.

Работа с архивами предусматривает просмотр информации в виде таблиц, графиков и/или гистограмм.

Конечные пользователи имеют возможность:

— получать автоматически сформированные модели каскадов по картам-схемам (в каскад включаются гидроузлы и водохранилища, отмеченные пользователем на карте-схеме);

— вести архивы фактических данных по расходам и уровням (при этом поддерживается работа с данными по II кварталу — период половодья);

— задавать и использовать в расчетах как фактические, так и экспериментальные параметры русла;

— задавать и корректировать граничные и начальные условия расчетов;

— проводить оперативный расчет неустановившегося движения воды с определением уровней во всех первичных участках русла и автоматическим выявлением нарушений допустимых пределов по уровням;

— получать в модели фактическую информацию по уровням с автоматическим выявлением существенных отклонений от расчетных данных;

— проводить перерасчет с учетом полученных фактических данных и/или откорректированных граничных условий.

Рассмотрим подробнее основной режим использования системы — режим имитационного моделирования. В качестве примера на рис. 2.1 приведена модель каскада Нижне-Волжских ГЭС. В рабочее окно системы выводится автоматически сформированная схема русла участка реки с указанием створов (либо выборочной выдачи, либо первичных створов) и гидро-

6 мая 1996 2 дня

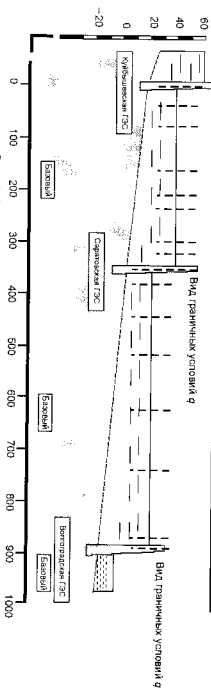
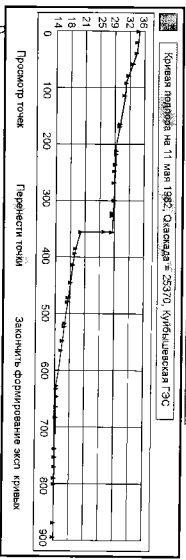


Рис. 2.1 Пример модели Нижне-Волжского каскада.

электростанций. Выбрав мышкой какой-либо из объектов модели, пользователь может просмотреть, ввести и/или откорректировать архивную информацию по фактическим режимам, подготовить исходные данные для расчета, а также ознакомиться с текущими результатами имитационного моделирования. На график выводится информация по уровням на протяжении моделируемого каскада.

При подготовке исходных данных для расчетной модели пользователь должен указать:

- начальную дату и период расчета в сутках;
- начальные расчетные условия и вид уровенных и расходных режимов по первичным участкам на начальный момент расчета (задаются в виде гистограмм, которые пользователь может корректировать с помощью мышки);
- допустимые пределы по уровням для контролируемых створов;
- граничные условия в виде расходов (для первой ГЭС каскада) и/или уровней (для остальных ГЭС);
- гидрограф зарегулированного притока периода половодья для первой ГЭС каскада.

Указав исходные данные, пользователь может запускать процедуру имитационного моделирования. Имитируется посуточный просчет режимов неустановившегося движения воды с заданным временным шагом (например, 3 с соответствуют 1 сут). Текущие результаты расчета для уровней отображаются на графике (рис. 2.1).

Кроме того, пользователь может просмотреть результаты расчетов по суткам для любого из створов выборочной выдачи как в графическом, так и в табличном виде.

В ходе расчета система контролирует соблюдение ограничений на уровни в створах выборочной выдачи. В случае нарушения ограничений система выделяет цветом изображение створа, для которого подобное нарушение имеет место, и выдает предупреждение. Пользователь имеет возможность остановить расчет, откорректировать исходные данные и повторить процедуру моделирования.

Получив расчетные результаты, пользователь может перейти в режим имитации поступления фактических данных. В этом режиме система имитирует ежесуточное поступление фактических данных и сравнивает поступающую информацию с результатами расчета. В случае отклонения расчетных данных

от фактических более чем на 15 % система выдает соответствующее предупреждение.

Низкая точность исходной гидрологической и гидравлической информации приводит к недостаточной точности результатов расчетов, и поэтому встает вопрос о настройке расчетной модели, т.е. построении уточненных характеристик участков русла исходя из анализа архива фактических данных и экспертных оценок пользователя.

В системе можно реализовать различные способы формирования экспериментальных характеристик. В текущей версии пользователь имеет возможность строить экспериментальные оценки зависимостей модулей расходов от глубин  $K_i(h)$  для первичных участков. При этом используется архивная информация о фактических расходах  $Q$  за те дни, когда имел место статический режим расходов: эти дни выявляются пользователем визуально по графикам для  $Q(t)$ . На каждый из выбранных дней известны значения уровней, измеренные для створов выборочной выдачи, исходя из которых линейной интерполяцией получают уровни (а следовательно, и глубины  $h_i$ ) для первичных участков. По расходу каскада, задаваемому пользователем, для каждого первичного участка можно определить модуль расхода  $K_i$ , соответствующий глубине  $h_i$ . Таким образом, для каждого дня строят экспериментальные точки зависимостей  $K_i(h)$ , которые можно использовать в ходе расчета.

Получение экспертных оценок параметров для расчетной модели может дать хорошие результаты только в тех случаях, когда принятые в модели допущения соответствуют реальным условиям задачи. Чтобы расширить область эффективного применения системы, исследуется возможность применения методов нейронных сетей для получения значений уровней и расходов по начальным и граничным условиям. На рис. 2.2 приведена база знаний подсистемы обучения сети, реализованная средствами NeuroOn-Line для тестового примера.

NeuroOn-Line — это инструментальное средство, реализованное на базе G2 и реализующее методы нейронных сетей. Основой системы является объектно ориентированный графический язык описания баз знаний. Язык включает блоки — объекты, описывающие действия над данными, и связи между блоками, представляющие потоки данных. В схеме, приведенной на рисунке, реализован цикл обучения сети на выборке из

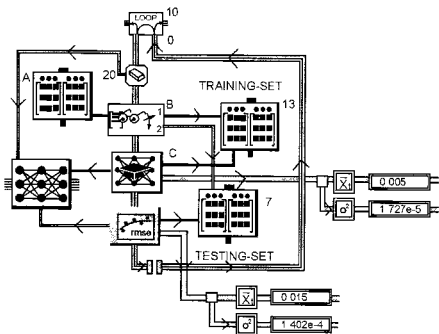


Рис. 2.2. База знаний подсистемы обучения для тестового примера.

20 примеров (блок А). Обучение проводится за 10 циклов, что задается блоком LOOP (цикл). В каждом цикле блок В разбивает множество примеров на два подмножества — примеры для обучения (training set) и примеры для тестирования (testing set). Затем срабатывает блок обучения С, обеспечивающий формирование весов в нейронной сети обратного распространения. Далее блок *rmse* проверяет качество обучения. Этот блок обращается к обученной сети и к множеству тестовых примеров, сопоставляет результаты и вычисляет среднеквадратичную ошибку.

В системе *NeurOn-Line* определено более сотни стандартных настраиваемых блоков (в том числе 4 вида нейронных сетей), а также предусмотрено использование нестандартных, определенных пользователем блоков (поведение таких блоков описывается на внутреннем процедурном языке G2, близком по своим возможностям к Паскалю). Блоки могут иметь сложную структуру, что обеспечивает построение иерархических баз знаний для решения сложных задач. Например,

приведенную на рис. 2.2 схему можно описать как один сложный блок "обучение-и-тестирование".

Средства визуального программирования системы NeuroLine дают возможность непрограммирующим пользователям самостоятельно создавать и исследовать практически значимые приложения.

Система поддержки оперативного управления гидравлическим режимом каскадов водохранилищ функционирует на рабочих станциях Sun и RS-6000. Расчетный модуль реализован на языке Си. Данные по фактическим режимам загружаются из текстовых файлов в режиме имитации ввода реальных данных. В следующей версии системы планируются ввод и анализ фактических данных в реальном масштабе времени. Выбор комплекса G2 в качестве инструментального средства реализации системы, по оценкам авторов, сокращает сроки разработки и пробной эксплуатации более чем в 3 раза.

Подключение инструментальной системы NeuroLine, реализованной на базе G2, позволяет непрограммирующим экспертам использовать в имитационных моделях методы нейронных сетей.

### **2.3. Использование инструментального комплекса G2 для разработки экспертных систем реального времени в энергетике**

В условиях высокой сложности и динамичности современных технологических процессов все в большей степени выявляется неудовлетворительность традиционных средств автоматизации (DCS, SCADA) для решения многих реальных задач управления. Большие объемы измерений при недостаточности доступной информации для принятия решений, а также необходимость верификации получаемых данных — все это потребовало перехода к новейшим интегрированным технологиям создания автоматизированных систем управления, объединяющим возможности традиционных подходов с методами искусственного интеллекта, объектно-ориентированным проектированием, средствами быстрой разработки приложений, а также методами имитационного моделирования и анимации.

Одним из наиболее развитых интегрированных инструментов данного класса является комплекс G2 (фирма Gensum, США), обеспечивающий быструю разработку интеллектуаль-

ных приложений, работающих в реальном масштабе времени [9]. G2 поддерживает следующие возможности: объектно-ориентированный подход к созданию приложений; представление конкретных и общих знаний о проблемной области; описание знаний с помощью правил и процедур; использование методов нейронных сетей и нечеткой логики; открытость системы (поддержка стандартов для обмена данными в реальном масштабе времени); параллельная обработка; динамическое имитационное моделирование процессов; коллективный доступ к приложениям в ходе их разработки и использования; поддержка архитектуры "клиент — сервер"; поддержка разнообразных платформ (рабочие станции в среде UNIX и ПЭВМ в среде Windows NT и Windows 95) с полной переносимостью приложений. Разработчики, использующие G2, отмечают сокращение сроков создания приложений по сравнению со средствами традиционного программирования примерно в 10 раз. К основным достоинствам комплекса G2 следует отнести то, что он позволяет сочетать методы имитационного моделирования сложных технических и социальных объектов с методами искусственного интеллекта.

Помимо базовой среды разработки и использования приложений комплекс G2 включает специализированные подсистемы — GDA (среда визуального программирования приложений для диагностики и мониторинга непрерывных процессов), NeuroOn-Line (управление на основе методов нейронных сетей), ReThink (поддержка реинжиниринга бизнес-процессов) и ряд других.

К основным задачам, решаемым с помощью G2, можно отнести следующие: мониторинг в реальном масштабе времени, управление верхнего уровня, диагностика, планирование, составление расписаний, оптимизация, консультирование операторов, проектирование систем.

К настоящему времени G2 используется в 40 странах мира практически во всех отраслях производства, а также в таких областях, как космические исследования, телекоммуникации, безопасность офисов и многих других.

Значительное число приложений создано и в электроэнергетике. Можно выделить типовые задачи, для решения которых применяется инструментальный комплекс G2.

1. В приложениях, связанных с производством электроэнергии, можно выделить следующие группы задач:



— оптимизация — повышение эффективности работы станций, что является важнейшей задачей в условиях перехода от регулируемых монополий к конкурирующим производителям электроэнергии (минимизация затрат на топливо);

— диагностика — выявление неисправного оборудования и других проблем, определение причин отклонений в работе станции и т.д.;

— поддержка работы операторов при запуске/останове процессов, а также в нештатных ситуациях,

— поддержка служб технического сопровождения, в первую очередь автоматизация планирования ремонтов (при этом учитываются требования действующего законодательства — особенно в случае атомных электростанций).

Для решения этих задач были разработаны различные конкретные приложения с использованием G2 [10], среди которых хотелось бы в первую очередь отметить систему Emergency Response Support System (ERSS), разработанную по инициативе правительства Японии для поддержки безопасной эксплуатации атомных электростанций на основе имитационного моделирования их работы.

На базе ряда прикладных систем к настоящему времени созданы коммерческие специализированные инструментальные средства. Рассмотрим некоторые из них.

Model-Based Diagnosis MODI (разработка компании ABB, первоначально выполненная на Staudinger Power Plant, Preussen Elektra, Германия) решает задачи оптимизации и диагностики для электростанций, работающих на твердом топливе. Основной принцип функционирования системы — моделирование работы станции в реальном времени и сопоставление реальных данных с моделируемыми значениями. MODI работает с совокупностями исходных данных и реализует системный подход к диагностике, что не может обеспечить традиционная распределенная система управления (DCS). Таким образом, MODI и CDS станции дополняют возможности друг друга.

При обнаружении отклонений система анализирует степень их серьезности, определяет возможную причину неисправности и сообщает операторам, какие действия необходимо предпринять в сложившейся ситуации. MODI может также выявлять и анализировать тенденции в процессах, а следовательно, предсказывать наступление аварийных ситуаций до того, как изменения станут необратимыми.

MODI позволяет автоматически выявлять отклонения от оптимального режима функционирования и формировать на основе экспертных знаний рекомендации операторам по восстановлению требуемого режима работы станции.

Система MODI представляет собой проблемно-ориентированный инструментарий, включающий знания о типовых процессах на тепловых станциях. Реальная эксплуатация системы требует ее точной настройки на особенности конкретной станции, поэтому в MODI предусмотрены специальные средства визуального редактирования баз знаний, ориентированные на непрограммирующих инженеров-технологов.

Внедрение системы MODI на станции Carolina Power & Light Roxboro в Северной Каролине позволило сократить ежегодные затраты на топливо на \$140000.

Maintenance Management Expert System MEMORIES (разработка S3 Technologies) поддерживает работу служб технического сопровождения атомных электростанций. Система помогает оценивать надежность отдельных устройств и станции в целом, определять риск возникновения тех или иных аварийных ситуаций и их возможные последствия. Кроме этого MEMORIES планирует проведение ремонтов, исходя из требований действующего законодательства, а также минимизации риска и затрат, причем пользователь имеет возможность осуществлять анализ "что если" для проверки различных стратегий планирования.

Operator Support System OSES (разработка S3 Technologies) поддерживает работу операторов, выполняющих стандартные процедуры (запуск, останов, реакция на нештатные ситуации). В системе реализован графический язык, позволяющий в наглядной форме представлять описания процедур. Эти описания с учетом (и отображением на дисплее) текущего состояния станции выдаются операторам, причем система отслеживает выполнение ими предусмотренных действий. При работе в режиме off-line система OSES используется как тренажер.

2. В приложениях, связанных с передачей и распределением электроэнергии, комплекс G2 используется, в первую очередь, для помощи диспетчерам при восстановлении электроэнергетических систем после аварий. К наиболее интересным приложениям данного класса относится система, разработанная в рамках исследовательского проекта по заказу ENEL

(Италия) [11] и послужившая основой для ряда реальных проектов.

Задача системы состоит в выдаче рекомендаций диспетчерам по восстановлению системы в минимальные сроки и с минимальной вероятностью новой аварии в соответствии со стратегией, принятой в ENEL. При построении конкретных планов действий и рекомендаций используется имитационная модель электроэнергетической системы, работающая на основе реальных данных. Недостающая информация определяется исходя из математических моделей (при этом используется встроенная подсистема моделирования комплекса G2), а также экспертных правил. Отметим, что комплекс G2 ориентирован на быстрое создание приложений подобного класса, поскольку он позволяет работать как с математическими моделями, так и с объектно-ориентированным графическим представлением моделируемых систем (включая возможность анимации). Итак, в рассматриваемом приложении диспетчер не только получает конкретный план действий, но и имеет возможность наблюдать реальную и выведенную информацию о состоянии системы как в цифровом, так и в графическом виде. При минимизации риска возникновения новой аварии используется вероятностное оценивание надежности оборудования. Система контроля за восстановлением позволяет оперативно реагировать на возникновение непредвиденных ситуаций. При этом особенно удобной оказалась способность G2 описывать реакцию на разнообразные асинхронные события с помощью правил, а также поддержка нескольких (8) стратегий вывода решений.

3. В настоящее время в электроэнергетике наблюдается переход от регулируемых монополий к конкурирующим производителям, что приводит к формированию новых экономических отношений в отрасли. В связи с необходимостью создания новых и, что особенно важно в условиях конкуренции, эффективных способов организации производства и распределения электроэнергии особый интерес представляет использование методов **реинжиниринга бизнес-процессов**.

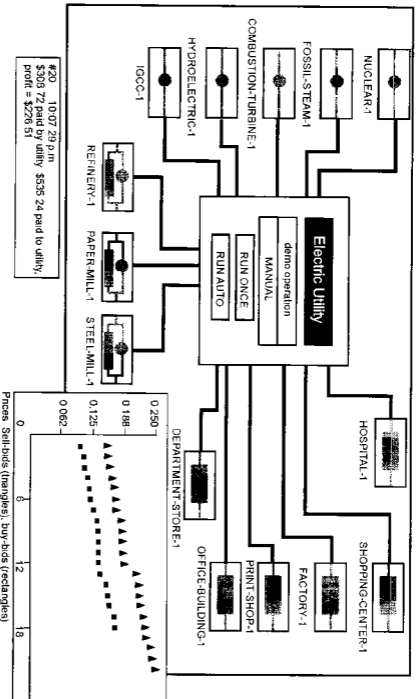
Авторы термина М. Хаммер и Дж. Чампи определяют реинжиниринг как "фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование бизнес-процессов для достижения коренных улучшений в основных актуальных показателях их деятельности: стоимость, качество, услуги и темпы" [12]. Ре-

инжиниринг рассматривается как необходимое условие выживания современных компаний в условиях жесткой конкурентной борьбы на мировом рынке. Многие специалисты считают реинжиниринг революцией в менеджменте, превратившей конструирование бизнеса в инженерную деятельность. Возможность такой революции обусловлена, прежде всего, новейшими достижениями в области информационных технологий. Как показано в [13], основой при проведении реинжиниринга является создание модели бизнес-процессов компании (отрасли) с последующим перепроектированием их с целью повышения эффективности деятельности системы в целом. При работе с крупными компаниями имитационное моделирование предлагаемых бизнес-процессов используется для проверки работоспособности и качества проектов по реорганизации, а также для сравнения альтернативных решений.

Для моделирования дискретных бизнес-процессов на базе инструментального комплекса G2 разработана инструментальная система ReThink [14], позволяющая описывать имитационные модели на объектно-ориентированном графическом языке и поддерживающая их анимацию в ходе исполнения. Для анализа моделей в системе предусмотрены стандартные средства сбора статистики, мониторинговые окна и средства отображения на графиках как конкретных показателей, так и тенденций их изменения. С помощью правил и процедур G2 можно описывать сложные нестандартные методы анализа и преобразования моделей. Пользователями моделей, разработанных средствами системы ReThink, могут быть непрограммирующие пользователи — менеджеры компаний, проводящих реинжиниринг.

Однако возможности самого комплекса G2 достаточны для описания таких систем, как рынки электроэнергии. Интересный пример моделирования спотового рынка рассмотрен в [15].

Поэтому в модели принимается дискретная схема функционирования рынка, предусматривающая заключение соглашений о производстве и потреблении по тем или иным ценам в начале каждого 15-минутного интервала с последующим выполнением этих соглашений в течение ближайших 15 мин. Общение предприятий-участников осуществляется с помощью заявок на покупку (buy-bid) и заявок на продажу (sell-bid), отправляемых с помощью электронных средств связи. Каждая



#20 10-07 29 p.m  
 \$308 72 paid by utility \$535 24 paid to utility,  
 profit = \$226 51

Fig. 2.3 Схема к демонстрационному примеру модели оптового рынка электроэнергии.

заявка характеризуется мощностью и ценой и может быть жесткой или гибкой. На рис. 2.3 представлен демонстрационный пример модели.

Основная задача, решаемая "брокером", состоит в разрешении заявок и определении соглашений между предприятиями-участниками таким образом, чтобы удовлетворить всех потребителей и достичь максимальной прибыли с соблюдением технологических требований.

При работе с моделью можно задавать дополнительные требования к процессу разрешения заявок: например, выделить некоторые "привилегированные" группы потребителей (больницы, общественный транспорт) или производителей (производители с низкой себестоимостью). Средства программирования высокого уровня, предоставляемые комплексом G2, позволяют описывать (и сразу же испытывать) различные правила регулирования поведения участников. Системы подобного типа могут использоваться не только для исследования и проектирования, но и (в случае подключения к реальным данным) для мониторинга бизнес-процессов в электроэнергетике.

4. Комплекс G2 применяется также для решения многих других задач, среди которых отметим задачу управления и диагностики в телекоммуникациях (на основе G2 разработана специализированная инструментальная система Fault Expert, которая взята на вооружение рядом компаний, в том числе Intelsat и AT&T), а также контроль за соблюдением тепловыми электростанциями норм законодательства в области экологии (подобная система установлена в Калифорнии).

5. В нашей стране инструментальный комплекс G2 используется с 1995 г. в таких областях, как космические исследования, управление транспортными перевозками, телекоммуникациями и электроэнергетика.

Первый проект по электроэнергетике был направлен на создание системы поддержки принятия решений по оперативному управлению гидравлическим режимом каскадов водохранилищ (первая версия системы была разработана за 4 мес, из которых 1 мес был посвящен постановке задачи). В настоящее время разрабатывается система планирования ремонтов высоковольтных линий и сетевого оборудования для Единой энергосистемы России.

Опыт работы с комплексом G2 продемонстрировал возможность его использования для широкого круга задач. К одному из основных достоинств хотелось бы отнести существенное сокращение сроков разработки приложений и простоту их модификации на этапах тестирования и пробной эксплуатации.

Объектно-ориентированный подход к разработке приложений и удобные средства описания обобщенных знаний с самого начала нацеливают на создание проблемно-ориентированных инструментариев, а не конкретных систем. Например, система управления гидравлическими режимами каскадов применима практически для любых каскадов, а не только каскада Нижне-Волжских ГЭС, как предполагалось в начале работы над проектом.

Средства представления графической информации в G2 оказались довольно удобны не только для описания схем и моделей реальных производственных систем, но и для реализации объектно-ориентированных графических языков с возможностью анимации. Подобные языки положены в основу таких инструментальных систем, реализованных на базе G2, как GDA (описание базы знаний об обработке информации, поступающей от систем сбора данных, в виде потоковой диаграммы), NeurOn-Line, ReThink и Fault Expert. В системе MODI реализован язык описания исполняемых (активных) схем алгоритмов, что позволяет непрограммирующим инженерам-технологам самостоятельно вводить свои знания в систему.

В целом отметим, что инструментальный комплекс G2 дал возможность применить новейшие достижения информационных технологий и в первую очередь инженерии знаний для решения сложнейших реальных задач управления. Использование G2 обеспечивает высокую гибкость приложений и позволяет легко адаптировать их к развитию современных технологий и постоянно изменяющимся внешним условиям.

#### **2.4. Система распознавания образов для решения энергетических задач**

В данном разделе рассматривается разработка алгоритма и программы, позволяющей отнести сложившуюся в энергосистеме ситуацию к тому или иному классу на основании имеющихся знаний, выраженных естественным образом. В

общем виде эта задача формулируется как задача распознавания образов для проведения экспертизы состояния энергосистемы\*.

Предлагается обучающаяся система распознавания образов (ОСРО), основанная на понятиях и математическом аппарате теории нечетких множеств. Эта система накапливает в базе знаний общетеоретические знания и знания экспертов о рассматриваемой системе в виде описания классов. Классы описываются набором высказываний по рассматриваемым параметрам. Например: "Если  $A_1$  и  $B_1$  и ..., то это класс  $N$ ", где  $A_1$  и  $B_1$  — высказывания по параметрам  $A$  и  $B$  первой строки базы знаний.

Высказывания формулируются с применением лингвистических переменных, нечетких значений параметров, нечетких отношений и нечетких логических связей.

Функция принадлежности (ФП) [16] нечеткой границы записывается в виде

$$f(x) = \exp [b(x - c)^2], \quad (2.1)$$

где  $b$  и  $c$  — коэффициенты, определяющие характер кривой.

Данная функция привлекла авторов тремя свойствами: своим подобием функциям, используемым для описания неточностей измерений, что обеспечивает преемственность опыта и значительно упрощает общение с экспертами; ограниченностью значений, что необходимо для выполнения свойств ФП [16]; бесконечностью области определения, что существенно упрощает алгоритмические решения при программировании операций над нечеткими подмножествами. Точные значения рассматриваются как частные случаи нечетких.

Коэффициенты этой функции находятся из условий

$$f(a) = 1; f(a \pm d) = \alpha, \quad (2.2)$$

где  $a$ ,  $d$ ,  $\alpha$  — значение параметра в начале границы, ширина границы и значение ФП в конце интервала неопределенности соответственно. Первое условие задается требованием нормальности ФП, второе характеризует "крутизну" границы и может варьировать в зависимости от степени точности оценки.

Из этой системы уравнений значения коэффициентов находятся следующим образом:

---

\*Работа выполнялась под руководством доктора технических наук профессора Л.Л. Богатырева



ситуации наборам высказываний класса.

3) определить максимальную из степеней принадлежности ситуации набору высказываний;

по наборам высказываний класса (степени принадлежности ситуации набору высказываний);

2) получить минимальные значения точных верхних границ параметров и наборам высказываний класса;

1) установить точные верхние границы пересечений функций принадлежности оценки ситуации и высказывания по ситуации какому-либо классу, необходимо:

Иными словами, чтобы найти степень принадлежности знания базы знаний по  $f$ -му параметру  $k$ -го сочетания класса  $i$ , по  $f$ -му параметру,  $v_j^{f,k}(x)$  — функция принадлежности высказывания  $v_j$  по  $f$ -му параметру,  $u_j^{f,k}(x)$  — функция принадлежности ситуации  $u_j$  по  $f$ -му параметру;  $X_j$  — область значений  $f$ -го параметра;  $n_j(x)$  — степень принадлежности рассматриваемой ситуации

$$n_j(x) = \max \{ \min \{ \sup_{x \in X_j} \{ \min \{ u_j^f(x), v_j^f(x) \} \} \} \} \} \quad (2.5)$$

зованием формулы

эта степень ее принадлежности каждому из классов с использованием представляющей ситуации проводится путем рассматривания может быть отнесена к тому или иному классу. При наличии высказываний по всем параметрам, любая ситуация высказываний, описывающей классы в виде

где  $v(x), \gamma(x)$  — функции принадлежности элементов  $v$  и  $\gamma$  высказываний.

$$n(x) = v(x) + \gamma(x) - v(x) \cdot \gamma(x) \text{ "жесткое" ИЛИ}$$

$$n(x) = \max \{ v(x), \gamma(x) \} \text{ "мягкое" ИЛИ};$$

$$n(x) = v(x) \cdot \gamma(x) \text{ "жесткое" И};$$

$$n(x) = \min \{ v(x), \gamma(x) \} \text{ "мягкое" И};$$

Такие операции определены следующим образом: применение логических связок И, ИЛИ (пересечение и объединение нечетких подмножеств [16]) в "мягкой" и "жесткой" интерпретации, при этом "жесткие" связи менее предпочтительны, так как приводят к изменению интервалов неопределенности. Такие операции определены следующим образом:

$$c = a; b = \frac{p}{\ln a} \quad (2.3)$$

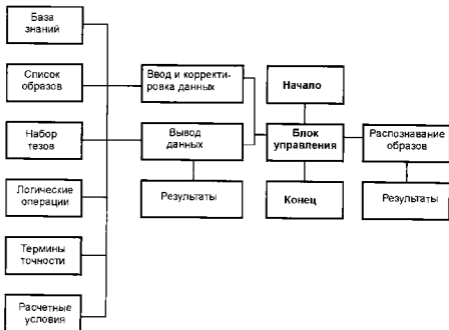


Рис. 2.4 Блок-схема обучающейся системы распознавания образов (ОСРО).

При принятии решений необходимо учитывать значения степеней принадлежности ситуации всем классам с применением понятий четкой принадлежности, принадлежности в какой-то мере и  $\epsilon$ -уровня. На примере трехклассовой базы знаний при степенях принадлежности ситуации классам  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = \beta$ ,  $\lambda_3 < \epsilon_3$  можно сформулировать следующие высказывания:

1) ситуация четко принадлежит классу 1, но при этом она в какой-то мере ( $\epsilon_2 < \beta < 1$ ) принадлежит классу 2;

2) ситуация не принадлежит классу 3. Программа ОСРО представляет собой оболочку, позволяющую формировать и изменять конфигурацию системы, заполнять и корректировать базу знаний и список распознаваемых ситуаций. Конфигурация определяется составом используемых параметров, наборами тезов, логических операций терминов точности. Блок-схема системы приведена на рис. 2.4.

На данном этапе база знаний и список образов представляют собой наборы высказываний и значений их функций

Набор тезов системы распознавания образов

Наименование теза	Ключ поиска	Формула	Интервал формулы	Интервал значения
Близко к ( . )	Близко к (	$\exp(b * (x - a) ** 2)$	0—1	$a—a$
Меньше ( . )	Меньше (	$\exp(b * (x - a) ** 2)$	$a—1$	0— $a$
Больше ( . )	Больше (	$\exp(b * (x - a) ** 2)$	0— $a$	$a—1$
Точно ( . )	Точно (	0	0—1	$a—a$
Безразлично	Безразлично	1	0—0	0—1

принадлежности по параметрам, определяющие класс или образ. Параметры описываются наименованием, интервалом области определения, номером набора используемых тезов для формирования выражений базы знаний и списка ситуаций.

Наборы тезов характеризуются наименованием, ключевой последовательностью, интервалом нечеткой границы, интервалом четкой принадлежности и формулой для расчета функции принадлежности нечеткой границы. Необходимо отметить, что тезы устанавливаются на нормированном интервале  $[0, 1]$ . При расчете функции принадлежности выражения происходит переход от нормированных значений к натуральным.

Логические операции описываются наименованием и выражением, определяющим действие. Для операций приняты соглашения: наименование начинается и заканчивается точкой; действующая формула включает два параметра:  $f_1$  и  $f_2$ ; порядок выполнения операций зависит от последовательности описания.

Описание терминов точности включает в себя наименование, ключевую последовательность и действие, выполняемое при учете термина.

Расчетными условиями являются ширина границы неопределенности  $s$  и значение функции принадлежности в конце границы неопределенности  $\alpha$ , принимаемые по умолчанию.

Описания использованных в данной работе набора тезов, логических операций и терминов точности представлены в табл. 2.1—2.3 соответственно.

Таблица 2.2

Логические связи системы распознавания образов

Наименование связи	Выражение
И	$\min(f_1, f_2)$
ИЛИ	$\max(f_1, f_2)$

Таблица 2.3

Термины точности системы распознавания образов

Наименование термина	Ключ поиска	Действие
Очень	Очень	$k = k * 2$
Не очень	Не очень	$k = k/2$
Точность ( . )	Точность (	$k = k * a$

В процессе ввода и корректировки базы знаний и списка образов необходимо получить последовательность значений функции принадлежности некоторого сложного высказывания, состоящего из простых высказываний (тезов), терминов точности и логических связей. Для этого разработан транслятор выражений, включающий в себя три блока:

блок 1 — разложение на составляющие с выделением тезов, терминов точности и логических связей;

блок 2 — расчет значений функций принадлежности тезов с учетом терминов точности;

блок 3 — расчет значений результирующей функции принадлежности исходного высказывания.

Распознавание образов проводится по формуле (2.5) с использованием алгоритма, изложенного в пояснениях к ней. Дополнительно находится определяющий параметр и ведется ранжировка параметров по влиянию на принадлежность к классу.

Для сравнения метода с дискриминантным анализом рассмотрена двухпараметрическая, двухклассовая модель энергетической безопасности некоторых энергосистем Уральского экономического района (УЭР). Классы представлены нормальным и кризисным состояниями. В качестве параметров использованы обеспеченность собственными электрогенерирующими мощностями ( $X_1$ ) и доля изношенного энергетического оборудования ( $X_2$ ). Исходная информация дана в табл. 2.4.

Обучающая выборка формировалась исходя из того, что нормальное состояние было в Свердловской энергосистеме в 1990—1992 гг. и в Пермской энергосистеме в 1990—1993 гг., а кризисное состояние — в Свердловской системе в 1995 г., в

Т а б л и ц а 24

## Исходная информация для задачи энергетической безопасности УЭР

Энергосистема	Год	$X_1$ , %	$X_2$ , %
Свердловская	1990	114	24
	1991	120	23
	1992	125	25
	1993	135	26
	1994	137	39
	1995	146	47
Челябинская	1990	81	40
	1991	77	58
	1992	76	67
	1993	78	70
	1994	74	86
	1995	89	74
Пермская	1990	147	17
	1991	145	19
	1992	149	19
	1993	156	25
	1994	170	39
	1995	180	49
Оренбургская	1990	139	5
	1991	134	5
	1992	142	7
	1993	144	8
	1994	146	9
	1995	148	27
Курганская	1990	25	0
	1991	20	0
	1992	22	11
	1993	22	11
	1994	19	33
	1995	23	29

Челябинской — в 1992—1995 гг., в Курганской — в 1994—1995 гг. (табл. 2.5).

Разделяющая поверхность имеет вид

$$0.392 - 0.0263X_1 + 0.0589X_2 = 0. \quad (2.6)$$

Таблица 2.5

## Обучающая выборка для дискриминантного анализа

Класс	Параметр	Значения по годам						
Нормальное состояние	$X_1$	114	120	125	147	145	149	156
	$X_2$	24	23	25	17	19	19	25
Кризисное состояние	$X_1$	146	76	78	74	89	19	23
	$X_2$	47	67	70	86	74	33	29

На основании обучающей выборки сформирована база знаний ОСРО:

1. Если  $X_1 > 114$  и  $X_2 < 24$  или  $X_1 > 120$  и  $X_2 < 23$ , или  $X_1 > 125$  и  $X_2 < 25$ , или  $X_1 > 147$  и  $X_2 < 17$ , или  $X_1 > 145$  и  $X_2 < 19$ , или  $X_1 > 149$  и  $X_2 < 19$ , или  $X_1 > 156$  и  $X_2 < 25$ , то состояние нормальное.

2. Если  $X_1 < 76$  и  $X_2 > 67$  или  $X_1 < 78$  и  $X_2 > 70$ , или  $X_1 < 74$  и  $X_2 > 86$ , или  $X_1 < 89$  и  $X_2 > 74$ , или  $X_1 < 19$  и

Таблица 2.6

## Результаты распознавания ситуаций

Энергосистема	Год	Дискриминантный анализ		ОСРО		
		Расстояние	Класс	Норма	Кризис	Класс
1	2	3	4	5	6	7
Свердловская	1990	- 1 19	Норма	1	0.5305	Норма
	1991	- 1 41	»	1	0.5015	»
	1992	- 1 42	»	1	0.5599	»
	1993	- 1 63	»	0.9988	0 5895	»
	1994	- 0 91	»	0.7907	0.9262	»
	1995	- 0 68	»	0 5599	1	»
Челябинская	1990	0 62	Кризис	0 7358	0.9430	Кризис норма
	1991	1 78	»	0.2719	1	Кризис
	1992	2 34	»	0.1208	1	»
	1993	2 46	»	0.0883	1	»
	1994	3 51	»	0 0116	1	»
	1995	2 41	»	0 0563	1	»

1	2	3	4	5	6	7
Пермская	1990	- 2.47	Норма	1	0.3401	Норма
	1991	- 2.30	»	1	0.3908	»
	1992	- 2.41	»	1	0.3908	»
	1993	- 2.24	»	1	0.5599	»
	1994	- 1.78	»	0.7907	0.8415	Кризис-норма
	1995	- 1.46	»	0.5015	0.7073	»
Оренбургская	1990	- 2.97	»	1	0.1208	Норма
	1991	- 2.84	»	1	0.1208	»
	1992	- 2.93	»	1	0.1401	»
	1993	- 2.92	»	1	0.1616	»
	1994	- 2.29	»	1	0.1772	»
	1995	- 1.91	»	0.9952	0.6192	Кризис-норма
Курганская	1990	- 0.27	»	0.0983	0.3650	Кризис
	1991	- 0.13	»	0.0709	0.3650	»
	1992	0.46	Кризис	0.0792	0.6782	»
	1993	0.46	»	0.0792	0.6782	»
	1994	1.84	»	0.079	1	»
	1995	1.50	»	0.0883	0.9997	»
Гипотетические ситуации на границе		0.00	-	0.7358	0.7073	Кризис-норма
в зоне кризиса		0.01	Кризис	0.8650	0,8415	»
в зоне нормы		- 0.01	Норма	0.5895	0,5599	»

$X_2 > 33$ , или  $X_1 < 23$  и  $X_2 > 23$ , или  $X_1 < 146$  и  $X_2 > 47$ , то ситуация кризисная.

Для анализа распознаваемости ситуаций вблизи разделяющей поверхности введены гипотетические ситуации: точно на границе ( $X_1 = 82.1$ ,  $X_2 = 30$ , вблизи границы в зоне кризиса ( $X_1 = 93$ ,  $X_2 = 35$ ), вблизи границы в зоне нормы ( $X_1 = 71.2$ ,  $X_2 = 25$ ). Результаты распознавания представлены в табл. 2.6.

Анализируя результаты, можно сделать выводы: 1) предлагаемая система абсолютно точно распознала ситуации из обучающей выборки (в отличие от дискриминантного анализа, который ситуацию в Свердловской энергосистеме в 1995 г.

отнес к нормальному режиму); 2) предлагаемая система более мягко разделяет ситуации вблизи разделяющей поверхности и более точно обозначает эту поверхность на основе обучающей выборки.

## 2.5. Информационно-интеллектуальная среда исследователя

Принятие решений представляет собой одну из форм интеллектуальной деятельности человека, обычно опирающуюся на предварительные знания, оперативную информацию, числовые оценки, оценочные суждения и мнения экспертов, глубокий анализ тенденций и ситуаций, различные процедуры оптимизации и многое другое. Поэтому поддержка процесса принятия решений есть частный вид поддержки интеллектуальной деятельности человека, и именно последний вопрос является центральным в настоящем контексте.

Поскольку интеллектуальная деятельность осуществляется человеком, погруженным в реальную жизнь со всеми ее сложностями и заботами, все стороны этой жизни оказывают существенное влияние на эффективность такой деятельности. Влияние психического состояния, социального и экономического положения субъекта интеллектуальной деятельности в современном мире может свести на нет все старания по информационному обеспечению и различным видам поддержки. В этом смысле средой информационной деятельности человека является вся среда его обитания. Решение задачи в таком широком плане явно не может быть выполнено средствами информатики и других близких к ней научных дисциплин.

Ниже мы ограничимся информационно-интеллектуальным слоем (срезом) среды обитания современного человека и его деятельности (в первую очередь, познавательной и исследовательской), который и будем рассматривать как макросистему в рамках настоящего раздела. Попробуем сформулировать представления о рациональной организации внутренней среды такой системы, опираясь на понятия жизнеспособности и гомеостаза как характерной особенности живых (и близких к живым — жизнеспособных) систем.

Жизнеспособность — это возможность сложной автономной системы в изменяющихся условиях и при значительных внешних возмущениях поддерживать свое активное функциони-



рование на временном интервале, значительно превышающем

время жизни ее элементов [17—19].

Последнее признакает способность системы потребовать из внешней среды необходимые материалы, энергию, информацию, отдельные структурные элементы, компоненты, матио, не только для ее нормального функционирования, но и для восоздания или замены отработавших элементов ее структуры. В то же время система должна обладать способностью освобождаться от отработавших или ставших ненужными для ее дальнейшего функционирования элементов. Таким образом, ее дальнейшее функционирование элементов, как и обмен веществ, в жизнедеятельности системы должен происходить некоторыми общими обменными процессами. Другой аспект жизнедеятельности связан с сохранением возможности нормального функционирования системы при внешних условиях, изменяющихся в относительно широких пределах, часто в неблагоприятной среде и в условиях "борьбы за существование". В этой ситуации для поддержания существования жизнедеятельности системы должна за счет своей организации продемонстрировать более эффективное, чем у ее конкурентов в окружающей среде, использование включенных в нее элементов. Последние предполагают умение находить, выбирать (или привлекать) из окружающей среды и удерживать в своем составе необходимые ей элементы, правильно их использовать для обеспечения своей жизнедеятельности.

Гомеостаз. Как неоднократно указывалось в работах Клода Бернара, Артура Рэншола, Норберта Винера и многих других исследователей живых организмов с системных позиций, главной особенностью таких систем является их способность к поддержанию гомеостаза. Для естественной интерпретации этой особенности систем, где безусловно выполняется формирование и взаиморасположение между которыми в основном определяются успешность продолжительного существования и эффективность функционирования всякой системы.

1) жесткая структура системы,

2) внутренняя среда системы,

3) окружающая среда.

Обычно под системой понимают только первый блок из приведенного выше перечня, определяя его как набор элементов или компонент системы, сообразность связей и взаимодействий между ними. Второй блок либо вовсе опускается из

рассмотрения, либо включается в состав элементов жесткой структуры, либо входит в понятие окружающей среда, как бы противостоящее системе, находящееся "по ту сторону забора", отделяющего данную систему от остального мира.

При таком определении большинство искусственных систем не являются жизнеспособными в условиях их естественного окружения. Однако факт устойчивого и длительного существования многих из них, переживших смену многочисленных начальников, неоднократное обновление трудового коллектива, станочного парка, технологии и др. требует своего истолкования. Здесь нужно привлечь часто использующийся термин "инфраструктура", представляющий собой как бы дополнение искусственной системы (нежизнеспособной в ее естественном окружении) до жизнеспособной, за счет специальной "доорганизации" окружающей среды. Для промышленных предприятий к такой "инфраструктуре" следует отнести различные внешние ремонтно-строительные организации, поставщиков оборудования, сети снабжения и реализации, многочисленные проектные институты, структуры отраслевой и межотраслевой координации и управления, специальные вузы, техникумы, центры переподготовки и повышения квалификации, банки и прочие финансовые и страховые организации, службы поддержания порядка и многое другое.

Жизнеспособность системы типа машиностроительного предприятия можно здраво оценить только с учетом всех элементов окружающей среды, и тем не менее вырванное, например, из плановой экономики эффективно работающее и преуспевающее предприятие не укладывается в структуру модели жизнеспособной системы по Ст. Бирю [17, 20]. По нашему мнению, это не мешает считать предприятие жизнеспособным. Просто для жизнеспособности в иначе организованной внешней среде могут дополнительно требоваться те или другие компоненты структуры.

Вместе с тем, второй блок — внутренняя среда системы, как правило, остается за пределами внимания. Этот "неосязаемый" компонент можно пытаться внести в первый блок, названный выше жесткой структурой системы, но такая попытка чаще всего приводит к столь густому переплетению связей и взаимодействий, что структура становится практически бесполезной.

Поэтому целесообразно признать качественную особенность второго блока и считать его не просто одним из элементов

жесткой структуры системы, а дополняющим компонентом, который вместе с этой структурой и должен определять систему. При таком определении жизнеспособной системы понятие внутренней среды в той же степени дополняет жесткую структуру, в какой волновые представления квантовой механики дополняют дискретные понятия элементарных частиц или понятие сплошной среды в классической механике дополняет противоположное понятие материальной точки и т.д. Теперь система предстает перед нами как объединение двух ее противоположных и взаимодополняющих сторон: жесткой структуры и внутренней среды.

Именно с этим компонентом системы (внутренней средой) и связывают обычно понятие гомеостаза. Для наших целей потребуется определение гомеостаза, сформулированное на семинарах А. Розенблюта и дополненное представлениями модели жизнеспособной системы С. Бира [17].

Таким образом, под гомеостазом понимается особенность эффективной организации сложных систем, построенных из двух взаимодополняющих частей: жесткой структуры и внутренней среды. При этом система обеспечивает, с одной стороны, высокую стабильность параметров своей внутренней среды, а с другой — сохраняет норму реакции на существенное изменение ситуации.

Характерная для гомеостаза стабильность внутренней среды создает условия жизни и эффективного функционирования элементов системы, а вместе с тем реализует неспецифическую регуляцию в системе.

При таком определении:

1) гомеостаз может иметь место только в системах с развитой внутренней средой и не имеет отношения к простым (жестким) системам, для которых понятие внутренней среды часто лишено смысла;

2) по отношению к простым системам можно использовать термин "квазигомеостаз", под которым понимают, в частности, обычную стабилизацию параметров в структурах автоматического управления;

3) аналогично для произвольной среды (независимо от того, является ли она внутренней для какой-либо системы) можно использовать термин "предгомеостаз", понимая под этим некоторые интегральные, усредненные характеристики среды, обладающие значительно большей стабильностью.

Для обсуждения свойств, присущих гомеостазу как таковому, "квазн-" и "предгомеостазу", можно использовать термин "гомеостаз в широком смысле слова".

Понятие "гомеостаз" не есть синоним понятия "жизнеспособность". Эти понятия работают на различных временных интервалах. В то время как способность системы поддерживать гомеостаз обнаруживается на коротких по сравнению с жизненным циклом системы промежутках времени, жизнеспособность оценивается по сопоставлению продолжительности жизненных циклов системы как целого, так и отдельных ее элементов. В настоящей работе гомеостаз рассматривается как необходимое условие жизнеспособности системы.

Систему, в которой поддерживается гомеостаз, будем называть гомеостатической. Это такое единство жесткой структуры и внутренней среды, где структура включает необходимые механизмы и средства поддержания гомеостаза в среде, а среда обеспечивает условия для жизни и эффективного функционирования элементов системы и компонентов жесткой структуры.

**Информационно-интеллектуальная сфера.** Выбранная нами макросистема, безусловно, относится к классу больших и сложных систем со свободными элементами, для которых должны быть справедливы основные принципы жизнеспособности [19].

1. Любая жизнеспособная система должна состоять из частей и подсистем, каждая из которых, в свою очередь, является жизнеспособной системой. И наоборот, каждая жизнеспособная система есть часть некоторой более крупной жизнеспособной системы [17].

2. Как правило, жизнеспособная система должна включать такую специальную часть, как ее внутренняя среда, параметры которой поддерживаются на надлежащем квазистабильном уровне, с тем чтобы:

а) в любой период жизнедеятельности системы оставаться адекватными внешней ситуации и формировать быструю адекватную реакцию всей системы на чрезвычайные ситуации (неспецифическое регулирование);

б) быть способными привлекать (в случае систем со свободными элементами), удерживать и обеспечивать сохранение жизни и деятельности основных элементов системы;

в) гарантировать условия для эффективного выполнения ключевыми элементами системы их функций (близких к оптимальному режиму их деятельности);

г) создавать условия для развития способностей и стимулировать это развитие, повышение квалификации в процессе производственной деятельности.

Информационно-интеллектуальная сфера как система формируется по мере создания ее внутренней среды, которая, в свою очередь, является внешней средой для каждого отдельного ее элемента — человека, осуществляющего свою интеллектуальную деятельность.

Оставляя в стороне жесткую структуру информационно-интеллектуальной сферы, обратимся к информационно-интеллектуальной среде (ИИС) как внутренней среде системы со свободными элементами.

Мир человека многомерен, и выбор рода занятий, рода деятельности осуществляется им достаточно свободно, на основе тех норм, правил и предпочтений, которые составляют его мировоззрение. Общеизвестная особенность нашей цивилизации на современном этапе состоит в том, что подавляющее и все возрастающее число специальностей, должностей и профессий становятся неразрывно связанными с процессами обработки информации. Вместе с тем внедрение информационных технологий может приводить как к примитивизации умственной деятельности работника и оболваниванию его еще в большей степени, чем это имело место при конвейерной организации физического труда, так и к формированию и развитию его умственных и творческих способностей в зависимости от базовых принципов используемых технологий, организации интерфейса и др. Все это в большой степени относится и к системам поддержки принятия решений.

Можно выделить две главные задачи ИИС, решение которых происходит независимо, с использованием принципиально различных подходов и средств.

Первая задача (пункт "а" второго принципа жизнеспособности) — обеспечение достаточной степени связности системы и адекватности ее деятельности и возможностей складывающейся ситуации. Эта задача решается в основном средствами массовой информации, а особо изощренная форма решения, где массовый доступ сочетается с индивидуальным выбором и

свободой предоставления информации, дается средствами "Интернет".

Вторая задача (пункты "б", "в" и "г" второго принципа жизнеспособности) связана с взаимодействием субъекта интеллектуальной деятельности с ИИС, с теми особенностями ИИС, которые делают именно этот вид деятельности особо привлекательным для субъекта, а сам процесс деятельности — развивающим интеллектуальные способности субъекта и тем самым еще более повышающим привлекательность такой деятельности. Решение второй задачи видится нам на пути создания информационно-интеллектуального "продолжения" (ИИП) инструментальных и ориентированных на конечного пользователя программных средств, различных информационных и интеллектуальных систем как общего, так и специального назначения. Такое ИИП должно сочетать в себе свойства и функции системы энциклопедических справочников по всем видам человеческой деятельности и группам интересов со свойствами интеллектуального анализатора и автоматизированного классификатора той частной предметной области, где данный субъект осуществляет свою деятельность. Оно должно быть оснащено средствами общения с "Интернет", автоматизированного поиска в этой сети нужной информации, а также автоматизированного анализа, классификации, структурирования, абстрагирования и т.п. Предлагаемое ИИП должно выполнять роль интеллектуального обучающегося посредника (интерфейса), способного "специализироваться" в процессе эксплуатации к данной предметной области, к конкретному пользователю и характерному для его деятельности кругу проблем.

Попытка разработки такого ИИП реализуется в настоящее время для среды FoxPro. Подробное описание предполагаемых возможностей ИИП, принципов его построения, текущего состояния разработки будут доложены на очередном семинаре и, вероятно, войдут в следующий том этой монографии.

## **2.6. Представление данных, программ, знаний в среде ЗИРУС**

Разработка замкнутой инструментальной развиваемой универсальной среды программирования (ЗИРУС) начата в конце 80-х годов на основе опыта автора по реализации больших

программных проектов для различных прикладных областей (АСУ, САПР, научные исследования). Основными мотивациями начала разработки были: 1) громоздкость стандартного программного обеспечения с наличием множества "черных ящиков", не позволяющих эффективно адаптировать его к новым потребностям; 2) подходы к динамической организации данных, опробованные автором в [21, 22] и позволившие создать сложные приложения с небольшими трудозатратами.

На основе разработанного автором подхода к моделированию данных и логики программ была реализована опытная программная версия среды [23—25], позволившая создавать приложения различного класса\*. Основными этапами ее дальнейшего развития были: 1) совершенствование моделей представления данных и логики программ; 2) создание интерпретаторов обработки программ; 3) создание инструментальных пакетов для поддержки построения систем и диалогового управления запуском задач; 4) разработка встроенного в среду языка ОЛФИС для создания универсальных программ и организации баз знаний; 5) разработка инструментария для поддержки технологий создания и эксплуатации приложений.

Развитие концепции и программных версий среды позволило представить программы в виде моделей данных, содержащих необходимую информацию для их выполнения и формирования различных проекций на внешний уровень (например, в виде схем, текста и таблиц с различными синтаксическими конструкциями). В данной работе приведены: положения концепции среды; подход по ее развитию; описание базовой модели в виде динамических объектов (сегментов); краткое описание языка ОЛФИС и организация на его основе баз знаний; принципы визуального отображения и редактирования данных; а также краткое описание экспериментальной версии среды.

**1. Концепция среды ЗИРУС** основана на: 1) моделировании всех элементов системы в виде набора связанных фрагментов данных с различными правилами их интерпретации; 2) выделении логического (концептуального) уровня представления элементов системы (объектов, программ) и организации преобразований этого представления на внешний уровень  $E$  следующего вида:

---

\*Реализация была осуществлена группой сотрудников Иркутского ВЦ

$$A^{p \rightarrow E} \rightarrow T \rightarrow A^M \rightarrow T^{-1}(q) \rightarrow A^{q \rightarrow E}, \quad (2.7)$$

где  $A^{p \rightarrow E}$ ,  $A^{q \rightarrow E}$  — проекции с параметрами  $p$  и  $q$  модели  $A^M$  на внешнем уровне  $E$ ;  $T$ ,  $T^{-1}(q)$  — прямое и обратное преобразования с внешнего уровня  $E$  на логический; 3) создании расширяемого набора базисных операций  $\{k_i\}$  с конструктором построения моделей программ на заданном базисе операций; 4) создании интерфейсов с инородными системами в виде расширения набора базисных операций.

Ядро среды, включающее модель представления данных, базисные операции и конструктор, может быть реализовано в виде одной программы на универсальном языке программирования (например, СИ), который позволяет моделировать динамические объекты и имеет доступ к основным функциям операционной системы в виде отдельных подпрограмм или их фрагментов.

Технология комплексной разработки среды, изображенная на рис. 2.5, должна осуществляться на взаимосогласованном эволюционном развитии трех направлений: 1) разработка концепции и теоретических моделей; 2) разработка инструментальных версий; 3) разработка и внедрение приложений в среде.

С одной стороны, такая технология существенно замедляет развитие концепции за счет специфики разработок отдельных

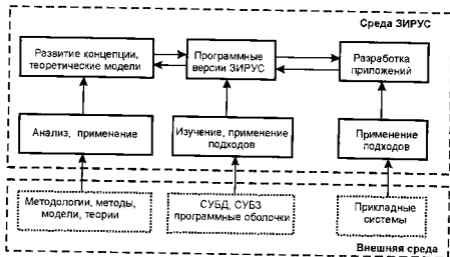


Рис. 2.5. Схема развития среды ЗИРУС.



приложений, с другой — не позволяет разорвать связи между теоретическими исследованиями и практическими разработками, что является важнейшим моментом (по мнению автора) в условиях ограниченных ресурсов разработки.

**2. Модель данных.** Будем моделировать объект  $x \in X = \{x_i\}$  в памяти виртуальной машины (ВМ) в виде  $x \rightarrow (m, t)$ , где  $m = \text{Ext}(M, a, l)$  — экстенд памяти в области  $M$  длиной  $l$  и адресом начала  $a$ ;  $M = (\{b_i\}, i = 1, \dots, N^M)$  — область памяти из последовательности ячеек  $b_i$  (байтов);  $t$  — определяет правила интерпретации экстенда памяти  $m$ .

Определим базис ВМ через тройку  $(E, M, K)$ , где  $E = (e_1, \dots, e_r)$  — список базисных типов ВМ, определяющий возможные интерпретации экстендов памяти, используемых в командах;  $K = (\{k_j(p_1, \dots, p_{n(j)})\}, j = 1, \dots, N^K)$  — множество команд ВМ с параметрами  $p_{j,s} \rightarrow (m_{j,s}, t_{j,s}), t_{j,s} \in E$ . Если ВМ имеет несколько областей памяти  $\{M_i\}$  и определений базисных типов  $\{E_j\}$ , например, для различного типа процессоров, тогда представление объекта  $x$  описывается в виде  $x \rightarrow (\text{Ext}(M_x, a_x, l_x), E_x(e_x))$  и определяется пятью параметрами  $(M, a, l, E, e)$ .

**Определение 1.** Структурный объект  $X = \{x_i\}$  представляется в памяти ВМ в виде  $X \rightarrow (m, T)$ , где  $m = \text{Ext}(M, a, l)$ , а  $T = \{(a, l, t)_i\}$  — список представлений элементарных объектов  $x_i$ , причем  $m_i = \text{Ext}(m_X, a_i, l_i)$ ,  $t_i$  — тип представления объекта  $x_i$ .

**Определение 2.** Структурный объект  $X = (\{x_i\}, i = 1, \dots, n)$  имеет плотное представление в области памяти, если

$$\text{Ext}(M, a_X, l_X) = \bigcup_{i=1}^n \text{Ext}(m_X, a_i, l_i).$$

**Определение 3.** Плотный структурный объект  $X$  назовем сегментом, если его структура имеет вид

$$\begin{aligned} X &\rightarrow (M, V, W); \\ M &\rightarrow (z, r, d); \\ V &\rightarrow (p_1, \dots, p_m), m \geq 0; \\ W &\rightarrow (\{(q_1, \dots, q_n)_i\}, i = 1, \dots, M.r), n \geq 0, m + n \geq 1, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $M$  — метка сегмента, содержащая имя сегмента  $z$ , размерность сегмента  $r = \text{Dim}(X)$ , определяемую метафункцией  $\text{Dim}$ , и дополнительную информацию  $d$  для управления сегментами в оперативной памяти (организация кольцевых списков, признаки состояний редактирования и др.);  $V$  — фиксированная часть сегмента, состоящая из набора базовых элементов  $p_i \rightarrow (m_i, t_i)$ ;  $W$  — переменная часть сегмента для моделирования таблиц данных с элементами  $q_{ji} \rightarrow (m_{ji}, t_{ji})$ . Частными случаями могут быть сегменты  $X^v \rightarrow (M, V)$ ,  $X^w \rightarrow (M, W)$ , в которых отсутствует фиксированная ( $X^w$ ) или переменная ( $X^v$ ) часть. В дальнейшем, для краткости, будем опускать метку  $M$  при описании структур конкретных сегментов.

**Теорема.** Сегмент  $X$  (из определения 3) полностью определяется сегментом  $T$  следующей структуры:

$$\begin{aligned} T &\rightarrow (M, k, \{(t, z, l, d)_i\}, i = 1, \dots, N); \\ N &= m + n, T.k = m, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где  $t_i$  — тип,  $z_i$  — имя,  $l_i$  — длина,  $d_i$  — дополнительные характеристики элемента  $x_i$ , используемые для организации различного вида ссылок.

**Доказательство.** Зададим список  $Y = \{(a, t, l)_i\}$ , описывающий все элементы сегмента  $X$  по следующим правилам. Для фиксированной части

$$Y.t_i = T.t_i, Y.l_i = T.l_i, Y.a_i = \sum_{s=1}^{i-1} T.l_s, i = 1, \dots, m; \quad (2.10)$$

для переменной части

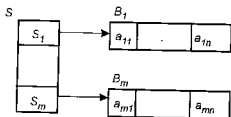
$$Y.t_{i,j} = T.t_{i,j}, Y.l_{i,j} = T.l_{i,j}, \quad (2.11)$$

$$Y.a_{i,j} = l_0 + (i - l)l_z + \sum_{s=m+1}^{j-1} T.l_s, j = m + 1, \dots, N,$$

$$l_0 = \sum_{s=1}^m T.l_s, l_z = \sum_{s=m+1}^N T.l_s, i = 1, \dots, \text{Dim}(X).$$

Таким образом, сегмент  $X$  полностью определен выражениями (2.10)—(2.11). Сегмент  $T$  (2.9) будем называть структурным типом сегмента  $X$  или просто типом сегмента, хотя, в

Рис. 2.6 Пример представления матрицы  $A$ .



общем случае, он может содержать методы, свойства и другую приписываемую в виде атрибутов информацию, а также описание различных интерпретаций моделируемого объекта (в данной работе эти вопросы не рассматриваются).

**Определение 4.** Множество сегментов  $Y = \{X_1, \dots, X_N\}$  назовем сегом, если для него найдены: 1)  $\text{Car}(Y) = X_1$  — головной элемент списка (через метафункцию  $\text{Car}$ ); 2)  $\forall X_i \in Y$  и  $X_i \neq X_1 \Rightarrow \exists X_k = \{x_{kr}\} \in Y$ , содержащий элемент  $x_{kj} \in X_k$  такой, что  $\text{Point}(x_{kj}) \rightarrow X_i$ , где  $\text{Point}$  — метафункция, определяющая указатель на сегмент по значению элемента-параметра. Другими словами, сегги введены для описания структур данных, составленных из множества сегментов, связанных по указателям и определенных внутри сегментов.

**Пример.** Матрицу  $A = \{a_{ij}\}$  с размерностью  $m \times n$  можно представить сегом  $Y = (S, \{B_k\}, k = 1, \dots, m)$ , где структура головного сегмента  $S$  имеет вид  $S = (\{s_i\}, i = 1, \dots, n)$ ,  $\text{Point}(s_i) \rightarrow B_i$ . Структура сега схематично изображена на рис. 2.6. В данном случае матрица  $A$  представлена в виде списка строк, хотя можно было представить ее в виде списка столбцов, причем каждый из них можно выделить как одним сегментом, так и сегом аналогичной структуры (например, в случае большой размерности).

**Определение 5** (для программной реализации). Множество сегментов  $C = \{X_i\}, i = 1, \dots, k$ , связанных указателями (элементы  $X_j$ .  $M.d$ ), назовем кольцом сегментов, если  $\text{Tip}(X_i) = \text{Tip}(X_j) \forall i, j = 1, \dots, k$ . Множество колец сегментов  $Q = \{C_i\}$  назовем пакетом сегментов. Система может состоять из списка пакетов сегментов, схематично изображенных на рис. 2.7. Логические регистры пакетов имеют две ссылки: на типы сегментов и на активные сегменты соответствующих кольцевых списков. Кольца пакетов могут состоять из одного или нескольких сегментов, а также быть пустыми.

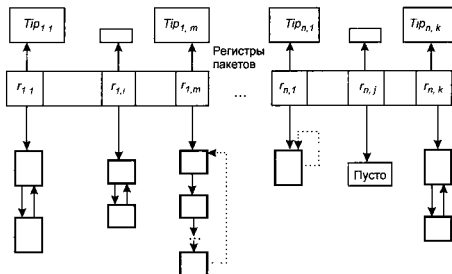


Рис. 2.7. Схема физической организации сегментов ЗИРУС.

3. Модели программ. Логику программы  $P$  универсального процедурного языка программирования  $\Omega$  (например, СИ) можно представить в виде

$$\begin{aligned} P &\rightarrow (G, \{M_i\}); \\ G &= \{g_j\}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $G$  — список глобальных объектов  $g_j$ ;  $M_i$  — модули (функции или процедуры), типовую структуру которых можно представить в виде

$$\begin{aligned} M &\rightarrow (V, R, G^M, L), \\ V &= (v_1, \dots, v_n), \\ R &= (r_1, \dots, r_k), \\ G^M &= (\gamma_1, \dots, \gamma_m) \subseteq G, \\ L &= (\alpha_1, \dots, \alpha_s), \end{aligned} \quad (2.13)$$

где  $V$  — список объектов-параметров;  $R$  — список локальных объектов модуля;  $L$  — список инструкций, описывающих последовательности операций, циклов, разветвлений языка  $\Omega$ .

При моделировании программ среды ЗИРУС на универсальном языке список глобальных объектов  $G = \{g_j\}$  заменяется на список сегментов  $G^z = \{c_j\}$ , а инструкции  $\{\alpha_i\}$  заменяются на  $\{\beta_i\}$  более широкого класса  $\Omega^z$  с добавленными типами операций по обработке сегментов:

Act ( name, tip) — активизирует сегмент с именем name и типом tip;

Gen ( name, tip, len) — генерирует сегмент размерностью len;

Write ( name, name, tip) — записывает сегмент в базу сегментов с именем name;

Free (name, tip) — удаляет сегмент из памяти;

Expand (name, tip, delta) — расширяет сегмент на delta записей;

Guid (name, tip, n) — удаляет запись с номером n в сегменте; и др.

Модели программы (2.12)–(2.13) в среде ЗИРУС будет соответствовать модель

$$\begin{aligned}
 P^z &\rightarrow (G^z, \{M_i\}^z), \\
 G^z &= \{c_j\}B, \\
 M^z &\rightarrow (V^z, R^z, G^{zM}, L^z), \\
 V^z &= (v_1, \dots, v_n), \\
 R^z &= (r_1, \dots, r_k), \\
 G^{zM} &= (\gamma_1, \dots, \gamma_m) \subseteq G^z, \\
 L^z &= (\beta_1, \dots, \beta_s).
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Пусть система содержит программу  $F(p_1, \dots, p_n)$ , реализованную на языке  $\Omega$ . Построим сегменты  $R = (r_1, \dots, r_n)$  и  $S = (s_1, \dots, s_n)$  такие, что  $\text{Tip}(r_i) = \text{Tip}(p_i) = \text{Tip}(s_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Построим функцию  $\varphi(R) = F(r_1, \dots, r_n)$ , на языке  $\Omega$ , вызывающую программу  $F$  с фактическими параметрами, заданными в сегменте  $R$ . Тогда вызов программы  $F(s_1, \dots, s_n)$  эквивалентен последовательности операций

$$\begin{aligned}
 \{S.s_i \rightarrow R.r_i\}, i = 1, \dots, n; \\
 \varphi(R).
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Здесь первая строка означает пересылку значений из сегмента  $S$  в сегменте  $R$  для всех значений определения индекса  $i$ , а вторая вызывает функцию с фактическими параметрами, сформированными в  $R$ . Последовательность (2.15) позволяет организовывать вызов программы  $F$  с произвольными параметрами, задаваемыми в  $S$  без включения дополнительных операторов вызова на языке  $\Omega$ .

Пусть, далее, система содержит список программ  $\{(F_i(p_{i,1}, \dots, p_{i,n(i)}))\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Построим сегмент регистров  $R = (r_1, \dots, r_m)$ ,  $m \geq \max\{n_i\}$  такой, что  $\forall F_i \exists (q_1, \dots, q_{n(i)}) \in R$ , для которых  $\text{Tip}(q_i) = \text{Tip}(p_{i,j}) \quad \forall i = 1, \dots, N$ . Связи между параметрами  $\{p_{i,j}\}$  и регистрами  $\{r_k\}$  зафиксируем в сегменте  $T$  со структурой

$$\begin{aligned} T &= (\{f, p, r\}_s, s = 1, \dots, N^T), \\ T.f_s &\rightarrow F_i, \quad T.p_s \rightarrow p_{i,j}, \quad T.r_s \rightarrow R.r_k, \\ i &= T.f_s, \quad j = T.p_s, \quad k = T.r_s. \end{aligned}$$

Построим функцию  $\varphi$  на языке  $\Omega$  в виде

$$\begin{aligned} \varphi(n) &= (F_1(R.q_{1,1}, \dots, R.q_{1,n}) \leftarrow (n = 1), \dots \\ &\dots \dots \dots \\ &F_N(R.q_{N,1}, \dots, R.q_{N,n}) \leftarrow (n = N)), \end{aligned} \quad (2.16)$$

интерпретируемую как вызов функции  $F_n$  по заданному параметру  $n$ . Построим сег

$$\begin{aligned} Q &= (A, (\{B_i\}, i = 1, \dots, N^Q)), \\ A &\rightarrow (\{b_i\}), \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$B \rightarrow (f, \{p_j\}, j = 1, \dots, n^f), \text{Point}(b_i) \rightarrow B_i,$$

определяющий некоторую программу в виде последовательности вызовов  $F_i$  с различными фактическими параметрами. Интерпретация выполнения этой программы может быть реализована в виде последовательности операций языка  $\Omega$  (ио-тация языка СИ)

$$\text{for}(i = 1; i \leq N^Q; i++) \quad (2.18)$$

{Act( $B_i, A.b_i$ ); /\*Встроенная функция активизации сегмента по указателю\*/ }

for( $j = 1; j \leq n_i; j ++$ )

{ $k = \text{Reg}(T, i, j)$ ; /\*Определение номера регистра из сегмента связей  $T^*$ /\*

$B_i, p_j \rightarrow R.r_k$ ; /\*Заисесние параметров в регистры\*/

$\varphi(B_i, f)$ };

Таким образом, фрагмент программы (2.18), записанный на языке  $\Omega$ , позволяет интерпретировать произвольные последовательности операций, задаваемые в сеге (2.17). Класс представления программ (2.17) можно расширить до универсального, вводя оператор перехода, вызов подпрограмм, описание структуры локальных переменных и модель стека с помощью дополнительных сегментов и видоизменяя соответственно способ интерпретации (2.18).

**4. Язык ОЛФИС.** Технологии разработки программ на базе расширения универсального языка программирования ограничены возможностями транслятора и компоновщика системы, не позволяющих создавать системы из неограниченного количества подпрограмм. На основе описанного в предыдущем разделе подхода к созданию представлений программ разработан язык ОЛФИС, предназначенный для: 1) непоследовательного задания логики программ; 2) задания логико-функциональных зависимостей между сегментами; 3) описания свойств объектов; 4) организации универсальных запросов к базам данных; 5) задания и обработки параллельных алгоритмов. Логика языка ОЛФИС представляется в виде множества однотипных модулей, структура которых изображена на рис. 2.8. Модуль состоит из набора последовательностей арифметических, логических и символьных операций, определенных на термах, описывающих константы, параметры, элементы сегментов данных, имена функций вызовов с фактическими параметрами и последовательности выполнения базисных операций (+, -, \*, /, и др.).

Модуль содержит список сегментных термов, определяющих связи с базой сегментов, и список функциональных термов, определяющих вызовы подчиненных модулей из базы сегментов модулей. В среде реализовано внешнее представление модуля в виде списка условно определенных последовательностей вида (2.16) с включением операторов агрегирования: Sum — суммирование значений выполнения последователь-

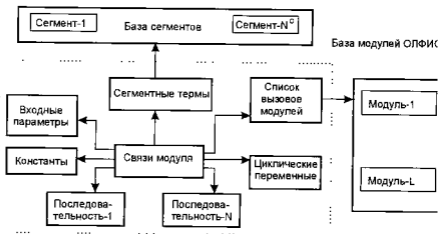


Рис. 2.8. Структура модуля ОЛФИС.

ности на множестве определения индексной переменной  $\text{Max}$ ,  $\text{Min}$  — максимальное и минимальное значения;  $\forall$ ,  $\exists$  — кванторы всеобщности и существования для заданного дискретного множества.

Реализованы несколько встроенных функций и создан механизм для включения дополнительных (например, для повышения быстродействия возможны перевод логики модулей ОЛФИС на базовый язык реализации и подключение их к системе в виде встроенных функций). Основными встроенными функциями языка являются:  $\text{Seg}(C, p, p)$  — для записи расчетного значения  $p$  в поле сегмента  $C.p$ ;  $\text{Olfis}(f)$  — для вызова модуля ОЛФИС, имя которого определяется переменной  $f$ ;  $\text{Zirus}(kom)$  — для вызова команды ЗИРУС по имени  $kom$ , реализованной на базовом языке программирования;  $\text{Comp}(f)$  — для компиляции внешнего представления модуля с именем  $f$  во внутренний код;  $\text{Sin}(x)$ ,  $\text{Cos}(x)$ ,  $\text{Log}(x)$ ,  $\text{Char}(x)$  и др. — для организации математической и символьной обработки данных. Формальное описание логики модуля имеет вид:

$$M \rightarrow (V, W, O, I, Z, \text{Seg}, \text{Func}, \text{Ind}, \Phi),$$

$$V = \{v_i\} = V^R \cup V^C,$$

$$O = \{=, \Sigma, \Pi, \forall, \exists, \text{Min}, \text{Max}, \dots\},$$

$$W = W^q \cup W^p \cup W^{\text{ind}}, \text{Zn}(W^p) = \{0, 1\},$$



$Z = \{z_i\}, z = \{(kom, term_1, term_2, reg)_i\},$   
 $term_1, term_2 \in T = \{t_i\}, reg \in R = \{r_k\},$   
 $kom \in KOM = \{+, -, *, /, **, \&, \wedge, \vee, \neg, \dots\},$   
 $T = Const \cup V \cup W \cup Seg \cup Func \cup Ind \cup R \cup \emptyset,$   
 $Seg = \{(tip, name, pole, ind)_i\},$   
 $Func = \{fun, \{q_j\}_k\}, q_{j,k} \in T,$   
 $fun \in Func^E \cup Func^w,$   
 $Func^w = \{Seg, Olfis, Zirus, Comp, Sin, Cos, Char, \dots\},$   
 $Ind = \{(w^{Ind}, N_1, N_2, u)_i\}, N_1, N_2 \in W^p, u \in W^p,$   
 $w^{Ind} \in W^{Ind},$   
 $\Phi = \{(y, \{(ind^p, o^p, z^p, u^p)_k\})_j\}, ind^p \in Ind \cup \emptyset, o^p \in O,$   
 $z^p \in Z, y \in W, u^p \in W^p \cup \emptyset,$   
 $M$  — модуль ОЛФИС;  
 $V$  — входные параметры ( $V^R$  — числовые,  $V^c$  — символьные);  
 $W$  — локальные переменные ( $W^p$  — функциональные,  $W^p$  — предикаты,  $W^{Ind}$  — индексные);  
 $z$  — логико-алгебраические и символьные выражения;  
 $T$  — термы (Seg — сегментные, Func — функциональные, Ind — индексные);  
Const — константы;  
 $R$  — рабочие регистры;  
Zn() — метафункция, интерпретирующая выходное значение;  
 $O$  — список агрегированных операций;  
Func<sup>E</sup> — имена внешних модулей;  
Func<sup>w</sup> — встроенные функции;  
КОМ — список команд операций;  
tip, name, pole, ind — тип сегмента, имя сегмента, имя поля, индекс записи сегмента.

На языке с открытой структурой представления логики программ легко моделируются различные парадигмы программирования. В качестве примера рассмотрим моделирование объектно-ориентированного подхода. Для некоторого сегмента  $S = \{C_i\}$  построим методы обработки в виде списка модулей

языка ОЛФИС  $L = \{M_j\}$ . Тогда новый сег  $Y = (S, L)$  будет определять объект  $S$  с методами  $L$ . Если под  $S$  будем понимать описание сего, тогда  $Y$  определяет класс объектов. Подкласс можно задать в виде  $Y^R = (Y, S^R, L^R)$ , где  $S^R$  — уточнение структуры данных  $S$ ;  $L^R$  — уточнение методов  $L$ . Инкапсуляция и полиморфизм относятся к внешнему представлению программ и не интересны на логическом уровне представления.

Моделирование континуаций, используемых в языке Scheme [26], может быть осуществлено с помощью введения специального сего состояний стеков интерпретатора ОЛФИС и включения дополнительных встроенных функций для сохранения состояния и перехода в запомненное ранее состояние.

**5. Представление знаний.** Определим логико-функциональную связь (ЛФС) в виде модуля языка ОЛФИС без входных параметров, объектами данных которого являются константы, сегментные термы и локальные переменные. Тогда ЛФС  $L$  определяется списком  $L = (M_1, \dots, M_n)$ , где  $M_1$  — головной модуль без параметров, а остальные модули  $M_i$  — внутренние по отношению к  $M_1$  и не имеют ограничений. Множество  $\{L_i\}$  представляет собой базу знаний (БЗ).

Если  $\{(M_1)_i\}$  являются предикатами, то БЗ  $\{L_i\}$  есть список определений предикатов, используемых для различного вида контролей, например контроля договорных ограничений [25]. Если  $\{(M_1)_i\}$  представляют собой вызовы функций с занесением выходных значений в сегменты, то БЗ  $\{L_i\}$  включает процедурные знания. Если  $\{(M_1)_i\}$  представляют собой условные вызовы функций в виде  $\{\varphi_i \leftarrow u_i\}$ , тогда БЗ  $\{L_i\}$  состоит из продукционных знаний. В общем случае БЗ может содержать все типы представления знаний.

Особым видом представления процедурных знаний является введение понятия состояния сего данных в виде  $R \rightarrow (S, \Phi, F)$ , где  $S$  — сег данных;  $\Phi = \{\varphi_i\}$  — свойства состояния (определения в виде набора предикатов  $\{\varphi_i\}$  на языке ОЛФИС);  $F = \{f_i \leftarrow u_i\}$  — имя модуля ОЛФИС, определяющего способы  $\{f_i\}$  формирования заданного состояния  $R$  при различных состояниях параметров среды, задаваемые предикатами  $\{u_i\}$ . С помощью описания состояний данных  $\{R_i\}$  знания

объединяют программы и данные в сложные иерархические и сетевые структуры. Механизм формирования необходимого состояния данных может быть осуществлен аналогично способу организации интерпретации программ на языке ОЛФИС (обработка иерархических определений).

**6. Формирование и редактирование внешних проекций данных.** Проекция сегмента данных  $C^E$  на внешний уровень представления  $E$  формируется на основе преобразования  $F$ , имеющего вид

$$C^E = F(C, \varphi, s, Q), \quad (2.19)$$

где  $C$  — сегмент данных логического уровня;  $\varphi$  — список параметров формы;  $s$  — сегмент состояния вывода в окне внешнего представления;  $Q$  — сегмент словаря, содержащего связи между именами идентификаторов и ключевых объектов с их логическими представлениями.

При редактировании проекции  $C^E$  выводится список изменений на внешнем уровне представления (например, текст)  $M^E = F_1(C^E)$ . Затем формируется сегмент  $M = \{m_i\}$ , определяющий изменения данных сегмента  $C$ , такой, что  $M = F_2(M^E)$ . Далее, с помощью процедуры  $F_3(C, M)$  формируется новое состояние сегмента  $C^* = F(C, M)$ .

Пусть даны две проекции  $(A, B)$  одного и того же сегмента  $C$ . Преобразование от одной проекции к другой может быть осуществлено процедурами

$$\begin{aligned} A &\rightarrow T(p^A) \rightarrow C \rightarrow T^{-1}(p^B) \rightarrow B, \\ B &\rightarrow T(p^B) \rightarrow C \rightarrow T^{-1}(p^A) \rightarrow A, \end{aligned} \quad (2.20)$$

где  $T(p)$  — процедура трансляции с внешнего представления в модель по заданному сегменту параметров  $p$ ;  $T^{-1}(p)$  — процедура визуализации (обратная процедура к  $T(p)$ ). Таким образом, процедура (2.20) описывает методологию построения преобразований между различными проекциями внешнего уровня через создание модели на логическом уровне и построение универсальных преобразований  $T(p)$ ,  $T^{-1}(p)$ , определяемых сегментом параметров  $p$  и применимых для рассматриваемого сегмента  $C$ .

**7. Реализация программных версий.** На основе описанного подхода к моделированию данных и программ реализована экспериментальная версия среды ЗИРУС, позволяющая создавать приложения различного класса и опробованная в разработке и внедрении систем таких, как: 1) ТРАССА — для

оперативного управления грузоперевозками автотранспортом большого предприятия со сложными ограничениями на режимы работ и способы доставки грузов; 2) "ЗИРУСКабель" — сетевой программный комплекс для управления и учета производства кабельной продукции; 3) "Медстатанализ" — взаимозависанный комплекс программ учета и статистической обработки анкетных данных для медицинских учреждений; 4) "Система интеллектуальной поддержки контроля договорных ограничений" для задач стратегической стабильности [25]; 5) ГИПСАР — гибридная информационно-прогностическая система, основанная на эффективном сочетании быстродействия, надежности, информационной обработки и др.

В среде реализовано несколько инструментальных пакетов для: 1) динамического управления сегментами в оперативной памяти; 2) эффективного доступа и хранения сегментов в базе сегментов; 3) разработки диалоговых компонентов (меню, панелей и др.); 4) редактирования сегментов через стандартные и настраиваемые формы; 5) формирования и управления выводом графиков; 6) преобразований сегментов и реорганизации баз сегментов; 7) создания и подключения подсказок; 8) организации интерфейсов с другими системами (файлы DBF-формата, текстовые) по данным и по управлению; 9) организации демонстрационных роликов и управляемых заставок в процессе выполнения задач; 10) визуализации иерархических и сетевых схем данных. Кроме того, проработаны подходы к реализациям многих других инструментальных средств, не нашедших воплощения из-за ограниченности ресурсов разработчиков (объектный текстографический редактор, система проектирования, различные интерпретаторы и др.).

Разработанные в среде транслятор и интерпретатор языка ОЛФИС позволяют переиспользовать большую часть логики системных библиотек среды, написанных на языке СИ, в модули языка ОЛФИС. На его основе реализован механизм задания логико-функциональных связей и оперативной их интерпретации. Разработан подход к созданию и выполнению программ на языке ОЛФИС с широким распараллеливанием, основанным на информационных связях между сегментами и модулями, фиксируемых в соответствующих сегментах модулей.

Предлагаемый подход к моделированию всех элементов системы в виде совокупности динамически организованных сегментов позволил эффективно реализовать опытную версию

среды ЗИРУС и разработать ряд крупных приложений различного класса небольшой группой разработчиков. Приведенные модели представления данных на логическом уровне обосновывают переход от базового универсального языка программирования среды к принципам создания целого класса интерпретируемых языков, один из которых — язык ОЛФИС, позволяющий моделировать различные парадигмы программирования и являющийся основой представления предикатных, продукционных и процедурных знаний. Разработанная экспериментальная версия среды позволила не только проверить базовые идеи концепции, но и стала основой разработки целого ряда приложений, нашедших применение в практике. Опыт разработки среды ЗИРУС показал, что не конструирование программных компонентов на известном базисе операций сдерживает ее развитие, а поиск, выделение и включение операций стандартного программного обеспечения в этот базис.

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

### 3.1. Разработка системы поддержки принятия решений при выборе вариантов развития электроэнергетической системы в условиях многокритериальности

Электроэнергетические системы (ЭЭС) как элементы инфраструктуры народного хозяйства имеют сильные и разнообразные связи с отраслями производства, в значительной степени определяют условия жизни населения, состояние природной среды и пр.

В настоящее время для обоснования решений по развитию ЭЭС необходимы явный и достаточно полный учет и согласование требований всех заинтересованных в реализации решений сторон. Это определяется современными условиями реформирования экономики России, в том числе: расширением самостоятельности энергосистем, потребителей электроэнергии, поставщиков топлива и др., повышением общественной активности различных групп населения и расширением состава организаций, лиц и групп населения, оказывающих влияние на процесс принятия решений по развитию ЭЭС и др.

Цели и критерии оценки вариантов развития ЭЭС не могут быть сведены к единому экономическому критерию — требуется разработка методики многокритериального анализа вариантов развития ЭЭС, количественно оценивающей разнообразные последствия реализации решений с целью их обоснования, а также соответствующего математического, программного и информационного обеспечения.

В [1] проанализированы методы многокритериального анализа, которые можно применить для данной задачи. На основании методологии принятия решений [2], использующей функции полезности и ценности, разработана схема анализа вариантов развития генерирующих мощностей ЭЭС. В процессе

Этапы анализа вариантов развития

Этап	Содержание и последовательность исследований
1	Анализ проблемы Энергетическая постановка задачи Определение ценностных отношений ЛПР Построение иерархии целей Выявление внешних условий Формирование вариантов развития
2	Формирование наборов критериев Согласование критериев для нескольких ЛПР Выбор шкал и единиц измерения
3	Уточнение критериев Расчет значений критериев для всех вариантов и внешних условий Анализ значений критериев Уточнение состава критериев
4	Оценка вариантов развития ЭЭС Анализ внешних условий Определение вида многокритериальной функции полезности Оценка однокритериальных функций полезности Оценка ценностных соотношений критериев и определение коэффициентов многокритериальной функции полезности
5	Анализ ценности вариантов развития ЭЭС Расчет ценности для каждого варианта и для разных внешних условий Ранжирование вариантов Анализ чувствительности вариантов Анализ ценности для нескольких ЛПР Построение функций ценности для нескольких ЛПР

такого анализа предусматривается принятие решений несколькими ЛПР, имеющими свои ценностные установки.

Цели анализа:

1) уменьшить вероятность того, что будет принято плохое решение;

2) активизировать конструктивное обсуждение проблемы, обеспечить ЛПР аргументацией и документацией для принятия решения.

В результате должны сформироваться взгляды, которые могут быть и неочевидными вследствие сложности проблемы. Этапы анализа вариантов развития показаны в табл. 3.1, рассмотрим их подробнее.

**Этап 1.** В зависимости от ценностных отношений строится иерархия целей с большим обобщением на верхнем уровне и большей детализацией на нижнем.

Происходит анализ иерархии целей, выявление целей, которые легко нормируются, объединение родственных целей, удаление малозначимых целей.

ЛПР определяет те варианты развития, которые будут анализироваться, а также те внешние условия, в которых будут рассматриваться варианты развития.

**Этап 2.** ЛПР перечисляет критерии, строит иерархию критериев, соответствующую иерархии целей. Для целей, у которых нет прямого критерия, выбирается критерий-заместитель который косвенно характеризует степень достижения цели, но не является средством непосредственного ее измерения.

Определяются единицы измерения критериев. Для критериев-заместителей вводятся искусственные шкалы. Для статистических критериев рассматривается возможность их измерения функциями распределения или указывается их разброс. Для выбранных вариантов развития и разных внешних условий определяются значения критериев. Эти значения могут быть рассчитаны на моделях, заданы экспертами.

**Этап 3.** Заполняются таблицы значений критериев для каждого варианта и внешнего условия. Проводится анализ этих таблиц, включающий отказ от незначительных критериев, выбор информации для дальнейшей работы.

**Этап 4.** В зависимости от внешних условий (детерминированных, недетерминированных) строятся разные функции полезности. Многокритериальная функция полезности есть комбинация однокритериальных функций полезности. ЛПР строит свои однокритериальные функции полезности, уточняет их, находит коэффициенты для них. ЛПР определяет коэффициенты многокритериальной функции полезности.

**Этап 5.** Построенные и полностью определенные функции полезности используются для расчета полезности всех вариантов развития ЭЭС. Полученные значения ранжируются по полезности. ЛПР анализирует полученные оценки вариантов развития. На оценки вариантов развития ЭЭС сильно влияют исходные данные. Поэтому ЛПР выполняет анализ чувствительности — получает оценки функции полезности для разных исходных данных и анализирует их. При наличии



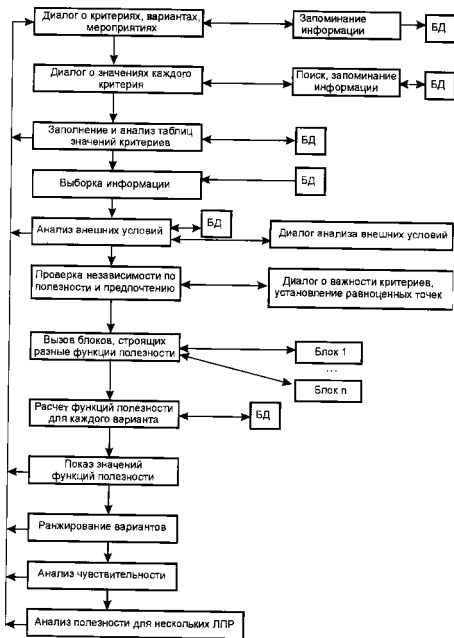


Рис. 3.1. Структура системы поддержки принятия решения для выбора вариантов развития ЭЭС.

нескольких ЛПР строится функция полезности, учитывающая интересы каждого из них, находится компромиссное решение.

Сложность работы по анализу вариантов развития ЭЭС требует использования системы, реализованной на компьютере. Этапы 2—5 автоматизируются. На рис. 3.1 показана предполагаемая структура системы поддержки принятия решения для выбора вариантов развития ЭЭС. Опишем ее более подробно.

В процессе диалога о критериях, вариантах, мероприятиях:

1) вводятся, добавляются и исключаются описания критериев;

2) вводятся, добавляются и исключаются описания вариантов развития ЭЭС;

3) вводятся, добавляются и исключаются описания внешних условий (мероприятий);

4) просматриваются списки описаний критериев, вариантов развития, внешних условий.

Полученная информация запоминается в базе данных (БД). Если в системе имеется информация о критериях, вариантах развития и мероприятиях, то выбираются те варианты развития, которые будут анализироваться.

Для каждого критерия создается таблица значений критериев, разные варианты развития отображаются строками, разные мероприятия — столбцами. В процессе диалога уточняется местонахождение информации о значениях критерия. Она может быть взята из файла, БД или запрошена у ЛПР.

Анализ таблиц значений критериев включает проверку на достаточность информации, на значимость критериев. Если критерий незначителен, то ЛПР сообщается эта информация и данный критерий не рассматривается.

При выборе информации устанавливается диапазон изменения критерия для всех рассматриваемых вариантов развития ЭЭС.

В блоке анализа внешних условий определяется их тип. Для этого используется информация о значениях критериев. Тип внешних условий может быть уточнен в процессе диалога.

В зависимости от типов внешних условий будут вызываться блоки, строящие разные многомерные функции полезности.

Блок проверки независимости по полезности и предпочтению анализирует информацию о важности критерия для ЛПР и о равноценных точках для пар критериев, находящихся

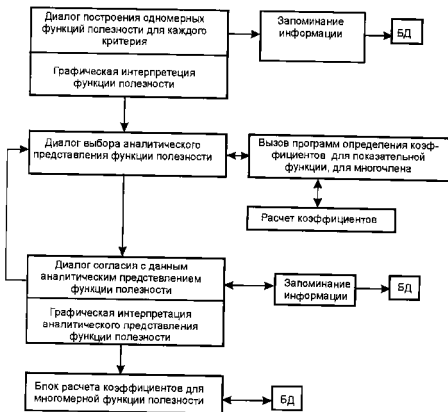


Рис. 3.2. Структура блока расчета функции полезности.

рядом по важности. Структуры блоков, строящих разные многомерные функции полезности в системе, будут в основном идентичны. Пример структуры одного блока показан на рис. 3.2. Для каждого критерия строится одномерная функция полезности. Диапазон изменения ее значений  $[0, 1]$ . Она строится в процессе диалога с ЛПР, когда он указывает несколько ее значений для данного критерия. Крайние значения критериев выбираются из БД. В процессе диалога уточняется предпочтение ЛПР к выбору детерминированных значений или лотерей и делается вывод о склонности или несклонности ЛПР к риску. Эта информация используется на следующем этапе для построения аналитического вида функции полезности (выпуклой, вогнутой). Информация, полученная в процессе диалога, запоминается в БД. На экране

терминала показывается кусочно-линейный вид функции, проходящей через точки, указанные ЛПР. Для такой кусочно-линейной функции подбирается непрерывная функция (показательная или многочлен). Определяются аналитическое представление этой функции и значения ее коэффициентов.

На экране терминала показываются кусочно-линейная функция и полученная непрерывная функция. У ЛПР выясняется согласие с таким видом функции полезности. При несогласии он строит другой вид функции. Процедура построения одномерных функций полезности выполняется для каждого критерия. Коэффициенты для многомерной функции полезности вычисляются на основе информации о важности критериев и о равноценных точках для пар критериев, полученной ранее. Строится и решается система уравнений для вычисления коэффициентов.

Таким образом, полностью определяется аналитическое представление многомерной функции полезности. Диапазон изменения ее значений  $[0, 1]$ .

Блок расчета функции полезности для каждого варианта развития (рис. 3.1) вычисляет значения функций полезности. Эти значения в виде таблицы предоставляются ЛПР.

В блоке ранжирования вариантов упорядочиваются варианты развития по значениям функции полезности и ЛПР предлагается проанализировать полученные результаты.

Блок анализа чувствительности позволяет ЛПР изменять коэффициенты многомерной функции полезности и подсчитывать новые значения функции полезности вариантов развития, показывать эти значения ЛПР.

Блок анализа полезности для нескольких ЛПР позволяет строить функцию полезности как объединение функций полезности каждого ЛПР. По этой объединенной функции полезности оцениваются варианты развития ЭЭС.

Реализацию предполагается выполнять в системе Delphi — компилирующей визуальной среде разработки прикладных программ Windows.

### 3.2. Многокритериальный анализ развития электроэнергетики в нечеткой среде

Обоснование долговременной стратегии развития ЭЭС сопряжено с необходимостью разработки долгосрочных прогнозов показателей внешних условий, главным образом в части связей с топливно-энергетическим комплексом, региональными производственными системами, социальной сферой и природной средой. В силу ряда объективных причин этим показателям свойственна существенная неопределенность, возрастающая по мере увеличения заблаговременности прогнозов.

В складывающихся условиях весьма важна разработка комплексного методического подхода к учету свойств неопределенности и многокритериальности региональных задач. При этом можно рассматривать многокритериальность как одну из форм проявления неопределенности условий развития и функционирования ЭЭС (неопределенность целей).

Авторами предлагается использовать методы теории нечетких множеств для решения задачи выбора в условиях неопределенности и многокритериальности.

При решении задачи полагаем, что множество альтернатив  $X$  и множество критериев  $K$  являются четкими (обычными) и конечными, а критериальные оценки альтернатив — нечеткими подмножествами универсальных множеств оценок, представляющими собой формализацию нечеткого понятия "значение оценки альтернативы близко к  $a$ ". Разработанный алгоритм многокритериального анализа основывается на следующих условиях: пусть задано  $n$  альтернатив и выбор необходимо осуществить по  $m$  критериям. Оценки альтернатив по критериям задаются значением ( $a$ ), доверительным интервалом ( $d$ ) и граничным значением функции принадлежности ( $\alpha$ ).

Нечеткое значение оценки описывается функцией принадлежности вида

$$f(x) = \exp [b(x - c)^2].$$

Коэффициенты функции определяются из условий

$$f(a) = 1, f(a \pm d) = \alpha.$$

На основании этой информации по всем критериям находятся бинарные нечеткие отношения предпочтения, которые

ввиду конечности множества альтернатив можно записать в виде квадратной матрицы.

Значения элементов матрицы нечеткого отношения предпочтения рассчитываются по формуле

$$r_{ij}^k = \sup_{x_i, x_j \in X} [\min \{\mu_i^k(x_i), \mu_j^k(x_j), \mu_R^k(x_i, x_j)\}],$$

где  $\mu_i^k(x_i)$ ,  $\mu_j^k(x_j)$  — функции принадлежности оценок  $i$ -й и  $j$ -й альтернатив по критерию  $k$ ;  $\mu_R^k(x_i, x_j)$  — значение функции принадлежности отношения предпочтения для  $i$ -й и  $j$ -й альтернатив.

В задачах энергетики чаще всего отношение предпочтения можно привести к обычному порядку ( $\leq$ ), тогда формула упрощается и принимает вид

$$r_{ij}^k = \sup_{\substack{x_i, x_j \in X \\ x_i \geq x_j}} [\min \{\mu^k(x_i), \mu^k(x_j)\}].$$

Из этой формулы следует, что если максимум функции принадлежности  $i$ -й альтернативы находится правее, то  $r_{ij}^k = 1$ , в противном случае  $r_{ij}^k = \mu_i(x_{\alpha})$ , где  $x_{\alpha}$  — абсцисса точки пересечения функций принадлежности рассматриваемых альтернатив.

Таким образом, будут получены матрицы нечетких отношений предпочтения по всем критериям:

$$\mu_R(x, y) = \begin{vmatrix} 1 & \mu_R(x_1, x_2) & \dots & \mu_R(x_1, x_n) \\ \mu_R(x_2, x_1) & 1 & \dots & \mu_R(x_2, x_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_R(x_m, x_1) & \mu_R(x_m, x_2) & \dots & 1 \end{vmatrix}$$

Для выбора рациональной альтернативы в настоящей работе используется алгоритм, предложенный С.А. Орловским [3].

1. Строятся нечеткие отношения  $F$  и  $Q$ , определяющие множество эффективных альтернатив и ранжировку альтернатив в этом множестве соответственно:

$$\mu_F(x, y) = \min \{\mu_1(x, y), \dots, \mu_m(x, y)\},$$

$$\mu_Q(x, y) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \mu_i(x, y).$$

2. Определяются нечеткие подмножества недоминируемых альтернатив в указанных множествах:

$$\mu_F^{\text{НД}}(x) = 1 - \sup_{y \in X} [\mu_F(y, x) - \mu_F(x, y)],$$

$$\mu_Q^{\text{НД}}(x) = 1 - \sup_{y \in X} [\mu_Q(y, x) - \mu_Q(x, y)].$$

3. Находится пересечение множеств  $\mu_F^{\text{НД}}$  и  $\mu_Q^{\text{НД}}$ :

$$\mu^{\text{НД}}(x) = \{\mu_F^{\text{НД}}(x), \mu_Q^{\text{НД}}(x)\}.$$

4. Рациональным считаются выборы альтернатив из множества

$$X^{\text{НД}} = \{x \in X \mid \mu^{\text{НД}}(x) = \sup_{x' \in X} [\mu^{\text{НД}}(x')]\}.$$

Иначе говоря, решение задачи есть альтернатива с максимальной степенью недоминируемости.

Следует отметить, что в зависимости от типа задачи рациональными могут считаться не только альтернативы из множества  $X^{\text{НД}}$ , но и в том или ином смысле слабо доминируемые альтернативы, которые принадлежат множеству  $\mu^{\text{НД}}$  со степенью не ниже некоторой заданной.

С применением приведенной методики многокритериального анализа авторами выполнены расчеты по выбору вариантов концентрации генерирующей мощности угольной станции в ЕЭС России. В качестве критериев рассмотрено три показателя

Таблица 3.2

Исходные данные для многокритериального анализа вариантов концентрации генерирующей мощности в ЕЭС России

Вариант	Установленная мощность электростанции, ГВт	Удельные затраты, руб./кВт	Удельная земельность, га/МВт	Удельная численность ППР, чел./МВт
1	1.6	160.7±1.3	0.421±0.021	0.880±0.044
2	4.0	167.5±5.4	0.392±0.020	0.480±0.024
3	6.4	173.3±8.6	0.370±0.019	0.410±0.020
4	8.8	186±15.1	0.370±0.019	0.410±0.020
5	11.2	192.4±18.0	0.370±0.019	0.410±0.020
6	13.6	199.6±20.7	0.370±0.019	0.410±0.020

Результаты многокритериального анализа вариантов концентрации генерирующих мощностей

Вариант	Установленная мощность, ГВт	Оценка недоминируемости		
		минимальная	максимальная	средняя
1	1.6	0.333	1.000	0.604
2	4.0	0.301	0.327	0.327
3	6.4	0.667	1.000	0.990
4	8.8	0.484	0.484	0.484
5	11.2	0.305	0.305	0.305
6	13.6	0.156	0.156	0.156

теля: удельные затраты, удельная землеемкость, удельная численность промышленно-производственного персонала. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.2.

Задача решалась при условии, что критериальный вес варьируется, но не может быть ниже 0.15 ( $0.15 \leq \lambda_i \leq 0.85$ ). При этом решение принимается по среднему значению оценки по всем вариациям соотношений критериальных весов. Результаты анализа представлены в табл. 3.3.

Наиболее эффективна третья альтернатива с установленной мощностью станции ( $N_y = 6400$  МВт). Такой результат полностью совпадает с выводами, полученными в [4], где на основе этой же исходной информации проводился анализ эффективности альтернатив другими методами.

С применением данного метода решались также задачи выбора направлений технического перевооружения и энергосбережения.

### 3.3. Об использовании электромеханических аналогий

Закономерности протекания многих различных по своей природе явлений в математической форме описываются аналогичными по структуре уравнениями. Аналогия уравнений позволяет изучать одни явления с помощью других в тех случаях, когда это удобнее, доступнее, быстрее.

В настоящей работе обсуждается вопрос использования электромеханических аналогий в задачах моделирования и исследования устойчивости механических и электрических систем.



Будем рассматривать в качестве механических системы твердых тел с голономными связями, находящиеся под действием потенциальных и непотенциальных сил. Приложением для таких систем являются задачи гироскопии, робототехники, космических исследований.

Движение механических систем со связями описывается уравнениями Лагранжа 2-го рода, которые представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Для их построения требуется знание функции Лагранжа (сумма кинетической энергии и силовой функции) и непотенциальных обобщенных сил. Для механической системы с  $n$  степенями свободы функция Лагранжа имеет следующую структуру:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n a_{i,j}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + \sum_{i=1}^n b_i(q) \dot{q}_i + T_0(q) + U(q),$$

где первые три члена соответствуют кинетической энергии, а  $U(q)$  — силовая функция потенциальных сил;  $q = (q_1, \dots, q_n)$  — независимые переменные, описывающие положение механической системы в пространстве конфигураций;  $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n$  — производные по  $t$  от этих переменных.

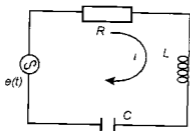
Уравнения движения в форме уравнений Лагранжа 2-го рода имеют вид

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = - \frac{\partial \tilde{R}}{\partial \dot{q}_i} + Q_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Здесь  $\frac{\partial \tilde{R}}{\partial \dot{q}_i} + Q_i$  — непотенциальные силы. Первое слагаемое в выражении соответствует диссипативным силам, определяемым функцией Рэля.

В качестве примера рассмотрим пружинный маятник, совершающий колебательное движение в вертикальной плоскости под действием силы  $f(t)$ . Пусть  $M$  — масса тела,  $K$  — коэффициент упругости пружины,  $B$  — коэффициент сопротивления,  $x$  — смещение. Функция Лагранжа  $L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 - \frac{1}{2} K x^2$ , функция Рэля  $\tilde{R} = \frac{1}{2} B \dot{x}^2$ . Уравнение колебаний маятника  $M\ddot{x} + Kx = -B\dot{x} + f(t)$ .

В соответствии с электромеханическими аналогиями [5] электрическим аналогом данной механической системы являет-



ся колебательный контур (рис. 3.3), дифференциальное уравнение которого имеет аналогичную структуру:

$$L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} = e(t).$$

Это уравнение можно получить описанным выше способом, если сопоставить с обобщенной координатой заряд конденсатора  $q$ , массой — коэффициент индукции  $L$ , коэффициентом упругости —  $\frac{1}{C}$  ( $C$  — емкость конденсатора), коэффициентом сопротивления, — омическое сопротивление  $R$ , силами, действующими на систему, — источник напряжения  $e(t)$ .  $\tilde{L} = \frac{1}{2} L\dot{q}^2 + \frac{1}{2C} q^2$  — функция Лагранжа колебательного контура, функция Рэля  $\tilde{R} = \frac{1}{2} R\dot{q}^2$ .

Указанный способ позволяет строить уравнения и более сложных линейных  $RLC$ -цепей. Здесь же возникает задача построения электрического аналога механической системы по известной функции Лагранжа последней. Для примера рассмотрим движение симметричного твердого тела на струне в центральном поле сил. В качестве

$$\begin{aligned} L = & Ml^2(\dot{\chi}^2 + \dot{k}^2) + A(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2) + 4lz_G\dot{k}\dot{\psi} + \\ & + Mlg_0^{**}(\chi^2 + k^2) + [\mu(A - C) + Mg_0^*z_G](\theta^2 + \\ & + \psi^2) + \frac{2}{3}\mu Mlz_Gk\psi + \frac{2}{3}\mu Mlz_G\chi\theta \end{aligned}$$

возьмем квадратичную часть разложения функции Лагранжа задачи в окрестности перманентного вращения рассматриваемой системы вокруг "вертикали". Такому заданию  $L$  соответствуют уравнения первого приближения.

$\chi$  и  $k$  — углы, определяющие положение струны;  $\theta$  и  $\psi$  — углы, определяющие положение тела с точностью до вращения вокруг оси симметрии;  $M$  — масса тела;  $A, C$  — моменты

позволяет перенести методы анализа механических систем на аналогию в описании механических и электрических систем. Аналогия более легкой задачей, чем механических.

Оказывается более легкой задачей, чем механических. Число подобных задач можно увеличить. Важно подчеркнуть, что измерение характеристик электрических систем часто таких семейств выбирается, если их несколько.

стапонарных движении, если оно существует, и какое из остается ли система в окрестности более сложного семейства, стационарных движений. Здесь важно, например, проследить, потери устойчивости на границе семейства устойчивых ста- анализа переходного процесса механической системы после электрических цепей представлять особый интерес для

Задача моделирования механических систем с помощью

$$C'' = C', C'' = \frac{C_1 + 2C_3}{2C_1C_3}, C''' = C'' = \frac{C_1 + 2C_3}{2C_1C_3}, C'' = C', C'' = C', C'' = 2C_3.$$

на рис. 3.4, где  $L_1 = L' + L$ ,  $L_2 = L'' + L$ ,  $L = \frac{1}{2}L_3$ , ющихся геометрической структурой, одна из них представлена  $L$  соответствует несколько электрических цепей, различа-

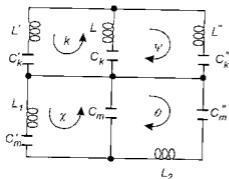
$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}L_1(\chi^2 + k_2) + \frac{1}{2}L_2(\theta^2 + \psi^2) + \frac{1}{2}L_3k\psi + \\ & + \frac{1}{2}L_1(\chi^2 + k_2) + \frac{1}{2}L_2(\theta^2 + \psi^2) + \frac{1}{2}L_3k\psi + \\ & + \frac{1}{2}L_1(\chi^2 + k_2) + \frac{1}{2}L_2(\theta^2 + \psi^2) + \frac{1}{2}L_3k\psi + \end{aligned}$$

рассматриваемой механической) получаем функцию Ларанжа электрической системы (аналог

$$\begin{aligned} Ml^2 - \frac{1}{2}L_1A = \frac{1}{2}L_2, 4Mlz_G = \frac{1}{2}L_3, Mlg_0^* = \frac{1}{2}C_1, \\ \mu(A - C) + Mlg_0^* = \frac{1}{2}C_2, \frac{3}{2}Mlz_G = \frac{1}{2}C_3 \end{aligned}$$

Переоформлением коэффициентов

тяжести.  $g_0^* = \left( g_0 + \frac{3}{2}lz_G + \mu l \right)$ ,  $g_0^* = g_0 + \frac{3}{2}lz_G + \frac{3}{2}\mu l$ ,  $g_0$  — ускорение силы коэффициент, характеризующий центральность сил;  $g_0^* =$  инерции тела;  $z_G$  — координаты центра тяжести тела;  $\mu$  —



электрические, и наоборот. В первую очередь речь здесь идет о задаче исследования устойчивости.

Исследование устойчивости линейных систем существенно "проще" аналогичной задачи для нелинейных дифференциальных уравнений. Здесь, например, всегда

из устойчивости однородной системы следует устойчивость неоднородной. Это позволяет при моделировании "линейного" объекта строить не полную, а упрощенную модель. Например, не учитывать элементы цепи, вносящие свой вклад только в неоднородную часть линейной модели. Из свойств линейных систем также следует, что устойчивость тривиального решения гарантирует устойчивость любого другого решения.

Для анализа нелинейных цепей с помощью классических методов качественного исследования (например, метода Ляпунова) удобно использовать описание цепи в форме, предлагаемой в [6, 7].

Здесь  $RLC$ -цепи (нелинейной) ставится в соответствие смешанный потенциал  $P(i, v)$ ,  $i$  — вектор токов,  $v$  — вектор напряжений.

Сами уравнения в этих терминах принимают вид

$$L_k(i_k) \frac{di_k}{dt} = \frac{\partial P}{\partial i_k}, \quad k = 1, \dots, r,$$

$$C_l(v_l) \frac{dv_l}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial v_l}, \quad l = r + 1, \dots, s, \quad (3.2)$$

где  $L_k(i_k)$  — индуктивность;  $C_l(v_l)$  — емкость;  $P(i, v) = \int \sum_{\mu=r+1}^s v_\mu di_\mu + \sum_{i=r+1}^{r+s} i_i v_i$ ;  $r$  — кривая в пространстве токов и напряжений электрической цепи, вдоль которой для токов и напряжений выполняются законы Кирхгофа.

В [6] для класса "полных" электрических цепей приводится процедура построения смешанного потенциала по графу цепи. Для этого вводится понятие "полной" электрической цепи.

Согласно [6], электрическая цепь называется "полной", если множество  $i_1, \dots, i_r; u_{r+1}, \dots, u_{r+s}$  "полное";  $i_1, \dots, i_r$  — токи в индукторах;  $u_{r+1}, \dots, u_{r+s}$  — напряжения на конденсаторах.

Множество переменных  $i_1, \dots, i_r; u_{r+1}, \dots, u_{r+s}$  называется "полным", т.е. полностью описывает состояние электрической цепи, если  $i_1, \dots, i_r; u_{r+1}, \dots, u_{r+s}$  выбраны независимо и без нарушения законов Кирхгофа.

Для конструирования "полного" множества предлагается следующая процедура:

1) выделить в графе цепи максимальное дерево  $\tau$  с множеством связей  $\alpha$ ;

2) в  $\tau$  выделить поддерево  $\tau'$  с множеством связей  $\alpha'$ .

Тогда токи  $i_1, \dots, i_r$  в ветвях  $\alpha - \alpha'$  вместе с напряжениями  $u_{r+1}, \dots, u_{r+s}$  в ветвях  $\tau'$  образуют "полное" множество переменных. Согласно [6], это справедливо для  $r = 0, s > 0; r > 0, s = 0; rs > 0$ .

Смешанный потенциал для "полных" электрических цепей вычисляется по формуле

$$P(i^*, v^*) = F(i^*) - G(v^*) + (i^*, \gamma \cdot v^*),$$

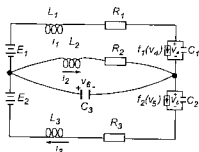
где  $i^* = (i_1, \dots, i_r)$  — токи в индукторах;  $v^* = (u_{r+1}, \dots, u_{r+s})$  — напряжения на конденсаторах;  $\gamma = (\gamma_{\rho\sigma})$  — матрица  $r \times s$ ,  $\gamma_{\rho\sigma} = +1, -1, 0$ ;

$$F(i^*) = \sum_{\mu > r+s, \Omega_i} \int v_{\mu} di_{\mu}, \quad G(v^*) = \sum_{\mu > r+s, \Omega_v} \int i_{\mu} dv_{\mu},$$

$$(i^*, \gamma \cdot v^*) = \sum_{\rho=1}^r i_{\rho} \sum_{\Lambda_{\rho} \cap \tau'} \pm v_{\sigma}, \quad (3.3)$$

$\Omega_i$  — множество ветвей цепи с токами  $i_1, \dots, i_r$ ;  $\Omega_v$  — множество ветвей цепи с напряжениями  $u_{r+1}, \dots, u_{r+s}$ ;  $\Lambda_{\rho}$  — контур, образуемый ветвями из  $\alpha - \alpha'$  и  $\tau'$ ;  $v_{\sigma}$  — напряжение в ветвях  $\tau'$  из  $\tau' \cap \Lambda_{\rho}$ ;  $i_{\rho}$  — контурный ток в  $\Lambda_{\rho}$ .

При нарушении условия "полноты" в цепь, чтобы сделать ее "полной", добавляют индукторы (последовательным соединением) и конденсаторы (параллельным соединением) и рассматривают исходную цепь как частный случай вновь полученной.



Рассмотрим вычисление смешанного потенциала на примере электрической цепи вида (рис. 3.5). Нелинейными характеристиками здесь являются токи  $f_1(v_4)$ ,  $f_2(v_5)$ .

Выберем в качестве переменных состояния цепи токи  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  в индукторах  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и напряжения  $v_4$ ,  $v_5$ ,  $v_6$  на конденсаторах  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . Проверим, является ли выбранное множество "полным".

Максимальное дерево  $\tau$  состоит из ветвей {4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13},  $\tau' = \{4, 5, 6\}$ ,  $\alpha' = \{7, 8\}$ ,  $\alpha - \alpha' = \{1, 2, 3\}$ .

Так,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $v_4$ ,  $v_5$ ,  $v_6$  образуют "полное" множество и для вычисления смешанного потенциала можно применить описанную выше процедуру.

Вычислим функции  $F(i_1, i_2, i_3)$ ,  $G(v_4, v_5, v_6)$ . Здесь  $\Omega_i = \{1, 2, 3, 9, 10, 11, 12, 13\}$ . Согласно (3.3),  $F(i_1, i_2, i_3)$  вычисляется только для элементов сопротивления и источников напряжения, через которые текут токи  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ , т.е. ветвей {9, 10, 11, 12, 13}:

$$F(i_1, i_2, i_3) = -\frac{1}{2} R_2 i_2^2 + E_2 i_2 - \frac{1}{2} R_3 i_3^2 + E_1 i_1 - \frac{1}{2} R_1 i_1^2.$$

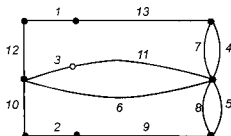
Аналогично,  $\Omega_v = \{4, 5, 6, 7, 8\}$  — множество ветвей с напряжениями  $v_4$ ,  $v_5$ ,  $v_6$ . Из них выбираем ветви с элементами сопротивления — {7, 8}:

$$G(v_4, v_5, v_6) = -\int_0^{v_4} f_1(v) dv - \int_0^{v_5} f_2(v) dv.$$

Для вычисления  $(i^*, \gamma \cdot v^*)$  построим контуры  $\Lambda_1 = \{1, 13, 4, 6, 12\}$ ,  $\Lambda_2 = \{2, 10, 6, 5, 9\}$ ,  $\Lambda_3 = \{3, 11, 6\}$  и рассмотрим пересечения их с  $\tau'$ .  $\Lambda_1 \cap \tau' = \{4, 6\}$ ,  $\Lambda_2 \cap \tau' = \{6, 5\}$ ,  $\Lambda_3 \cap \tau' = \{6\}$ .

Тогда, согласно (3.3),  $(i^*, \gamma \cdot v^*) = i_1(-v_4 + v_6) + i_2(-v_6 - v_5) + i_3(v_6)$  и смешанный потенциал

Рис. 3.6. Граф цепи.



$$\begin{aligned}
 P(i^*, v^*) = & E_1 i_1 + E_2 i_2 - \frac{1}{2} R_1 i_1^2 - \frac{1}{2} R_2 i_2^2 - \\
 & - \frac{1}{2} R_3 i_3^2 + \int_0^{v_4} f_1(v) dv + \int_0^{v_5} f_2(v) dv - i_1 v_4 + \\
 & + i_1 v_6 - i_2 v_6 - i_2 v_5 + i_3 v_6.
 \end{aligned}$$

Смешанный потенциал можно использовать, кроме задачи составления дифференциальных уравнений цепи, также при качественном исследовании названных уравнений как аналог функции Ляпунова. Для таких исследований нужно подсчитать полную производную по времени от  $P$  в силу дифференциальных уравнений (3.2):

$$\frac{dP}{dt} = (x', P_x),$$

где  $x'$  — полный вектор переменных  $i, v$ , и проверить знакоопределенность указанных  $P$  и  $\frac{dP}{dt}$  в соответствии с теоремами Ляпунова.

Для моделирования и качественного исследования механических систем и электрических цепей создается комплекс программ. В качестве инструмента программирования используется система символьных вычислений *Mathematica*.

Системы символьных вычислений (компьютерной алгебры) разрабатывались специально для выполнения операций над математическими выражениями. В частности, *Mathematica* может выполнять арифметические операции над математическими выражениями, упрощение выражений, постановки и т.п. В *Mathematica* имеется богатый набор встроенных функций для решения задач алгебры и анализа: вычисление определителей, обращение матриц, решение систем линейных алгеб-

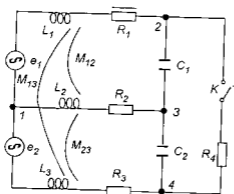


Рис. 3.7.

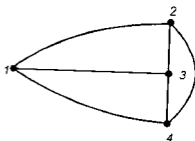


Рис. 3.8. Граф цепи.

раических уравнений, для нелинейных применяется метод базисов Гребнера, дифференцирование, интегрирование и т.п.

Система имеет Си-подобный входной язык, который позволяет создавать собственные программы. На языке системы символьных вычислений *Mathematica* написаны программы построения в символьном виде функции Лагранжа, Рэля и дифференциальных уравнений произвольной линейной электрической цепи.

Для примера рассмотрим моделирование электрической цепи, изображенной на рис. 3.7.

Катушки индуктивности  $L_1, L_2, L_3$  связаны индуктивно;  $M_{12}, M_{23}, M_{13}$  — коэффициенты взаимной индукции.

Электрическая цепь представляется в виде графа (рис. 3.8) и это представление используется для разбиения цепи на контуры, выбора в качестве независимых переменных контурных токов и вывода дифференциальных уравнений цепи.

Описание графа цепи для ввода в программу:

$\{ \{ \{1, 2\}, \{L_1, R_1, e_1, M_{12}, M_{13}\}, \{ \{2, 3\}, \{C_1\}, \{ \{1, 3\}, \{L_2, R_2, M_{12}, M_{23}\}, \{ \{3, 4\}, \{C_2\}, \{ \{1, 4\}, \{L_3, R_3, e_2, M_{23}, M_{13}\}, \{ \{2, 4\}, \{R_1\} \} \} \}$ .

1, 2, 3, 4 — номера узлов цепи, а значения, стоящие во внутренних фигурных скобках, — ветви  $i, j$  и принадлежащие этим ветвям элементы.

Ниже приведены результаты работы программ.

Выделены контуры:

$\{ \{1, 2\}, \{2, 3\}, \{3, 1\} \}$  — первый контур,

$\{ \{3, 4\}, \{4, 1\}, \{1, 3\} \}$  — второй контур,



{ {2, 4}, {4, 3}, {3, 2} } — третий контур.

Функция Лагранжа:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} L_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} L_2 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} L_3 \dot{q}_2^2 + M_{12} \dot{q}_1 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - \\ & - M_{23} \dot{q}_2 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - M_{13} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + e_1 q_1 + \\ & + e_2 q_2 - \frac{1}{2C_1} (q_1 - q_2)^2 - \frac{1}{2C_2} (q_2 - q_3)^2. \end{aligned}$$

Функция Рэля:

$$\frac{1}{2} R_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} R_3 \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} R_2 (\dot{q}_2 - \dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} R_4 \dot{q}_3^2.$$

Уравнения цепи в форме уравнений Лагранжа 2-го рода:

$$\begin{aligned} (L_1 + L_2 - 2M_{12})\ddot{q}_1 + (-L_2 + M_{12} - M_{13} + M_{23})\ddot{q}_2 + \\ + R_1 \dot{q}_1^2 - R_2(-\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \frac{q_1}{C_1} - \frac{q_3}{C_1} = e_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (-L_2 + M_{12} - M_{13} + M_{23})\ddot{q}_1 + (L_2 + L_3 - 2M_{23})\ddot{q}_2 + \\ + R_3 \dot{q}_2^2 + R_2(-\dot{q}_1 + \dot{q}_2) - \frac{q_2}{C_2} - \frac{q_3}{C_2} = e_2, \end{aligned}$$

$$R_4 \dot{q}_3^2 - \frac{q_1}{C_1} - \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_1} + \frac{q_3}{C_2} = 0.$$

Программный комплекс включает программы качественного исследования построенных дифференциальных уравнений: составление характеристического уравнения, выписывание условий Рауса — Гурвица для исследования асимптотической устойчивости и т.д.

### 3.4. О некоторых вопросах обеспечения управляемости ЭЭС (алгоритмы, реализация)

Рассматриваются подходы к разработке и реализации программного и алгоритмического обеспечения для поддержки процедур обеспечения управляемости ЭЭС для ее установленных состояний. Под управляемостью ЭЭС понимается способность системы сохранять требуемые показатели надежности и качества электроснабжения потребителей для заданно-

го списка расчетных возмущений благодаря достаточности средств управления в определенной области, называемой областью управляемости (ОУ).

Решение проблемы обеспечения управляемости ЭЭС связано с необходимостью последовательного решения совокупности задач анализа и синтеза установившихся режимов (УР), формулируемых как задачи нелинейного программирования, в которых требования к качеству и надежности электроснабжения описываются системой ограничений неравенств. Целью решения задач является выявление ситуации несовместности данной системы ограничений и выбор средств управления для ее устранения. Процесс решения данных задач весьма трудоемок. Для всестороннего рассмотрения проблемы требуется проведение многочисленных расчетов как при проектировании, так и при эксплуатации ЭЭС. Поэтому необходимо привлечение производительных ЭВМ, а также разработка и совершенствование программного обеспечения, которое должно иметь развитые функциональные и сервисные возможности для формирования и решения указанной совокупности задач.

**Описание средств поддержки обеспечения управляемости.** Для решения указанных задач предлагается использовать программно-вычислительный комплекс (ПВК) СДО-6 [8], который имеет в своем составе широкий набор средств подготовки, обработки и отображения информации о параметрах ЭЭС и организации сложных расчетов. ПВК содержит развитые средства для интерактивного взаимодействия с пользователем и обширный состав процедур для решения задач анализа и синтеза режимов ЭЭС. Приведем краткое описание возможностей ПВК. Для этого предварительно рассмотрим укрупненную структуру построения ПВК, которая содержит два основных блока — блок базисных функций и блок редакторов. Под редактором здесь понимается программное средство, позволяющее в диалоговом режиме проводить отображение, коррекцию и сохранение данных. Приведем краткое описание блоков и их составляющих.

*Блок базисных функций* содержит набор процедур для получения решения задач анализа и синтеза как последовательности решения вспомогательных подзадач. Указанные функции обеспечивают получение решения систем нелинейных уравнений большого порядка на основе методов ньютоновского типа с продолжением по параметру [9]; систем линейных

уравнений, используя методы Гаусса и Холецкого; систем линейных ограничений неравенств и задач параметрического квадратичного программирования с противоречивыми условиями на базе методов внутренних точек Дикина и прямо-двойственного метода Гольдфарба [10]; задач нелинейного программирования, применяя метод приведенного градиента; систем уравнений для построения уравнения регрессии и двойственных оценок для активных ограничений неравенств.

*Блок редакторов* состоит из редактора данных (архивация, корректировка), редактора заданий на расчет, редактора моделей элементов и режимов ЭЭС, редактора задач, редактора результатов расчета, редактора анализа.

Приведем более подробное описание редакторов.

**Редактор заданий** на расчет обеспечивает возможность выполнения практически любой последовательности функций, входящих в состав блоков в пакетном режиме.

**Редактор моделей элементов и режимов ЭЭС.** Позволяет моделировать различные установившиеся состояния ЭЭС и формировать различные по точности описания состояния ЭЭС модели режимов, которые описываются соответствующими системами нелинейных уравнений. Редактор содержит средства преобразования моделей режима, которые позволяют уменьшать их размерность и повышать численную устойчивость выполнения базисных функций. Для этого применяются специально разработанные алгоритмы адаптивного эквивалентирования и агрегирования моделей режима [11]. Реализованы возможности задания и использования следующих моделей режима ЭЭС: полная модель установившегося режима (УР); упрощенная модель УР с неполным учетом взаимосвязи между потокораспределением активной и реактивной мощностей; полная и упрощенная модели УР с учетом изменения частоты, которая может быть как фиксированной, так и переменной величиной; модель УР с учетом однократной несимметрии отдельных элементов сети ЭЭС; модель УР с учетом экономических характеристик на производство, передачу и потребление активной и реактивной мощностей; модель УР с учетом способа регулирования значений отдельных параметров режима (фиксация или функциональная взаимосвязь с другими параметрами режима).

**Редактор задач.** Обеспечивает возможность формирования различных задач для исследования режимов ЭЭС, которые

решаются как однокритериальные, и позволяет задавать вид функции цели и критерия, состав компонент вектора управления. Предполагается, что предварительно устанавливается модель режима ЭЭС, в которой определяется состав компонент вектора переменных задач, задаются состав и предельные значения ограничений неравенств, накладываемых на изменяемые переменные (параметры режима). Рассмотрим особенности работы редактора:

— *задание вида целевой функции.* Реализованы возможности задания около десяти различных видов функций цели и их линейных комбинаций. Возможно задание следующих видов целевых функций: модуль напряжения в узле, мощности активной и реактивной генерации, мощность активной нагрузки, переток активной мощности и ток в ветви сети, переток активной мощности через группу ветвей, потери активной и реактивной мощностей в сети ЭЭС;

— *задание количества целевых функций.* Как указывалось выше, базисные функции поддерживают решение только однокритериальных задач. При наличии нескольких функций цели в задаче используется свертка критериев. Для этого задаются значения коэффициентов приведения и формируется задача, в которой функция цели является линейной комбинацией функций цели исходной задачи;

— *задание критерия изменения целевой функции.* В качестве критерия изменения целевой функции могут выступать следующие — минимум, максимум и изменение на заданную величину;

— *задание вектора управления.* Формируются различные способы регулирования при управлении режимом ЭЭС. Возможны два способа задания: либо установка числа и состава компонент вектора управления, либо при решении задачи определяется вектор решения с минимальным числом значимых (ненулевых) компонент.

Редактор результатов расчета содержит средства для отображения, сопоставления и интерпретации информации в графической, табличной и аналитической форме. Редактор используется после выполнения базисных функций и обеспечивает следующие возможности представления результатов расчета:

— *отображение значений параметров режима, для которых функция цели принимает экстремальные значения (минимальное или максимальное);*

\*Редактор разработан совместно с В.Е. Артемьевым и С.К. Скрипкинским.

— *отображение предельных значений* одной целевой функции в зависимости от вариации величин каких-либо заданных типов параметров режима или расчетных величин. Важным частным случаем такого представления являются эквивалентные характеристики режима, которые в зависимости от приложенной мощности характеризуются на генерацию активной мощности для некоторого фрагмента сети. Редактор позволяет построить аналитическое описание эквивалентной характеристики, используя базисную функцию, в которой строится уравнение пересечения.

— *отображение совокупности предельных значений* целевой функции задачи. Аналогично предшествующему, но дополнительно обеспечивается возможность вывода минимальных и максимальных значений целевой функции или их разности. Такое представление дает оценку величины релаксированного диапазона для различных способов управления режимом ЭЭС; — *отображение совокупности предельных значений* двух функций целевой для какого-либо одного расчетного состояния ЭЭС. Здесь совокупность имеет наглядный образ в виде области. Данная область является аппроксимацией области Парето. Редактор обеспечивает построение приближенного аналитического описания этой области в виде двух касательных линий, проведенных через специально выбранные граничные точки области;

— *отображение значений параметров ЭЭС на сфере* расчетной схемы сети. Для этой цели используются специально разработанный графический редактор расчетных схем. Редактор содержит около сотни специальных команд рисования, корректуры, архивирования и отображения, предоставляя широкие возможности для документирования и редактирования параметров ЭЭС.

**Редактор анализа** есть разновидность редактора результатов расчета и отличается от него тем, что полученная в результате решения задач информация о параметрах ЭЭС подвергается дополнителю обработке с помощью базисных функций. Такая обработка способствует получению новой информации, позволяющей сделать и некоторые общие заключения о специфике, что, помимо усиления иллюстративных возможностей, позволяет сделать вывод о специфике.

режима ЭЭС. В составе редактора имеются следующие средства:

— *отображение матрицы чувствительности (МЧ)*, элементы которой являются коэффициентами линеаризованных функциональных зависимостей величин изменения вектора параметров режима от изменения значений компонент вектора управления. Подход подробно рассмотрен в [12] и заключается в следующем. В зависимости от специфики приложения (например, анализ влияния на значения модулей и фаз напряжений в узлах или перетоков активной и реактивной мощности в ветвях сети, изменения инъекций мощностей в узлах) формируется соответствующая МЧ. Затем осуществляется ее одномерная или двумерная кластеризация, суть которой состоит в определении средней величины элементов МЧ и подсчете относительных вкладов в эту величину элементов матрицы, соответствующих отдельным переменным или управлениям. Реализованы две формы отображения: пассивная и активная. При активной форме проводится кластеризация, а при пассивной — отображение в некотором масштабе специальным образом сгруппированных и помеченных элементов МЧ, что позволяет визуально выделить наиболее чувствительные параметры режима, оценить состав существенных управлений и сделать заключение о степени загрузки сети ЭЭС. Активное отображение обеспечивает формализованное определение тех же оценок. Кроме того, существует возможность двумерного отображения элементов МЧ, с помощью простейшей раскраски графа расчетной схемы сети. Для этого достаточно разбить на части известную величину диапазона изменения значений элементов МЧ, присвоив каждой части соответствующий цвет. Например, большим значениям назначается красный цвет, средним — желтый и меньшим — зеленый. Окрашиваются как узлы, так и ветви графа расчетной схемы сети ЭЭС;

— *отображение слабых мест ЭЭС* обеспечивает получение и визуализацию параметров ЭЭС, изменение значений которых оказывает существенное (исключительное) влияние на изменение других параметров. Это структурный анализ сети ЭЭС, и он основан на получении и анализе собственных значений и векторов матрицы узловых проводимостей сети и матрицы Якоби [13], сформированных для линеаризованной системы уравнений, соответствующей рассматриваемой модели режима;

— *отображение двойственных переменных* позволяет провести оценку и ранжировку степени влияния на изменение значения целевой функции задачи изменения предельных величин ограничений неравенств. Для их получения составляется список активных в точке решения задачи ограничений неравенств, вычисляются их нормали и градиент целевой функции. Содержательными примерами двойственных переменных могут служить мгновенные тарифы на выработку, передачу и потребление активной или реактивной мощности или степень влияния на значение потерь активной мощности в сети ЭЭС изменения предельных величин ограничений неравенств на модуль напряжения в узле сети;

— *отображение линеаризованной допустимой области (ДО)* обеспечивает визуализацию на плоскости двумерной проекции граничных точек ДО. Для этого разработан специальный редактор\*, который содержит команды выбора координат отображения, корректировку списка и предельных значений параметров ограничений неравенств, оценки объема ДО и ряд других.

**Технология построения ОУ.** В общем виде обеспечение управляемости ЭЭС заключается в выборе предельных значений системы ограничений неравенств, которая удовлетворяет указанным выше требованиям для заданного списка расчетных возмущений. Предельные значения ограничений, с одной стороны, зависят от состояний ЭЭС, которые определяются списком расчетных возмущений, и с другой — являются функцией от состава и величины дополнительных средств управления режимом, которые образуют вектор корректировки параметров режима. Для дальнейшего условимся совокупность точек, для которых справедлива система ограничений неравенств, называть допустимой областью.

Для обеспечения управляемости ЭЭС организуется вычислительный процесс итерационного уточнения границ ДО, который сходится к ОУ. Процесс состоит из двух этапов, выполняющихся для каждого элемента из списка расчетных возмущений, и заключается в следующем:

— *решение задачи анализа* для проверки выполнения требований к размерам текущей ДО для каждого расчетного возмущения. Если указанные требования выполняются, то это означает, что система ограничений совместна и уточнения ее

\*Редактор разработан совместно с Л.Н. Грофимовым.

предельных значений не требуется. Поэтому нужно перейти к рассмотрению следующего расчетного возмущения. Если система ограничений неравенств несовместна, то переход ко второму этапу;

— *решение задачи синтеза* для определения состава и значения компонент вектора корректировки параметров режима или условий исходной задачи с целью обеспечения совместности ДО и уточнения (расширения) состава переменных, используемых далее при решении очередной задачи анализа. В задаче синтеза, в отличие от задачи анализа, в состав переменных дополнительно включаются компоненты вектора корректировки (назовем вектор переменных задачи синтеза вектором полных расширенных переменных).

**Особенности реализации.** Для построения ОУ в рамках ПВК СДО-6 формируются и решаются задачи анализа и синтеза для каждой из перечисленных выше моделей режимов и для любой целевой функции, задаваемой редактором задач. При этом более предпочтительно задание критерия, который требует изменения целевой функции на заданную величину, так как обычно эта величина известна в отличие от экстремального значения целевой функции. Уточним содержание каждого из перечисленных выше этапов.

При решении задачи анализа используется базисная функция, в которой формируется и решается параметрическая задача квадратичного программирования. Алгоритм ее решения проводит диагностику несовместности или противоречивости системы ограничений неравенств и обеспечивает получение решения за счет введения зависимости от скалярного параметра предельных значений ограничений.

Задача синтеза решается при несовместности системы ограничений неравенств и включает два основных шага — анализ чувствительности и действия с областями, суть выполнения которых кратко состоит в следующем.

*Шаг анализа чувствительности.* При его выполнении проводится выборка компонент из вектора корректировки параметров. Выборка осуществляется в интерактивном режиме, что связано с необходимостью учета дополнительной слабо формализуемой информации об ЭЭС и получения технически целесообразных решений. Для выборки проводятся различные ранжировки компонент вектора расширенных переменных с



использованием базисных функций и редактора анализа по степени влияния изменения значений их компонент:

— на значение целевой функции задачи, используя анализ значения компонент вектора двойственных переменных;

— на величину других компонент вектора переменных задачи, применяя результаты структурного анализа или кластеризации МЧ.

*Шаг действий с областями* обеспечивает выполнение требований к размерам ДО. При этом вначале определяется наличие непустой ДО для заданного состава компонент расширенного вектора переменных, который назначается с использованием результатов ранжировки и может не совпадать с полным расширенным вектором переменных. Если ДО пуста, то следует дополнить состав компонент вектора корректировки. Если ДО не пуста, то текущая задача синтеза решена и можно дополнительно решить задачу выбора вектора корректировки, имеющего минимальное число ненулевых компонент. Далее следует перейти к рассмотрению следующего расчетного возмущения с обновленным составом компонент вектора переменных (включающим исходные переменные, задаваемые моделью режима и найденные из решения задачи синтеза компоненты вектора корректировки параметров).

**Описание применения.** ПВК СДО-6 имеет промышленное внедрение, и практика его использования в основном связана с решением различных задач анализа режимов ЭЭС. Приложение к задачам обеспечения управляемости ЭЭС в настоящее время имеет развивающийся характер, и состав рассматриваемых при этом задач расширяется. В качестве примеров таких задач приведем следующие:

— выбор числа включенных реакторов для обеспечения допустимых уровней напряжения в узлах сети ЭЭС;

— определение минимального объема отключенной нагрузки для обеспечения балансов активных и реактивных мощностей в сети ЭЭС.

### 3.5. Программный комплекс "Минимакс" для решения трех- и двухэтапных минимаксных задач

Неопределенность будущих условий развития любой экономико-производственной системы существенно усложняет процесс управления ею. Необходимость учета неопределен-

ности связана с тем, что эффективность принимаемых сегодня решений зависит от будущих неизвестных обстоятельств.

Для преодоления трудностей, связанных с неопределенностью, придерживаются принципа принятия решений с "минимальной задержкой" [14]. Это означает, что окончательное решение принимается лишь относительно первоочередных мероприятий, отсрочка которых может отрицательно сказаться на развитии системы. Такой подход оправдан непрерывностью анализа развития системы, в процессе которого появляется новая информация о состоянии системы и условиях. Эта информация позволяет частично либо полностью снять неоднозначность ряда показателей. Однако, откладывая принятие некоторого решения, необходимо иметь в виду, что, с одной стороны, его выгодно принять как можно позже, чтобы учесть больше полезной информации, с другой — запаздывание может привести к дополнительным затратам ресурсов, а в ряде случаев и к невозможности своевременно удовлетворить требования по развитию системы.

Таким образом, для обоснования принимаемых решений на данном этапе необходимо учитывать динамику поступления информации о состоянии системы и динамику процесса принятия решения в соответствии с этой информацией. В таком процессе принимаемые решения вырабатываются только для первого этапа, а последующие этапы необходимы для оценки эффективности первоочередных мероприятий. Учет поэтапного уточнения информации и возможность управлять системой в соответствии с этой информацией приводят к многоэтапным моделям принятия решения [15]. Соответствующая математическая задача может быть отнесена к классу многоэтапных минимаксных задач управления системой с линейными ограничениями.

Программный комплекс "Минимакс" включает возможности для решения трех-, двух- и одноэтапных задач. В программном обеспечении выделено семь крупных блоков, имеющих относительную самостоятельность. Их задачи состоят в следующем:

- 1) обработка исходной информации (ввод, контроль, заполнение и обслуживание баз данных);
- 2) автоматизация процедур формирования и корректировки матриц задач линейного программирования;
- 3) получение верхней оценки оптимального значения функционала (решение минимаксной задачи);

- 4) получение нижней оценки оптимального функционала (решение максимальной задачи);
- 5) приведение трехэтапной задачи к двухэтапной за счет увеличения размерности исходной матрицы;
- 6) организация итерационного процесса решения двухэтапной задачи;
- 7) формирование и выдача на печать результатов решения задач в виде документов, графиков и других сервисных пакетов.
- Программные модули, реализующие перечисленные функции, используют средства СУБД PARADOX и пакета ЛП-СИСТЕМА. На основе системы PARADOX реализована база данных, доступ к данным и их хранение. ЛП-СИСТЕМА обеспечивает решение общей задачи линейного программирования.
- Итерационный алгоритм решения двухэтапной задачи состоит в поочередном решении двух задач:
- максимальной задачи при фиксированном решении первого этапа, которая позволяет получить верхнюю оценку искомого функционала;
  - для получения нижней оценки задача линейного программирования (ЛП), матрица которой сформирована в результате анализа решения предыдущей задачи.
- В качестве начального фиксированного решения при решении максимальной задачи выступает решение первого этапа, полученное в результате расчета задачи 3 или 4.
- Обоснование алгоритма решения двухэтапной задачи приведено в [16].
- Решение максимальной задачи связано с многовариантными оптимизационными расчетами. Количество этих расчетов на каждой итерации при решении двухэтапной задачи зависит от числа неопределенных факторов на первом этапе и равно  $2^{m_1}$  (полному сочетанию транш неопределенных факторов), где  $m_1$  — количество неопределенных факторов на первом этапе. При этом процедура многовариантных расчетов организована так, что обращение к пакету ЛП-СИСТЕМА осуществляется из программного модуля как к подпрограмме, а оптимизация ведется по методике "ускоренного перебора" от оптимального базиса решения предыдущего варианта задачи.
- Сведение двухэтапной задачи к одноэтапному эквиваленту и последующее решение задачи ЛП не всегда представляются

возможными в связи с увеличением размерности исходной задачи в  $2^{m1}$  раз, и тем более проблематично решение трехэтапной задачи путем сведения ее к задаче ЛП. Поэтому трехэтапную задачу предлагается решать в два этапа: сведение ее к двухэтапной задаче и решение последней с помощью итерационного процесса, предложенного в [16].

Комплекс программ "Минимакс", реализованный на языке Турбо-Паскаль, построен по модульному принципу, унифицирован по всем исходным, рабочим и результирующим массивам и является открытым для включения в него новых модулей.

Технология проведения исследования состоит в том, что с помощью унифицированных средств описания модели пользователь задает в виде исходных массивов структуру элементов матрицы, функционал и ограничения на переменные. Сформированные по определенным правилам массивы заносятся в информационную базу данных и используются далее для генерации системы условий исходной задачи. Затем с помощью программных модулей, реализующих алгоритм предлагаемого метода, решается максиминная задача. Для выполнения оптимизационных расчетов применяется симплекс-метод, реализованный в пакете ЛП-СИСТЕМА. Полученное оптимальное гарантированное решение помещается в базу данных. На его основе далее выдаются на печать результаты в виде выходных документов и графиков. По результатам анализа решения возможны изменение параметров системы в диалоге с пользователем и повторное решение задачи.

Проводить исследования по указанной технологии комплекс позволяет в двух режимах в зависимости от подготовленности пользователя, имеющихся у него навыков и знаний о программном обеспечении. Обученный пользователь, отказавшись от услуг комплекса, самостоятельно определяет последовательность действий в соответствии с поставленной задачей и продвигается к ее решению, следя только за сообщениями, поступающими от системы. Обучающийся пользователь использует компоненты комплекса, предлагающие сценарии диалога и позволяющие вести диалог в режиме "меню" и команд. В соответствии с ответами пользователя управляющая программа упорядочивает вызов программных модулей, отвечающих за решение задач, определенных экспертом.

Дальнейшее развитие программного комплекса ведется в направлении улучшения сервисных возможностей. Основными задачами являются развитие диалоговых возможностей комплекса и связь их со средствами текстового, табличного и графического отображения полученных результатов на всех этапах проводимых исследований.

Описанный подход, метод и программное обеспечение были использованы при исследовании гарантированных стратегий, выполненном на трехэтапной агрегированной модели развития топливно-энергетического комплекса страны [17] и при исследовании двухэтапной задачи управления инвестициями в газовом месторождении в условиях неопределенности.

### **3.6. Гибридная информационно-прогностическая система**

Предназначением гибридной информационно-прогностической системы Абасова — Резникова (ГИПСАР) является реализация группы методов долгосрочного прогнозирования естественных процессов. Для выявления ее особенностей требуется рассмотреть: во-первых, специфику развития природных процессов в многолетнем плане; во-вторых, адекватную этой специфике методологию прогнозирования; в-третьих, методические решения, направленные на осуществление такой методологии; в-четвертых, эффективные способы программно-информационного обеспечения методов.

1. **Предмет прогнозирования** составляет множество геофизических, гелиофизических, гелиогеофизических и астрофизических процессов, развивающихся в системах различных масштабов (точечных, региональных, континентальных, планетарных и межпланетных), охватывающих промежутки времени от десятилетий до столетий. Заблаговременность прогнозирования может охватывать диапазон от года до нескольких десятилетий. Примеры обсуждаемых процессов: погодноклиматические (в том числе касающиеся параметров атмосферы, характеристик отопительного и вегетационного периодов), гидрологические (сток рек, приточность в водохранилища, уровни вод), геофизические (геомагнитное и электрическое состояние планеты, структура атмосферы), планетарные (изменчивость скорости вращения Земли, приливные силы), гелиофизические (солнечная активность), гелиогеофизические

(солнечно-земные связи, гелиоэнергетический потенциал в различных точках Земли), межпланетные (параметры ближнего космоса, приливообразующие силы небесных тел, качество дальней космической связи, условия космических полетов), биологические (урожайность сельскохозяйственных культур, развитие популяций животных, распространение заболеваний), экологические (изменение природной обстановки, парниковый эффект и его последствия, экологическая устойчивость). Результатом прогнозирования могут быть показатели, осредненные за некоторый промежуток времени: месяц, сезон, год, несколько лет. (Предсказание экстремальных параметров — более сложная задача, которая в настоящее время изучается.)

Фундаментальным гносеологическим свойством названного класса процессов является полная неопределенность их дальнейшего развития, не фиксируемая какими бы то ни было функциональными зависимостями, т.е. априорное отсутствие математической модели. Такого рода математическая неопределенность частично обусловлена физической неопределенностью задачи — отсутствием знаний механизмов развития процессов, а отчасти неизвестностью даже самих факторов, влияющих на прогнозируемый процесс (влияющих факторов). Иногда, однако, "нащупывается" кое-какая физико-гипотетическая основа прогнозирования, но ее воплощение встречается с еще одним типом неопределенности — информационной, т.е. отсутствием данных о развитии тех явлений, в зависимость от которых следует поставить прогнозируемый процесс. (Надо отметить, что сейчас в нашей экономически истощенной стране вместо требуемого расширения области сбора данных, как этого требует рассматриваемая задача, наблюдается систематическое закрытие постов наблюдений за природными явлениями, что, к сожалению, усугубляет информационную неопределенность.)

Частной задачей названного типа является прогнозирование погодно-климатических показателей. Предсказание погоды всегда было вопросом жизни и смерти хлебопашцев и моряков. Великий Ломоносов сводил все ожидания от Господа Бога к его помощи в решении такой задачи. Современники эту проблему считают наиболее насущной после овладения тайной расщепления атомного ядра. Погодно-климатические условия, как, впрочем, и ряд других природных процессов, оказывают влияние на все стороны жизни (социальную, финансовую,

экономическую, техническую и т.д.), являются одним из факторов государственной безопасности. Неопределенность здесь, даже применительно к кратковременному прогнозу ("сегодня — на завтра"), весьма велика.

2. **Неконтролируемая составляющая прогнозируемого процесса** — наиболее важная особенность рассматриваемой задачи, определяющая характер используемых для ее решения средств. Эта составляющая обусловлена заложеной в задаче неопределенностью. Она проявляется в том, что прогнозируемый параметр изменяется под воздействием не только учитываемых влияющих факторов, но и множества других неизвестных причин и закономерностей.

Пусть прогнозированию подлежит параметр  $Q$ , который определяется действием совокупности факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$Q = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3.4)$$

Из-за наличия рассмотренной выше неопределенности при прогнозировании приходится искать приближенные значения параметра  $Q'$  в зависимости от совершенно иной совокупности факторов  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v$ :

$$Q' = \Phi(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v). \quad (3.5)$$

Набор учитываемых факторов  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v$  отличается от системы влияющих факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , во-первых, их неполнотой ( $v < n$ ), во-вторых, наличием ложных факторов, в-третьих, неточностью величин  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v$  и т.д. В результате возникает невязка (составляющая прогнозируемого параметра, неконтролируемая учитываемыми факторами):

$$\Delta Q = F(x_1, x_2, \dots, x_n) - \Phi(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v). \quad (3.6)$$

Таким образом, величина  $\Delta Q$  есть функция как неизвестных влияющих факторов, так и факторов учитываемых. При определении значения  $Q'$  с помощью модели  $\Phi(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v)$  допускается ошибка  $\Delta Q$ , которая в рамках этой модели проявляется как результат изменчивости закономерности  $\Phi$  (если бы не было этой изменчивости, то однажды найденная зависимость  $\Phi$  при любых условиях обеспечивала бы  $\Delta Q = 0$ ). Разумеется, здесь речь идет главным образом о модельной изменчивости закономерностей (хотя не исключается и реальная их изменчивость, например, при смене структуры объекта).

3. Полуформализованные процедуры аппроксимации зависимостей, скрытых в данных наблюдений. Принципиальная невозможность осуществить модель (3.4) из-за неизвестности зависимости  $F$ , а также отсутствие сведений об аргументах  $x_1, x_2, \dots, x_n$  требуют аппроксимации этих зависимостей с помощью факторов  $x_1, x_2, \dots, x_0$ , информация о которых имеется (обычно неполная и искаженная). В то же время неприемлема и полностью формализованная процедура аппроксимации скрытых закономерностей в виде модели (3.5), которая, будучи единожды полученной на основе имеющегося ряда образцов исходного объекта, в дальнейшем используется без каких бы то ни было изменений при любых текущих условиях (значениях параметров  $x_1, x_2, \dots, x_0$ ). Это обстоятельство обусловлено наличием существенной неконтролируемой составляющей (3.6) прогнозируемого процесса. Вот почему "формульные" модели (3.5), основанные, например, на регрессионном анализе и других подобного рода подходах, не дают удовлетворительных результатов для решения рассматриваемой задачи и поэтому неприемлемы.

Изменчивость закономерностей в пространстве наблюдений, приводящая к возникновению невязки (3.6), проявляется в том, что каждой точке области возможных состояний исходной природной системы соответствуют своя особая закономерность и своя собственная модель. Это заставляет применять полуформализованные процедуры аппроксимации скрытых закономерностей, которые предусматривают создание отдельных ("индивидуальных") моделей для любого текущего набора условий прогнозирования, причем моделей, построенных на основе своей собственной информации, выделенной из всей исходной совокупности данных.

4. Эвристический принцип построения полуформализованных процедур аппроксимации скрытых закономерностей основывается на формулировке принципа причинности для случая изменчивости закономерностей. При этом, во-первых, принимается, что одинаковые комбинации причин вызывают одно и то же, и только одно следствие, т.е. одинаковым состояниям объекта (условиям прогнозирования) соответствуют одни и те же закономерности; во-вторых, на этом основании может быть сформулирован "вероятностный" вариант данного утверждения: чем меньше одно состояние природного объекта отличается от



другого, тем больше вероятность того, что указанным двум состояниям соответствует одна и та же закономерность функционирования модельного объекта.

Следствием формулировки такого принципа причинности является необходимость выполнения всякий раз (для каждой комбинации текущих условий) цепочки отбора информации (из всей исходной совокупности данных): 1) последовательное сопоставление текущих условий прогнозирования со всеми комплектами условий, зафиксированных в отдельных образцах поведения объекта (исходной выборке); 2) взвешивание результатов этих сопоставлений таким образом, чтобы их значимость была максимальной при полном совпадении условий, относительно велика при малоотличающихся условиях, уменьшалась по мере увеличения различий (или, наоборот, сужения сходства) условий; 3) выявление информационных составляющих исходных данных для получения текущего прогноза в соответствии с результатами выполнения двух предыдущих операций (сопоставления и взвешивания).

Названные операции оказались целесообразным осуществлять с помощью меры сходства (или близости) состояний объекта. Свойства этих мер определяются системой постулатов, вводимых с учетом специфики прогнозируемых процессов, а также особенностей информационного обеспечения и своеобразия задачи.

В соответствии с названными принципами в СЭИ СО РАН в разное время были разработаны три прогностических подхода, имеющих различные возможности и разные применения, а именно: 1) дискретная обучающаяся система [18, 19]; 2) континуальная обучающаяся система [19, 20]; 3) системы аналогосходственных соотношений [21]. Они применялись для прогнозирования с многолетней заблаговременностью солнечной активности, температуры атмосферы, осадков, стока рек и приточности в водохранилища [22, 23], а также оперативного прогнозирования электрических нагрузок энергетических систем с учетом природных факторов [18].

**5. Требования к программным средствам и выбор базовой среды реализации.** Прежде всего при построении прогностической системы надо учитывать вычислительные трудности. Реализация полужормализованных процедур аппроксимации скрытых закономерностей, в сравнении с традиционными полностью формализованными, требует многократного увеличения

объема вычислений. Кроме того, необходимы оптимизация параметров прогностических систем и верификация получаемых результатов [20, 22, 23], что сопровождается дальнейшим увеличением числа решений. Повышение надежности прогнозирования приводит к рассмотрению дополнительных прогнозов, связанных с их комплексированием [22, 23]. Все это, вместе взятое, вызывает необходимость вычислять значения меры сходства громадное число раз. Программирование должно обеспечить экономию вычислений и достаточное быстродействие программ.

В целом эффективная реализация названных методов прогнозирования в виде системы требует, чтобы базовые программные средства разработки (ОС, языки программирования, языки манипулирования данными) включали следующие элементы и возможности: 1) динамическая организация данных (для обработки статистических рядов, параметров, многомерных матриц и др.) с доступом к базе данных; 2) высокоэффективная по времени машинная реализация алгоритмов нижнего уровня оптимизационных циклов, непосредственно влияющих на общее время счета; 3) контроль правильности выполнения отдельных фрагментов алгоритмов; 4) наличие диалога; 5) средства создания входных и выходных документов; 6) гибкие возможности визуализации различных вариантов процесса прогнозирования с оперативным выбором прогнозистом новых значений параметров управления; 7) формирование и вывод графиков (на экран дисплея и на принтер) как в процессе счета, так и при окончании решения задачи; 8) контроль и обработка статистических рядов с возможностью их преобразования в различные формы хранения; 9) комплексирование прогнозов, полученных разными методами, в том числе и включенными в систему.

Для реализации ГИПСАР в соответствии с этими требованиями была выбрана программная среда ЗИРУС [24, 25], разработанная в ИрВЦ СО РАН. Она, включая все названные компоненты, имеет широкие возможности дальнейшего развития. Гибкие средства трассировки программ, реализованные в среде, позволяют проверять вход, выход и внутреннее содержание отдельных процедур, что лежит в основе контроля правильности программного продукта. Важно также то, что один из соавторов является разработчиком этой среды, что облегчает ее подстройку под новые потребности.

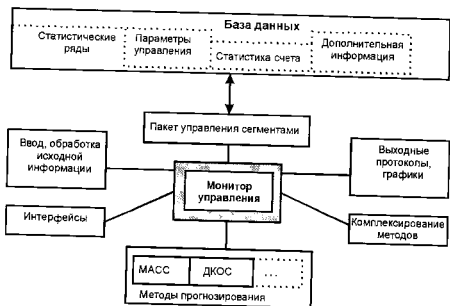


Рис. 3.9. Схема связей ГИПСАР.

Базовый элемент представления данных в этой среде — *сегмент* данных — позволяет описывать динамические таблицы из набора разнородных ячеек: числовые данные различных типов, символьные данные, разного типа указатели-ссылки на другие таблицы или на отдельные записи и т.д. С помощью указателей строятся различные структуры данных, представляющие набор связанных сегментов.

Для реализации алгоритмов используется язык СИ с включением в него дополнительных операторов доступа к сегментам данных и библиотекам программ среды, запускающих соответствующие инструментальные пакеты программ. Расширение языка СИ не только позволяет эффективно реализовывать отдельные фрагменты алгоритмов за счет прямого доступа к машинным командам, но и объединять фрагменты программ в единую систему с доступом ко всем ее информационным ресурсам.

**6. Компоненты ГИПСАР** (рис. 3.9). Названные подходы к прогнозированию оформлены в виде метода аналого-сходственных соотношений (МАСС) и дискретно-континуальной обучающейся системы (ДКОС), объединяющей дискретную и континуальную модели.

База данных включает: 1) архивы исходной информации в виде статистических рядов; 2) параметры настройки методов и их модификаций и показатели управления процессом прогнозирования; 3) архив выходной информации в виде прогнозистических траекторий, полученных различными методами при разных параметрах; 4) дополнительную информацию, связанную с алгоритмами статистической обработки рядов (скользящее осреднение, интегральные кривые и др.).

Ввод исходной информации может осуществляться двумя способами: 1) из текстового файла по заданному формату, 2) непосредственно через табличный редактор. Кроме того, в системе имеется возможность ввода из файлов DBF-формата. При формировании информации оперативно осуществляется интервальный контроль и отмечаются лакунарные точки (пробелы в данных). По завершении ввода формируется график для визуальной оценки исходных рядов. Инструмент агрегирования информации за более длительный интервал времени, определения средних значений, среднеквадратичных отклонений, а также формирования интегральных кривых и использования метода скользящего осреднения (МСО) позволяет оперативно исследовать исходную информацию перед ее записью в архив данных.

Система обеспечивает формирование графиков изменения различных параметров и оперативный вывод их на экран дисплея (с возможностью фрагментарного просмотра и печати). Кроме того, с помощью встроенного в ЗИРУС графического редактора можно их дооформить по желанию прогнозиста. Диалог в системе организован с использованием набора "висячих" окон-меню с гибкими средствами их оперативной настройки на текущие погрешности. Система включает заглушки для подключения инородных потенциальных методов прогнозирования и комплексирования их с базовыми.

Основой системы служат методы прогнозирования МАСС и ДКОС. Общие элементы этих методов: 1) накопление информации на обучающейся выборке для текущего прогнозирования; 2) оптимизация параметров на специальной подвыборке; 3) проверка надежности прогнозов на верификационной подвыборке; 4) уточнение оптимальных параметров с учетом верификации; 5) прогнозирование при нескольких лучших параметрах; 6) комплексирование прогнозов. Графическое оформление прогнозирования процесса  $Y$  показано на рис. 3.10. В

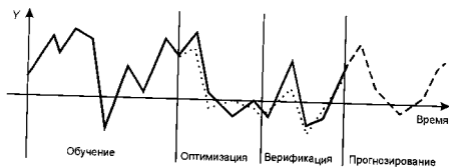


Рис. 3.10. Графическое сопровождение задачи (сплошная линия — наблюдения, пунктирная — эпигнозы, штриховая — прогнозы).

систему включены средства визуализации процесса прогнозирования в реальном масштабе времени, параметрически задаваемые на этапе запуска, а также оперативно изменяемые. С помощью этих средств можно отслеживать все изменения в сегментах данных с целью проверки правильности работы алгоритмов и выявления тонких эффектов прогнозирования.

**7. Особенности реализации метода аналого-сходственных соотношений (МАСС).** Метод основан на извлечении информации из предыстории исходного ряда. При прогнозировании ищется эталон в виде последовательности точек ряда. Для него выявляются фрагменты-аналоги, совпадающие с эталоном последовательностью повышения и понижения соответствующих значений ряда. Среди множества аналогов выделяются наиболее схожие с эталоном (по заданной мере сходства, или близости). На основе продолжений аналогов при заданной текущей заблаговременности определяется продолжение эталона (их может быть довольно много при различных параметрах меры близости). На этапе текущей оптимизации отыскивается несколько лучших решений.

Применение к последним комплексирования дает продолжение эталона, что и является текущим прогнозом. Принципиальная схема МАСС показана на рис. 3.11. При реализации этого метода динамически и многоитерационно формируются следующие сегменты-списки: 1) аналогов, наиболее сходных с эталоном при различных мерах; 2) параметров для лучших решений на оптимизационной подвыборке; 3) матриц текущих решений для всех заданных величин заблаговременностей; 4) частотных распределений различных коэффициентов.



Рис. 3.11. Последовательность процедур МАСС.

Включенные в алгоритм возможности выбора меры сходства для выделения аналогов по текущему эталону позволяют существенно сократить время оптимизации задачи, что обеспечивает увеличение размеров оптимизационной и верификационной подвыборок и тем самым повышение надежности прогнозирования. Параметр, определяющий текущий вариант метода, выделен в специальном сегменте управления процессом прогнозирования и позволяет оперативно выбирать отдельные варианты метода на конкурентной основе или запускать их отдельно с последующим комплексированием итогового результата.

**8. Особенности реализации дискретно-континуальной обучающейся системы (ДКОС).** Динамическая модель данных как на уровне множества связанных сегментов, так и на уровне представления одного сегмента позволяет объединить две исходные модели таким образом, что в общем случае рассматривается континуальная система с заданной степенью дискретного представления определяющих мер, а частным случаем является дискретная модель. Принципиальная схема алгоритма ДКОС приведена на рис. 3.12.

Базой ДКОС служит обучающаяся нейросеть с различной степенью возбуждения формальных нейронов. Хотя этапы оптимизации, верификации и прогнозирования совпадают с соответствующими этапами МАСС, их методическая основа иная. Этот метод обладает значительно более общими возможностями, так как использует не только данные предыстории прогнозируемого ряда, но и дополнительную информацию, описываемую в так называемом образце, содержащем данные о траекториях других процессов, потенциально влияющих на прогнозируемый или с ним связанных.

Параметрами данного метода являются: 1) уровни квантования значений учитываемых факторов и прогнозируемого показателя; 2) уровень квантования меры влияния и ее форма; 3) весовые коэффициенты влияния отдельных составляющих

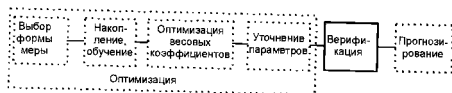


Рис. 3.12. Последовательность процедур ДКОС.

образцов; 4) размер области расширения прогнозируемых значений относительно ее предельных величин. Надо отметить, что дискретная модель не позволяет сделать прогноз, выходящий за рамки диапазона наблюдений, континуальная же имеет такого рода экстраполирующий эффект.

**9. Применение и развитие системы.** ГИПСАР постоянно совершенствуется. Как показано в экспериментах, существующая программа МАСС дает удовлетворительные результаты при прогнозировании среднемесячных (среднесезонных) температур воздуха и стока рек. Обнаружено, что априорно ничего нельзя сказать о приоритете задаваемого варианта метода. Он определяется в процессе оптимизации. Полная реализация этого метода не завершена; предусматривается исследование влияний различных мер близости по вариантам выбора аналогов, а также дальнейшие исследования по формированию текущих (внутриитерационных) прогнозов для улучшения показателей прогностического процесса.

Программа ДКОС находится в стадии вычислительных экспериментов. Она дает хорошие показатели не для всех рядов. Проводятся исследования с целью выделения наиболее значимых образцов (из заданного набора), отбрасывания несущественных, увеличения связи прогностического эффекта на оптимизационной и верификационной подвыборках. Окончательная программная реализация системы должна давать прогнозы с большой заблаговременностью и высокой степенью надежности.

В системе предусмотрено также включение дополнительных методов прогнозирования, например вероятностного, что по замыслу авторов должно обеспечить дальнейшее повышение его надежности.

### 3.7. Модификация табличного процессора для новых моделей вычислений

Качественные достижения информатики и ее приложений обычно обуславливаются новыми моделями вычислений. Примерами таких моделей в свое время были ЛИСП, РЕФАЛ, ПРОЛОГ, реляционные машины и языки и, наконец, табличные процессоры. Применение новой модели вычислений позволяет получить более эффективное средство программирования того или иного класса задач обработки данных. Популярность табличных процессоров в научно-технических и экономических приложениях объясняется наглядным способом представления программы совокупностью формул для вычисления значений клеток таблицы. Будем называть такие программы распределенными по данным или просто распределенными. Современные табличные процессоры обеспечивают несколько способов выполнения распределенных программ. В частности, возможно как разовое, так и циклическое вычисление формул, составляющих распределенную программу. Таким образом, нетрудно доказать, что табличные процессоры включают универсальное непроцедурное средство программирования.

Камнем преткновения при программировании задач обработки данных формулами клеток табличного процессора часто является последовательность их выполнения. Здесь возможности известных табличных процессоров весьма ограничены. Кроме того, при проектировании циклического выполнения формул значительную их часть составляют условные формулы (стандартная функция "If") с громоздкими булевыми выражениями.

Ниже предлагается модификация табличного процессора, позволяющая явно задавать последовательность вычисления формул и существенно уменьшать их сложность. Архитектура и схема функционирования модифицированного табличного процессора обсуждаются в п. 1. Экспериментальная реализация модифицированного табличного процессора (МТП) на базе табличного процессора MS EXCEL представлена в п. 2.

**1. Концепции и пример.** Основу всякого табличного процессора составляет табличная организация данных. Элементами этой таблицы являются клетки. Столбцы таблицы идентифицируются латинскими буквами и парами букв. Например, А, В,



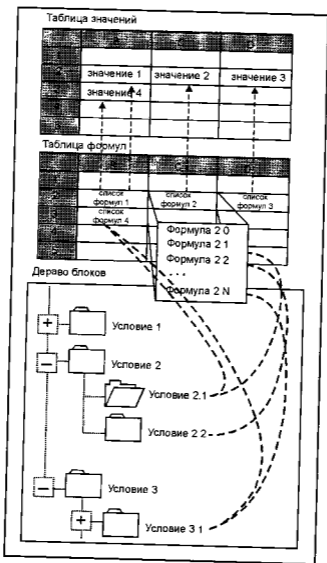


Рис. 3.13. Операционное пространство МТП.

AD и т.д. Строки таблицы обозначаются целыми числами без знака — 1, 2, ..., 99, ... Клетка располагается на пересечении столбца и строки. Ее имя задается сцеплением имен столбца и клетки. Например, A1, B99, AD17. Значение клетки может быть неопределенным или принадлежать одному из скалярных типов — числовому, строковому, булевому и т.д.

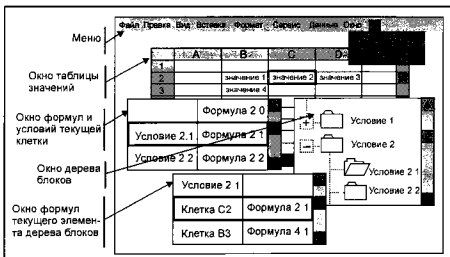


Рис. 3.14. Видеограммы МТП.

В составе МТП имеют место таблица значений и таблица формул (рис. 3.13). Между этими таблицами установлено взаимно однозначное соответствие.

В качестве устройств связи с пользователем в табличном процессоре используются три типа диалоговых механизмов: табличное окно, окно клетки и меню (рис. 3.14). Табличное окно предназначено для обзора таблицы значений или таблицы формул. Заметим, что для обзора формул его применяют лишь искусственные пользователи. Основные параметры управления табличным окном — это указатели текущей клетки.

Для ввода и редактирования формул предназначено окно клетки. Табличное окно и окно клетки взаимосвязаны в том смысле, что последнее всегда обрабатывает только текущую клетку табличного окна.

Модификация табличного процессора заключается в следующем: возможность использования для каждой клетки нескольких формул, а не одной; дополнительная конструкция, называемая деревом блоков; специальный алгоритм исполнения программы (рис. 3.13, 3.14).

Рассмотрим элементы модификации табличного процессора более подробно. Одним из основных элементов является включение в его состав операционного пространства дерева блоков. Под блоком понимается множество клеток и/или уже выделенных блоков. Отношение подчиненности в дереве блоков экви-

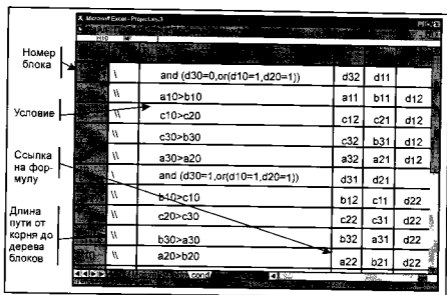


Рис. 3.15. Пример дерева блоков.

валентно отношению принадлежности элемента блоку. Для каждого узла дерева блоков, кроме корневого, задается специальная формула, аналогичная обычным формулам табличного процессора, но возвращающая булево значение.

Другой элемент модификации табличного процессора заключается в связывании с каждой его клеткой не одной, а нескольких формул. Каждая из этих формул может быть связана с одним из узлов дерева блоков, причем каждому узлу может быть поставлено в соответствие несколько формул. Таким образом, вычисление формул обуславливается истинностью соответствующих булевых выражений, связанных с узлами дерева блоков.

Рассмотрим пример. Пусть дана квадратная матрица числовых значений, элементы которой требуется отсортировать по возрастанию. При этом возрастающие элементы должны быть расположены на спирали, начинающейся в левом верхнем углу матрицы и развивающейся по часовой стрелке.

Пусть наша матрица размерностью  $3 \times 3$  размещается в блоке табличной памяти табличного процессора.

Идея предлагаемого решения задачи заключается в покрытии матрицы попарно непересекающимися парами смеж-

ных клеток, расположенных на требуемой спирали, и циклической перестановке их значений до тех пор, пока возможно.

Дерево блоков, предназначенное для решения этой задачи, приведено на рис. 3.15. Блоки с номерами 2—5 и 7—10 включают переставляемые при сортировке пары элементов заданной матрицы. Блоки 1 и 6 включают блоки 2—5 и 7—10, а также рабочие клетки таблицы D10, D20 и D30 соответственно. Каждый узел дерева содержит булево выражение и ссылки на формулы, которые следует вычислить при его истинности. Корень дерева фиктивен и явно в нем не представлен. Предполагается, что связанное с ним условие тождественно истинно, а список формул пуст.

На рис. 3.16 приведена таблица формул для рассматриваемого примера. Причем по каждой клетке исходных данных (а часто и промежуточных значений) должна быть задана формула для вычисления начального значения.

Третий элемент модификации табличного процессора представлен алгоритмом выполнения программы, заданной в виде формул для исходных, промежуточных и результирующих величин и дерева блоков. Алгоритм предполагает следующее:

- 1) выполнение всех формул для вычисления начальных значений. Формально формулы отличаются от всех других тем, что на них нет ссылок из дерева блоков;

- 2) модифицированный обход дерева блоков заключается в том, что узел дерева обходится лишь в случае истинности связанного с ним условия в момент доступа к этому узлу. Обработка текущего узла заключается в вычислении всех формул, на которые он ссылается. Если таких формул более чем одна, то они будут вычисляться независимо одна от другой, аналогично кратным присваиваниям в [26]. Однако существует одно ограничение: в ходе вычислений одной и той же клетке не могут присваиваться различные значения. Если же такое происходит, то все дальнейшие вычисления прекращаются. Выбор следующего узла осуществляется вычислением условий для узлов, непосредственно подчиненных текущему. Эти условия вычисляются независимо, аналогично тому, как происходит в операторах `if ... fi` в [26]. Если в качестве кандидатов для обхода выбран более чем один узел, то обработаны будут все узлы. Порядок обработки узлов несуществен;

- 3) обход дерева блоков выполняется циклически. Очередная итерация осуществляется, если в ходе предыдущей рассчитыва-

	A	B	C	D
Номер столбца	10			1
Начальные значения	=B10	=A10	=B10	=0
		=C10	=C20	=1
Формулы	=A30	=A20	=C10	=0
	=B20		=C30	=1
				0
Номер строки	=B30	=C30	=C20	=0
	=A20	=A30	=B30	=1

Рис. 3.16. Пример таблицы формул.

лась хотя бы одна формула. Иначе программа завершает работу.

**2. Экспериментальная реализация.** Для апробации разрабатываемой концепции МТП осуществлена его экспериментальная реализация. В качестве базового средства выбран широко распространенный табличный процессор MS EXCEL [27]. В силу опытно-конструкторского характера работы в реализации присутствует ряд условных соглашений. Так, одна клетка МТП моделируется 10 клетками MS EXCEL. В них записываются от 1 до 10 формул для вычисления значения клетки МТП (например, рис. 3.16).

Дерево блоков также размещается в таблице MS EXCEL. Каждый узел дерева представлен в ней отдельной строкой. В этой строке задаются: булево выражение, связанное с описываемым узлом, и ссылки на клетки MS EXCEL, в которых размещаются формулы клеток МТП. Узлы дерева блоков расположены в префиксном порядке, по аналогии с деревом каталогов Norton Commander. Подчиненность узлов задается индикацией длины пути от описываемого узла до корня дерева (например, рис. 3.15).

Основной алгоритм работы МТП и интерпретация формул MS EXCEL в качестве формул МТП осуществляются макро-

сом, исполняемым под управлением MS EXCEL. Объем макроса — 180 строк исходного текста на языке Visual Basic [28].

С помощью разработанного средства решен ряд учебных задач. К ним относятся: приведенный выше пример сортировки элементов квадратной матрицы по спирали, стандартные операции алгебры матриц, решение системы линейных уравнений методом Гаусса и др.

Искусственным пользователям известно, что табличные процессоры поддерживают два способа программирования — процедурное и распределенное по данным. Побудительным мотивом для выполнения такой работы был вопрос об универсальности распределенного способа программирования. Ответ оказался тривиальным. Все, что можно программировать для клеток табличного процессора процедурными средствами, можно задать и формулами для этих клеток. Математический базис и аппарат для такого вывода представлен теоремой о структурировании [29] и теоремой о существовании функционально эквивалентной нормальной формы для любой рекурсивной детерминированной структурированной программы [30]. Возникший в ходе исследования проект МТП оказался для решения поставленной задачи ненужным, но он имеет, по мнению авторов, самостоятельную ценность.

Сохраняя все возможности распределенного программирования традиционного табличного процессора, МТП позволяет получать в ряде случаев более простые программы. Для обычного табличного процессора они характеризуются наличием циклически выполняемых формул с функцией If, сложными булевыми выражениями, наличием одних и тех же булевых выражений в различных формулах и нетривиальной последовательностью вычисления формул.

В дальнейшем предполагается развитие концепции распределенного программирования в МТП за счет разработки механизма распределенных подпрограмм. В теоретическом плане предполагается разработка модели сравнительной оценки сложности функционально эквивалентных распределенных программ для обычного табличного процессора и для МТП.

## Глава 4

# РЕАЛИЗАЦИЯ СППР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКОЙ

### 4.1. Архитектура и реализация распределенной объектно-ориентированной СППР для исследований и обеспечения энергетической безопасности

**Этапы принятия решений.** Решение задачи обеспечения энергетической безопасности страны (ЭБ) невозможно без предварительного выполнения большой исследовательской работы, связанной, во-первых, с анализом или выявлением узких мест в снабжении потребителей энергетическими ресурсами нужного объема и качества при критических и чрезвычайных ситуациях; во-вторых, с формированием набора мероприятий, реализация которых ослабит негативные моменты или приведет к устранению выявленных недостатков в процессе топливно- и энергоснабжения.

Невозможность проведения натуральных экспериментов на таком большом и сложном объекте исследований, как топливно-энергетический комплекс (ТЭК), требует организации и проведения многочисленных вычислительных экспериментов, результаты которых используются для обоснования альтернативных решений, предлагаемых ЛПР. Технология вычислительного эксперимента при проведении исследований по проблеме энергетической безопасности страны показана на рис. 4.1.

Первичная информация для исследований энергетической безопасности представлена в виде:

- 1) набора критических и чрезвычайных ситуаций, которые угрожают энергетической безопасности страны;
- 2) набора стратегий развития энергетики;
- 3) перечня индикаторов энергетической безопасности и их нормативных значений;
- 4) набора мероприятий, реализация которых может способствовать повышению уровня энергетической безопасности страны.

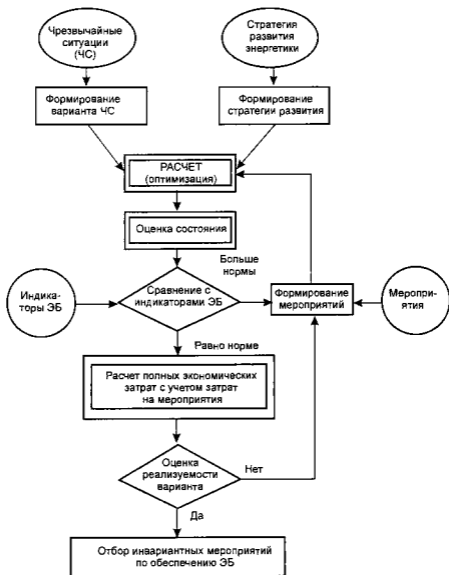


Рис. 4.1. Схема проведения вычислительного эксперимента.

Эта информация целиком определяется знаниями и квалификацией экспертов, привлеченных к исследованиям, и в настоящее время процессы ее формирования и использования, как правило, не формализованы. Исключение составляет этап, связанный с использованием стратегий развития ТЭК, которые



представлены в виде матриц условий для решения задач линейной оптимизации, хранящихся на магнитных носителях в виде текстовых файлов. Формирование самих стратегий развития (или матриц условий) в настоящее время выполняется непосредственно самим экспертом через корректировку матрицы условий в соответствии с теми направлениями развития энергетики и экономики, которые он сформулирует. Формирование сценария чрезвычайной ситуации также осуществляется экспертом посредством введения коэффициентов снижения производства и потребления энергетических ресурсов, которые впоследствии учитываются в матрице условий.

Матрица условий содержит исходные данные для работы программы оптимизации, а результат оптимизации — решение — передается для дальнейшего анализа, цель которого — определить состояние системы топливо- и энергоснабжения регионов страны. Анализ проводится экспертом на основе таблиц (балансовых, транспортных), формируемых из решения и матрицы условий. Этапы исследований, связанные с корректировкой матрицы условий, решением задачи оптимизации и анализом полученного решения, на данный момент времени являются наиболее формализованными по сравнению с остальными этапами информационной технологии (на схеме они отмечены двойной рамкой). Функции этих этапов реализованы в программно-вычислительном комплексе, описанном, в частности, в [1].

Сравнение результатов решения с индикаторами энергетической безопасности также осуществляется экспертом. Если эксперт делает вывод о низком уровне энергетической безопасности страны, то на следующем этапе он формирует варианты мероприятий, реализация которых должна повысить этот уровень. Каждый вариант мероприятий накладывается на матрицу условий, и вновь повторяется этап оптимизации.

Если анализ полученного решения показывает, что уровень безопасности оказался в пределах нормы, то ведется оценка полных затрат на реализацию  $i$ -го варианта развития энергетики с учетом  $j$ -го варианта мероприятий по обеспечению энергетической безопасности.

После того как все необходимые, с точки зрения эксперта, варианты просчитаны, наступает заключительный этап исследований — выбор инвариантных мероприятий по обеспечению ЭБ страны.

Анализ существующей технологии проведения вычислительного эксперимента показывает, что полностью формализовать или автоматизировать все имеющиеся этапы невозможно, поэтому почти на каждом этапе присутствует эксперт, который определяет направление исследований и их информационное наполнение. На этих этапах (на рис. 4.1 — прямоугольники с одинарной рамкой) могут быть использованы логико-лингвистические модели, применяющиеся в системах, основанных на знаниях (в экспертных системах). Поэтому в качестве основного компонента информационной технологии проведения исследований по энергетической безопасности страны предлагается СППР — система поддержки принятия решений, функциональная схема которой представлена на рис. 4.2.

СППР разрабатывается в соответствии с подходом, изложенным в разделе 1.1.

В качестве основных блоков СППР выделены следующие:

— блок "Оптимизатор", предназначенный для моделирования и тестирования альтернативных вариантов развития ТЭК с учетом ЭБ страны;

— блок "Анализ альтернативных решений", подготавливающий всевозможные таблицы, графики и схемы для эксперта, который на основе этих данных должен принять решение о направлении дальнейшего проведения исследований, а в случае завершения исследований сформировать набор мероприятий по повышению уровня ЭБ страны;

— блок "Формирование альтернативных вариантов" с соответствующими базами знаний, помогающий эксперту при формировании вариантов развития энергетики и сценариев чрезвычайных ситуаций.

Все данные, описывающие область исследований — ТЭК, хранятся в базе данных, организованной с помощью универсальной СУБД. Поддержка вычислительного эксперимента осуществляется с помощью интеллектуального интерфейса, который реализуется в рамках интеллектуальной системы, выполняющей одновременно функции интеграции перечисленных выше компонентов. Кроме того, желательно для интерпретации решений и для работы с данными использовать широко применяемые во всем мире геоинформационные технологии, а для этого включить в состав СППР геоинформационную систему.



Рис. 4.2. Функциональная схема СППР.

Исследования энергетической безопасности основываются на многовариантных оптимизационных расчетах, которые ведутся одновременно несколькими исследователями-экспертами. Чтобы обеспечить взаимосвязь и преемственность этих расчетов, необходимо организовать единое информационное и вычислительное пространство в виде интегрированной базы данных и локальной вычислительной сети (ЛВС). Причем ЛВС должна не просто обеспечивать информационный обмен файлами между машинами сети, но и позволять выполнять расчеты на более мощных машинах, не используя относительно мало-мощную технику лишь для выполнения интерфейсных и иллюстративных функций: формирование заданий, просмотр данных в табличном или графическом виде, интерпретация данных с помощью геоинформационной системы и т.д.

Применение метода возвратного проектирования при разработке распределенной СППР. Создание, сопровождение и надежное функционирование современных информационных систем (ИС), к которым можно отнести систему поддержки принятия решений по обеспечению энергетической безопасности страны, в условиях децентрализации управления энергетикой, ненадежных каналов связи — весьма нетривиальная задача, требующая новых подходов, отличающихся от тех, что применялись ранее

для проектирования и разработки жестких централизованных ИС.

Процесс разработки информационной системы проходит через последовательность этапов и может быть структурирован в двух измерениях [2, 3]:

- во времени, с разделением жизненного цикла на фазы и итерации;

- в компонентах процесса разработки, т.е. действиях с промежуточными документами и программными продуктами.

Структурирование проекта во времени состоит из следующих этапов:

- концептуализации — определения задач проектируемой системы;

- объектно-ориентированного анализа и проектирования — планирования необходимых действий и требуемых ресурсов; спецификации особенностей и создания архитектуры ИС;

- разработки — воплощения проекта посредством последовательности дискретных итераций;

- сопровождения — передачи системы в эксплуатацию (дистрибуции, доставки, обучения).

Структурирование в компонентах процесса разработки включает в себя следующие итерации:

- анализ требований к ИС;

- проектирование;

- изготовление (кодирование);

- тестирование.

Большинство распределенных ИС достаточно уникальны, и следовательно, их разработчики имеют ограниченный опыт. В таких условиях практически невозможно создать проект посредством последовательного продвижения вперед. Как правило, разработка ведется последовательными возвратно-поступательными итерациями с периодическим уточнением деталей на каждом шаге. Метод возвратного проектирования (Round Trip Engineering) — это стиль проектирования, имеющий дискретно-итеративный характер, с постепенным уточнением физической и логической картин системы. Объектно-ориентированное проектирование является возвратным, что подчеркивает взаимное влияние целого и частного в системе [2].

Модель объектно-ориентированной ИС состоит из совокупности непересекающихся уровней [3]:

— информационная модель — описание бизнес-процессов и сценариев;

— логическая модель — описание категорий, классов и отношений между ними;

— модель процессов включает процессы, межпроцессные взаимодействия и механизмы синхронизации;

— физическая модель включает объекты, модули и подсистемы.

Существуют промышленные программные продукты, в большей или меньшей степени автоматизирующие процесс возвратного проектирования ИС. Один из наиболее удачных примеров — система Rose фирмы Rational (США). Также весьма интересны продукты фирмы Inference (США). Несмотря на мощную поддержку, предоставляемую разработчикам ИС в создании информационных, логических, физических моделей, аналогичные средства для создания моделей процессов достаточно несовершенны и слабо приспособлены для возвратного проектирования современных распределенных объектно-ориентированных ИС. Основными причинами являются отсутствие надежных средств анализа сложных распределенных систем (проблема экспоненциального размера графа достижимости в общем случае не решена) и сравнительно недавнее развитие глобальных информационных сетей. Повсеместное внедрение глобальных ИС в условиях недостатка надежных каналов связи требует создания соответствующих инструментальных средств поддержки разработки распределенных ИС, функционирующих в условиях низкой надежности сетей.

Процесс возвратного проектирования выглядит как последовательность итераций на пути к окончательному варианту системы (рис. 4.3).

Первая итерация начинается с *формулирования модели процессов* — переход от реальной системы к некоторой логической схеме (абстрагирование). На этом этапе (например, в терминах окрашенных сетей Петри [4, 5]) формулируется модель процессов системы в виде диаграмм потоков данных.

Дальнейшие действия циклически повторяются в каждой последующей итерации:

— уточнение, анализ и отладка модели — анализ модели на достижимость, наличие вероятных конфликтов и тупиков; иерархический анализ модели, с возможной реорганизацией анализируемой системы. Для проведения анализа используется



Рис. 4.3. Итерационный процесс создания объектно-ориентированной распределенной СППР.

соответствующий аппарат сетей Петри. При отладке модели в распределенной вычислительной среде предоставляется возможность визуального мониторинга функционирования информационной системы, когда в режиме реального времени по изменению маркировок сети можно динамически контролировать изменение состояния ИС;

- трансляция модели в распределенную программу — генерируются все детали, охватываемые моделью (порождение / завершение процессов), межпроцессные взаимодействия, синхронизация процессов и т.д.;

- ручная модификация и отладка программы (внесение деталей, не покрываемых моделью);

- оценка итерации;

- автоматическая регенерация модели из исходных текстов программы — процесс, обратный трансляции модели, т.е. переход от текста программы к модели процессов ИС.

**Модель объектно-ориентированной распределенной СППР.** В основе предлагаемой модели лежит парадигма обобщенной объектной среды (ООС), базирующейся на распределенной объектной модели, понятии обобщенного объекта как элемента среды и на применении раскрашенных сетей Петри как средства описания взаимодействия между обобщенными объектами. Основное предназначение ООС — обеспечить программисту набор инструментов для создания распределенных объектно-ориентированных информационных систем. Существенным отличием данной системы от большинства имеющихся подходов является сквозное использование сетей Петри на

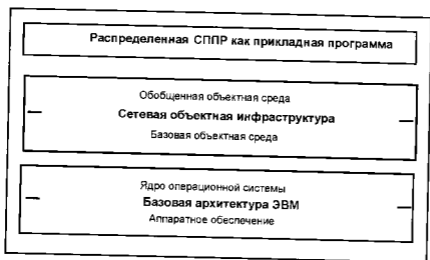


Рис. 4.4. Архитектура распределенной СППР.

всех стадиях возвратного процесса разработки информационной системы, а не только на этапе создания модели или анализа готовых текстов программ.

Распределенная объектно-ориентированная СППР определяется как совокупность независимых программ — агентов, взаимодействующих между собой в среде локальной или глобальной вычислительной сети.

На рис. 4.4 представлена модель распределенной СППР, включающая три основных уровня.

Уровень распределенной СППР, реализующейся как прикладная программа и состоящей из взаимодействующих программ-агентов.

Уровень сетевой объектной инфраструктуры, состоящий из подуровней обобщенной среды сетевых объектов и базовой объектной среды.

Уровень базовой архитектуры, включающий ядро операционной системы и аппаратное обеспечение.

**Требования к операционной среде.** Модель операционной среды СППР использует в основе технологию взаимодействующих компонентов (компонентную модель) и функционирует в среде сетевой объектной инфраструктуры, которая содержит:

— совокупность пространственно разнесенных ЭВМ, объединенных коммуникационными каналами в единую сеть;

— системное программное обеспечение, позволяющее представлять распределенную информационную систему в виде взаимодействующих программных объектов.

Рассматривая сетевую объектную инфраструктуру в виде совокупности взаимодействующих объектов, можно выделить два уровня абстракции: 1) уровень обобщенной объектной среды; 2) уровень базовой объектной среды.

*Обобщенная объектная среда (ООС)* — это механизм, позволяющий скрыть технологически сложные детали реализации модели процессов распределенных объектно-ориентированных ИС, что дает возможность значительно снизить затраты на разработку, сопровождение и обновление распределенных ИС.

В качестве *базовой объектной среды* выбрана распределенная объектная модель (Remote Method Invocation (RM)) [6] языка программирования Java как наиболее полно удовлетворяющая изложенным выше требованиям. Объектная среда состоит из набора компонентов, взаимодействующих между собой посредством сетевых коммуникационных протоколов. Ниже приведены типы компонентов, входящих в состав базовой объектной среды (рис. 4.5).

1. Компоненты обобщенной архитектуры посредников объектных запросов (CORBA) [7–9]. Сервер CORBA состоит из посредников объектных запросов (Object Request Broker) ORB и набора объектных служб, позволяющих разделять объекты, написанные на любом языке программирования, между приложениями, созданными на любом другом языке, и работает в сети разнородных ЭВМ под управлением различных систем. Протокол обмена объектами CORBA 2.0 основан на RPC<sup>1</sup> — протоколе.

2. Компоненты для высокопроизводительной распределенной обработки данных базируются на системе параллельных виртуальных машин (PVM) [10, 11] и соответствующих приложений в среде ОС UNIX. Коммуникационный протокол — RPC.

3. Компоненты с сохраняемым состоянием, основанные на технологии объектно-ориентированной СУБД [12, 13]. Поддерживаются прикладные программы в операционных системах UNIX и Windows. В настоящее время еще не разработан

---

<sup>1</sup>RPC (Remote Procedure Call) — стандартизованный механизм удаленного вызова процедур.



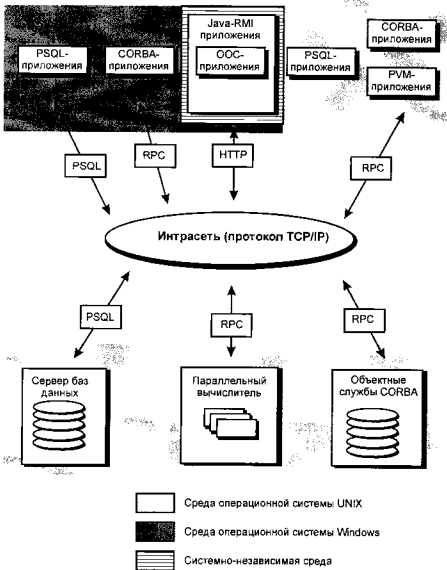


Рис. 4.5. Модель операционной среды.

PSQL — Postgres Structured Query Language, RPC — Remote Procedure Protocol, HTTP — Hyper Text Transmission Protocol, CORBA — Component Object Request Broker Architecture, PVM — Parallel Virtual Machines, TCP/IP Transmission Control Protocol / Internet Protocol, ООС — Обобщенная объектная среда, RMI — Remote Method Invocation.

единый SQL<sup>1</sup> — ориентированный протокол обмена, поэтому в данной работе используется частный вариант — протокол PSQL (Postgres SQL).

4. Легковесные объекты, написанные на языке программирования Java и способные мигрировать в пространстве сети. Приложения Java системно независимы, что означает возможность их использования практически во всех современных операционных системах без какой-либо доработки. Протокол обмена для Java — приложений — HTTP<sup>2</sup>.

Особенностью предлагаемого подхода являются:

— применение метода возвратного проектирования с использованием сетей Петри и инструментальной среды, основанной на ООС на протяжении всех этапов создания СППР;

— отсутствие каких-либо серьезных ограничений на архитектуру базового уровня. ООС предназначена для функционирования в среде слабосвязанных ЭВМ. Операционная система (или дополнительное системное программное обеспечение) должна поддерживать WWW — технологию сети Internet и виртуальную машину Java<sup>TM3</sup>.

Под эту категорию подпадает большинство диалектов операционной системы UNIX<sup>®4</sup> и все 32-разрядные диалекты системы Windows<sup>®5</sup>.

Несмотря на то что ООС может функционировать на отдельной ЭВМ, реальная эксплуатация предполагает наличие интрасети, т.е. локальной или глобальной сети машин, основанной на технологии Internet. Базовый протокол такой сети — протокол TCP/IP.

---

<sup>1</sup>SQL (Structured Query Language) — структурированный язык запросов.

<sup>2</sup>HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) — стандартизованный коммуникационный протокол, основанный на технологии гипертекста.

<sup>3</sup>Java — зарегистрированный торговый знак корпорации SUN Microsystems.

<sup>4</sup>UNIX — зарегистрированный торговый знак корпорации AT&T.

<sup>5</sup>Windows — зарегистрированный торговый знак корпорации Microsoft.

## 4.2. Интерпретация данных в СППР для исследований и обеспечения энергетической безопасности

В системах поддержки принятия решений особое внимание уделяется вопросам интерпретации данных, которые, с одной стороны, выступают как исходные и описывают предметную область, а с другой — являются результатами расчетов, выполненных с помощью каких-либо моделей. Они, как правило, хранятся в базах данных, организованных с помощью универсальных СУБД, которые не учитывают специфики предметных областей и не предоставляют экспертам, не владеющим навыками работы с СУБД, соответствующих легко доступных и понятных средств работы с данными.

В подобных системах разрабатывается "дружественный интерфейс", позволяющий эксперту оперировать данными в терминах его предметной области, предоставляя возможность интерпретировать их как в табличном, так и в графическом виде (всевозможные графики, гистограммы, диаграммы и т.п.).

В последнее время для работы с данными широко начинают применять геоинформационные технологии, которые выполняют привязку данных к географическим объектам на карте, в качестве которых, например, могут рассматриваться областные центры, центры экономических районов, энергетические объекты и т.п.

Архитектура СППР для исследований и обеспечения энергетической безопасности, разрабатываемая в СЭИ СО РАН, представлена на рис. 4.6.

Все компоненты распределений СППР можно объединить в три основные группы:

1. Локальная вычислительная сеть.
2. Группа серверных приложений.
3. Группа приложений-клиентов.

*Вычислительная сеть* рассматривается как совокупность ЭВМ, объединенных в сеть на основе коммуникационного протокола TCP/IP. Архитектура системы предполагает непредсказуемое отключение как отдельных узлов, так и сегментов сети. Обобщенная объектная среда (ООС) в этом случае автоматически производит перепланировку задачи на оставшихся ресурсах (если таковые имеются).

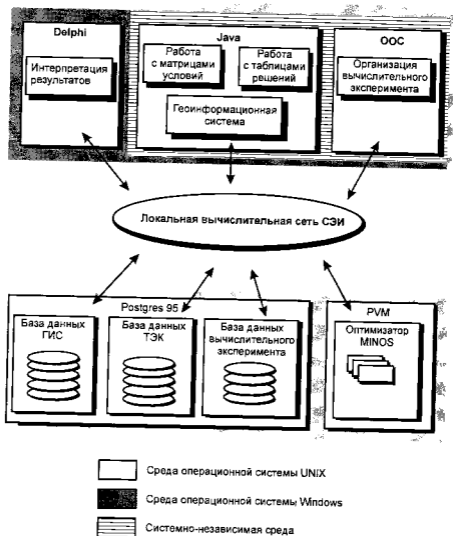


Рис. 4.6. Архитектура СППР.

Базовые операционные системы — MS Windows (3.1, 3.11, 95, NT) и UNIX (Linux v. 1.2.13).

Группа приложений-серверов содержит сервер базы данных, распределенный вычислитель и сервер объектных служб CORBA.

Сервер базы данных — объектно-ориентированная СУБД Postgres-95 [12, 13], функционирующая в среде ОС Linux.

*Распределенный вычислитель* — система параллельных виртуальных машин PVM v. 3.01, выполняющаяся на ЭВМ с ОС Linux.

*Сервер объектных служб CORBA 2.0 — ILU 2.0* [14].

*Группа приложений-клиентов* в основном использует язык программирования Java, что позволяет полностью сгладить проблему переносимости приложений. Исключение составляют приложения интерпретации результатов, создающиеся в системе Delphi v. 2.0 и интегрирующиеся в СППР посредством интерфейса CORBA 2.0, и приложение планирования вычислительного эксперимента, связывающее все компоненты в единое распределенное приложение. Это приложение создается в среде обобщенной объектной системы на языке программирования Kali Scheme [15].

В качестве приложений-клиентов далее рассматриваются две подсистемы СППР для исследований и гарантии энергетической безопасности, обеспечивающие интерпретацию данных: объектно-ориентированная геоинформационная и информационно-графическая системы.

**Объектно-ориентированная геоинформационная система.** С учетом географической привязки энергетических систем одним из возможных способов представления информации об их объектах является нанесение ее на географическую карту или создание так называемых тематических слоев этой карты. Нанесение данных на карту вручную — очень трудоемкий процесс, требующий автоматизации. Современные технологические достижения в области ВТ способны значительно облегчить эту работу. Применение ЭВМ может не только упростить процесс нанесения данных на карты, но и предложить качественно новый способ взаимодействия с различными созданными ранее расчетными программами.

Задачи хранения и работы с электронными картами (ЭК) порождают множество проблем. Наиболее существенная из них — эффективная организация данных и быстрое извлечение определенных выборок (например, всех ЛЭП с напряжением больше 200 кВ в заданном районе).

Традиционные реляционные СУБД не обеспечивают эффективного решения этих задач. Информация об одном слое карты может включать точки (точечные объекты), полилинии (ЛЭП), немасштабные объекты, многоугольники (экономические районы). Используя реляционную СУБД, необходимо

перекраивать эти объекты, группировать с однотипными и т.д., что резко усложняет задачу. Одним из наиболее приспособленных к решению таких проблем представляется объектно-ориентированный подход (ООП), а разумной альтернативой реляционной СУБД — объектно-ориентированная СУБД (ОО СУБД). Применение объектно-ориентированной геоинформационной системы (ОО ГИС) в качестве подсистемы СППР для исследований и обеспечения ЭБ позволит построить целостную систему, которая оптимальным способом будет использовать объекты ОО СУБД и строить требуемые модели графических объектов.

Если эксперту необходима информация по энергетическим системам или по транспорту энергоресурсов между областями, то ГИС дает возможность наглядно показать эту информацию, располагая ее на фоне карты административного деления страны.

Основным понятием ОО ГИС является объект. Объект обладает состоянием, поведением и индивидуальностью [2].

Состояние объекта характеризуется перечнем всех возможных (обычно статических) атрибутов данного объекта с их текущими значениями (обычно динамическими).

Поведение характеризует то, как объект реагирует на воздействие других объектов с точки зрения изменения состояния этих объектов и передачи сообщений.

Индивидуальность объекта — такие атрибуты объекта, которые отличают его от других объектов.

ОО ГИС содержит различные объекты, из которых однотипные группируются в классы. Одним из наиболее важных свойств ООП является динамическое связывание [16], которое позволяет в режиме реального времени передавать изменения базового уровня объектов на менее детальный уровень.

Модель ОО ГИС приведена на рис. 4.7.

1. **Пользовательский интерфейс** есть система меню для работы с электронной картой.

2. **Картографическое изображение** — визуальное представление выбранного тематического слоя (тематических слоев) электронной карты.

3. **ОО СУБД** — ядро ОО ГИС, которое позволяет быстро генерировать запросы и осуществлять выборки из БД.

4. В **ОО БД** данные хранятся как совокупность объектов, которые:

— могут агрегировать в себе другие объекты, например,



т.е. хранятся в том же самом виде, что и в программе;

— наследуют свойства и данные других объектов (например, ГЭС наследует свойства электростанции и т.п.).

В базе данных хранятся не только данные об объектах, но и методы работы с ними. Таким образом, для пользователя скрыт вызов некоторых процедур. Например, для определения КПД ГЭС и ТЭЦ используются различные методы, хранящиеся в различных процедурах, но пользователю достаточно выбрать объект и запросить КПД.

Для пополнения библиотеки электронных карт (при отсутствии финансирования на их покупку) была отработана технология подготовки и подключения к ГИС собственных электронных карт (на примере реализации карты административного деления России и стран СНГ), включающая:

- оцифровку на дигитайзере в формате DXF,
- конвертирование формата DXF в формат данных для СУБД Postgres-95 с помощью конвертора, созданного средствами компилятора и интерпретатора (Jacc и Lex) языка Java.

Пример работы ГИС представлен на рис. 4.8, где изображены тематические слои электронной карты (гидрография и газопроводы) и примеры интерфейса для работы с электронной картой. Программа на языке Java осуществляет привязку энергетических объектов, хранящихся в базе данных, к элект-

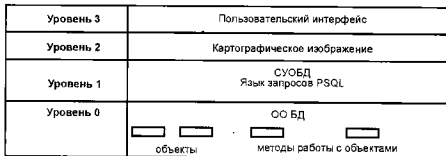


Рис. 4.7. Модель ОО ГИС.

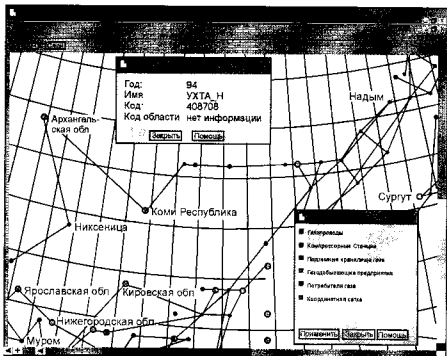


Рис. 4.8. Пример работы ГИС.

ронной карте. Во время работы программы на экране отображаются все объекты ТЭК, о каждом из которых можно получить информацию, указав на карте нужный объект. В будущем планируется реализовать в программе возможность работать с данными по всем крупным энергетическим объектам России, а не только газовой промышленности.

**Информационно-графическая подсистема интерпретации результатов расчетов.** В разрабатываемой СППР процесс принятия решения основывается на анализе и сравнении результатов многовариантных расчетов оптимизации развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК), при этом учитываются требования по обеспечению энергетической безопасности страны. Для экономической интерпретации, осуществляемые экспертом, результаты расчетов оформляются в виде набора таблиц, характеризующих основные показатели территориально-производственной структуры ТЭК. Эти таблицы включают в себя балансы топливно-энергетических ресурсов по стране, областям и экономическим районам, межрайонные потоки отдель-



ных видов топлива и энергии, а также показатели замыкающих затрат основных видов энергоресурсов [17].

Для реализации информационно-графической подсистемы интерпретации результатов расчетов выбрана инструментальная система DELPHI — среда визуального проектирования приложений для баз данных [18] с широкими графическими возможностями. Использование системы DELPHI позволяет достаточно быстро разрабатывать Windows-подобный интерфейс для работы с базами данных на основе современной технологии проектирования с готовыми компонентами.

В рамках подсистемы пользователю предоставляются такие возможности, как:

- просмотр нескольких вариантов расчета в режиме многооконного интерфейса;
- формирование выходных таблиц с помощью макетов, разрабатываемых пользователем, в которых указывается структура формируемой таблицы, а также есть возможность приводить формулы с арифметическими операциями над строками и столбцами таблицы аналогично электронным таблицам;
- выборка из решения данных, удовлетворяющих заданному критерию, и просмотр их в графическом виде;
- подготовка всевозможных отчетов с помощью пакета Report Smith, входящего в состав DELPHI.

На рис. 4.9 приведен пример интерфейса, представляющий собой Windows-подобное окно с тремя дочерними окнами и четырьмя кнопками:

- в правом верхнем окне осуществляется просмотр значений выбранного решения;
- в левом верхнем окне можно просмотреть таблицу, в которой хранятся значения дефицитов потребления по всем энергоресурсам и всем районам, полученные из анализируемого решения;
- в нижнем окне представлена графическая интерпретация дефицитов потребления;
- первая кнопка (слева) используется для выбора анализируемого решения;
- вторая — для расчета дефицита потребления энергоресурсов;
- третья — для представления дефицитов потребления в графическом виде;

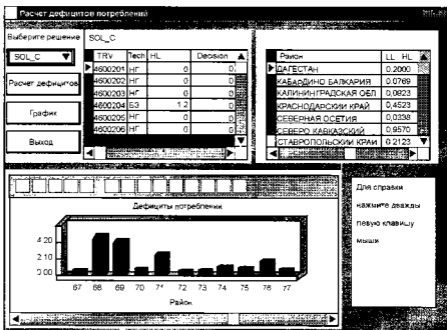


Рис. 4.9 Пример графического и табличного представления информации при анализе дефицитов потребления энергоресурсов.

— четвертая — для возврата в предыдущее окно интерфейса.

Кроме того, реализован информационно-справочный компонент для работы с отчетной базой данных, в которой хранится топливно-энергетический баланс энергоресурсов по всей стране с выделением административных районов. Эта подсистема предоставляет возможность делать выборки по районам, энергоресурсам, добыче, потреблению и транспорту энергоресурсов и использовать средства иллюстративной графики (диаграммы, гистограммы и т.д.) для анализа и оценки выбранных данных. Также предусмотрена подготовка протоколов работы, которые позволяют накапливать выбранные данные, а затем этот протокол можно выдать на печать.

База данных (БД) для разрабатываемой СППР существует в двух версиях: в виде файлов СУБД Paradox и в отчетах СУБД Postgres на файл-сервере. Дальнейшее развитие подсистемы интерпретации предполагает разработку их сетевой версии с подключением ODBC драйверов для организации работ с базой данных формата Postgres.

### 4.3. Информационная поддержка оперативно-диспетчерского управления единой системы газоснабжения России

Центральное производственно-диспетчерское управление РАО "Газпром" (ЦПДУ) — верхний уровень управления Единой системы газоснабжения (ЕСГ) России. В качестве подчиненных ему выступают:

- пост управления на уровне цеха компрессорной станции;
- диспетчерский пункт на уровне компрессорной станции, линейной части;
- центральная диспетчерская служба регионального предприятия — производственного объединения (ПО).

Основными задачами Центрального производственно-диспетчерского управления являются:

1) обеспечение бесперебойного снабжения народного хозяйства России и населения газом в объемах, предусмотренных утвержденными балансами и заключенными договорами и контрактами;

2) разработка и осуществление технологических схем и режимов транспорта газа, контроль за закачкой и отбором газа по подземным хранилищам;

3) организация рациональных межсистемных потоков как по системе газоснабжения в целом, так и в отдельных экономических районах;

4) поставка газа на экспорт и прием его от других государств;

5) оперативный контроль за потреблением газа основными отраслями промышленности России, использованием газового топлива через соответствующие диспетчерские службы предприятий и инспекции Управления газового надзора.

Уже более 10 лет эффективное управление газовым комплексом осуществляется с применением автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ ЕСГ). Непосредственное участие в разработке, внедрении и совершенствовании этой системы принимали специалисты АО "Газавтоматика".

Функциональное назначение АСДУ состоит в получении, обработке и анализе оперативных диспетчерских данных о добыче газа, газового конденсата, нефти, выработке серы, работе газоперерабатывающих заводов, транспорте газа, поставках его потребителям России, данных по основным отрас-

лям хозяйства страны, экспортно-импортным объемам, закачке-отборе газа по газохранилищам и выдаче соответствующей отчетно-оперативной документации, необходимой в повседневной деятельности управлений, отделов и руководства РАО "Газпром".

В марте 1995 г. введена в действие качественно новая информационно-вычислительная система ЦПДУ ЕСГ [19]<sup>1</sup>. Реализация проекта позволяет осуществлять управление отраслью в рамках АСДУ ЕСГ на современном уровне развития информационных технологий.

Ниже рассматриваются элементы интегрированной системы обмена данными, обеспечивающей службы ЦПДУ ЕСГ.

Состав и периодичность данных, поступающих в ЦПДУ, определяются многообразием функциональных задач верхнего уровня управления. Первичная обработка и накопление данных происходят в единой технологической БД. Единая технологическая база реализована в виде реляционно-иерархической структуры в среде СУБД ADABAS. Количество файлов порядка 100, число записей варьирует от нескольких сотен до нескольких сотен тысяч. Выделяются две основные группы: файлы, содержащие нормативно-справочную информацию, обновление которой носит эпизодический характер, и файлы, содержащие оперативную информацию, обновление которой происходит по определенному регламенту (ежесуточно, ежемесячно, через каждые 4–6 ч). Среди нормативно-справочных файлов присутствуют:

- классификаторы различных типов объектов (названия, принадлежность региону);
- технологические паспорта объектов, входящих в систему управления транспорта газа;
- описатели взаимного расположения объектов управления на газотранспортных магистралях;
- хранилище агрегированных показателей, относящихся к линейной части газотранспортных систем.

Файлы оперативной информации содержат:

- планово-учетную информацию, поступающую по системе сбора;

<sup>1</sup> В разработке и принятии проекта инженерно-технического обустройства РАО "Газпром" участвовали немецкая фирма АЕГ, специалисты ЦПДУ, фирмы "Информгаз", Акционерного общества "Газавтоматика".

— режимно-технологическую информацию, поступающую по системе сбора;

— данные, идентифицирующие режимы магистральных систем, — результаты вычислений диспетчерского комплекса задач.

На основе данных осуществляются регламентные функции оперативного контроля, а именно:

— прямой контроль в реальном времени (по объектам прямого контроля ЦПДУ);

— контроль за запасами газа в трубках, их изменением и тенденцией этих изменений (часовой цикл);

— контроль перетоков между региональными предприятиями и давления на границах (в реальном времени и часовом цикле);

— контроль закачки/отбора в ПХГ (в реальном времени и часовом цикле);

— контроль режима компрессорных станций (в реальном времени и часовом цикле).

Алгоритм оперативного управления ЦПДУ предусматривает решение задач планирования, прогнозирования, моделирования режимов. Различные категории пользователей ориентированы на работу со следующими проблемно-ориентированными БД:

— БД, предназначенной для хранения и выдачи данных различной периодичности (на основе СУБД ORACLE);

— БД коллективного доступа в локальной сети ПЭВМ, сопряженной с ЭВМ;

— локальными базами данных конечных пользователей.

Реализация выполнена на базе следующих технических средств: локальная сеть, серверы, рабочие места руководства и диспетчеров на базе рабочих станций (WS), рабочие места специалистов на базе ПЭВМ (PC).

Источником оперативной информации является автоматизированная система сбора и передачи данных, которая связывает центр и отдаленные узлы замера. Единая технологическая база размещена на MAINFRAME COMPAREX. Передача данных в проблемно-ориентированную БД (на основе СУБД ORACLE), БД коллективного доступа и в систему отображения VS750 осуществляется как трансфер файлов в формате ASCII через локальную вычислительную сеть со стандартным протоколом TCP/IP. Особенность передачи нормативно-справочной

информации состоит в том, что наряду с режимом корректировки предусмотрен режим первоначальной загрузки.

БД коллективного доступа и локальные БД представляют собой реляционные структуры в среде СУБД DBASE и подобных. БД коллективного доступа расположены на файл-сервере (количество файлов порядка 10, число записей варьирует от нескольких десятков до нескольких тысяч) и содержат данные о режимах работы систем за текущий месяц и некоторые архивные данные за текущий год. Для актуализации информации происходит обмен текстовыми файлами, сформированными на основе единой технологической базы данных. Службы ведения баз данных и проведения оперативных расчетов формируют соответствующие запросы с указанием даты расчета.

Локальные БД располагаются на рабочих станциях конечного пользователя, являются "клиентами" БД коллективного доступа, но отличаются меньшими размерами и ограниченным временем существования.

Проблемно-ориентированная БД функционирует в виде реляционной структуры в среде СУБД ORACLE. Она содержит планово-учетную и режимно-технологическую информацию, сгруппированную в таблицы:

- ежесуточного обновления,
- сеансового обновления (несколько раз в сутки),
- архивные данные (квартал, год).

Обмен данными с единой технологической БД осуществляется на основе коммуникационных процессов, которые отслеживают изменения транзитных файлов. Непрерывные коммуникационные процессы, разработанные фирмой АЕГ, циклично проверяют директорию импорта на сервере ЦПДУ на появление обновленных файлов.

Данные, представленные в этих БД, прошедшие предварительный контроль и анализ, лежат в основе задач оперативно-диспетчерского управления режимам работы объектов добычи, переработки, транспорта, распределения газа, нефти, конденсата, подземного хранения, экспорта и импорта.

В рамках этой функции ЦПДУ осуществляет планирование в регламентном режиме, т.е. разработку комплекса уставок для центральных диспетчерских служб региональных предприятий. Эти уставки могут разрабатываться в нескольких вариантах, из которых выбирается один и утверждается в качестве плана.

Перспективное планирование выполняется ЦПДУ (совместно с другими управлениями РАО "Газпром") во временном интервале на несколько (5—20) лет вперед с разбивкой по годам и кварталам/месяцам.

Наряду с процессами обработки и хранения информации решаются задачи визуального отображения данных. На основе информации, содержащейся в единой технологической БД, формируются сводки непосредственного отображения. Задачи, работающие с проблемно-ориентированными БД, формируют табличные и графические документы средствами прикладных пакетов.

В состав базового программного обеспечения новой информационно-вычислительной системы ЦПДУ ЕСГ входит система отображения VS750. В рамках этой системы реализован вывод схем, таблиц и графиков на большое табло диспетчерского зала и на рабочие места диспетчеров.

Система управления базируется на рабочих станциях, функционирующих на основе операционной системы UNIX. На рабочих станциях SUN используется операционная система СОЛЯРИС, состоящая из SUN OS и оболочки OPEN WINDOWS. Модель данных системы VS750 представляет собой набор статических и динамических переменных процесса. Статическая часть задается на этапе проектирования, динамическая описывает актуальное состояние процесса.

База данных SYBASE системы VS750 рассчитана на 100 переменных, предназначенных для отображения планово-учетной и режимно-технологической информации в виде таблиц, кривых, изменяющихся атрибутов графических элементов.

Ниже рассмотрены различные стадии обработки и отображения диспетчерской информации, поступающей из производственных объединений — регионов управления, подчиненных ЦПДУ, а также из большого числа задач, функционирующих в рамках АСДУ<sup>1</sup>.

В единую технологическую базу данных по системе сбора наряду с другими поступают данные о давлениях и температурах в узлах трассы, объемах потребления газа населенными пунктами и промышленными предприятиями. В результате работы комплекса "Оперативный диспетчерский контроль и

<sup>1</sup>Материал излагается на примере работы Инженерного Центра по автоматизации режимов ЕСГ АО "Газавтоматика"

анализ (часовой и суточный циклы)" на основе указанных данных вычисляются и записываются в БД технологические показатели, характеризующие режимы газотранспортных систем: запас газа, коэффициенты эффективности и теплопередачи, фактические потоки газа. Задачи автоматизации диспетчерского управления решаются на базе математических моделей многоуровневой системы управления газотранспортными системами в реальном масштабе времени [20]. Исходные и результирующие показатели группируются в выходных табличных документах — последовательных файлах, в дальнейшем передаваемых для отображения на АРМ специалистов и диспетчеров ЦПДУ.

Из единой технологической БД в БД коллективного доступа перекачивается информация, описывающая баланс газа в ПО (ресурсы — распределение).

Комплекс "Анализ динамики балансов и режимов ЕСГ" предоставляет инструмент для сравнительного анализа динамики балансовых показателей ПО, объемов газопотребления отдельными населенными пунктами, сопоставления фактических и прогнозных значений, построения табличных и графических выходных документов. В качестве временного хранилища организуется локальная БД на АРМ специалиста.

Планово-учетная и режимно-технологическая информация передается в проблемно-ориентированную БД в среде СУБД ORACLE. В состав базового программного обеспечения входят графические средства UNIGRAF и TOOLMASTER, позволяющие формировать графические документы, описывающие отдельные технологические объекты и регионы управления, доступные для АРМ диспетчера.

Система отображения VS750, входящая в базовое программное обеспечение, предоставляет диспетчеру электронный диспетчерский журнал — набор графических схем транспорта газа с разбивкой по ПО и режимно-технологических таблиц по отдельным системам. Введение в действие этого инструмента означает качественное изменение деятельности диспетчера, освобождение от лишних бумажных документов. Схемы и таблицы можно просматривать на большом табло диспетчерского зала и на шести рабочих станциях.

Таким образом, в ЦПДУ РАО "Газпром" создана принципиально новая система автоматизированного управления объектами ЕСГ, основанная на вычислительной технике и ново-



го поколения. Ее развитие позволит улучшить качество управления газовым комплексом, уменьшить нерациональные затраты, связанные с перераспределением потоков газа.

#### **4.4. Использование графической системы АРМТЕСТ для решения задач развития теплоснабжения**

В результате развития теплофикации в нашей стране снабжение теплом во всех крупных городах России осуществляется на базе централизованного теплоснабжения (от ТЭЦ или крупных котельных). При этом существенны затраты на транспорт тепла, а капвложения в тепловые сети сопоставимы со стоимостью источников тепла. Развитие и эксплуатация сложных теплоснабжающих систем (ТСС) делают все более актуальными вопросы их надежности и управляемости.

Проблемой построения надежных ТСС в течение многих лет занимается СЭИ СО РАН. Разработаны методы и алгоритмы расчета потокораспределения, оптимизации структуры и параметров ТСС, расчета показателей надежности теплоснабжения потребителей [21, 22]. Созданы пакеты программ, которыми пользовались многие эксплуатационные, наладочные и проектные организации. В ходе выполнения работ по управлению, развитию и реконструкции систем теплоснабжения ряда городов сформировался общий подход к построению надежных ТСС, разработаны методика и алгоритм построения тепловых сетей с учетом требований, предъявляемых к надежности снабжения потребителей теплом. В настоящее время реализуется диалоговая система для проектирования надежных ТСС [23], блок-схема общего алгоритма которой приводится на рис. 4.10.

В качестве операционной среды при разработке этой системы используется интегрированная система АРМТЕСТ [24]<sup>1</sup>.

Общий алгоритм построения надежных тепловых сетей предусматривает декомпозицию поставленной задачи на несколько подзадач и затем их увязку в едином алгоритме. Предполагается неоднократное обращение к решению отдельных задач до тех пор, пока мы не получим искомое решение. Система

<sup>1</sup>АРМТЕСТ – разработка ВИСИ (С. Петербург)

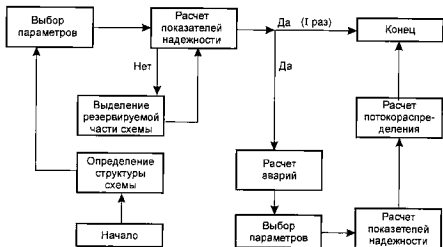


Рис. 4.10. Блок-схема алгоритма диалоговой системы.

АРМТЕСТ представляет большие возможности для реализации алгоритма диалоговой системы.

Работа со схемой тепловой сети начинается с рисования ее на экране дисплея, при больших размерах схемы она переносится в компьютер с помощью сканера или дигитайзера.

Система АРМТЕСТ имеет графический редактор (ГР), который позволяет показать на экране план местности, карту города, а на их фоне — наносить схему ТСС. При этом системой создаются базы данных всех объектов, составляющих ТСС, благодаря диалоговой оболочке, связанной с ГР. Для тепловых сетей система сформирует базы данных (БД) по источникам, насосным станциям, тепловым камерам, потребителям и участкам ТСС. Эти БД можно дополнять по желанию пользователя, редактировать, использовать в качестве исходных данных при расчетах и хранить в них результаты расчетов.

Кроме формирования, хранения и редактирования БД объектов ТСС АРМТЕСТ позволяет:

- просматривать данные и результаты расчетов непосредственно на схеме ТСС;
- решать задачи, связанные с наладкой, эксплуатацией и функционированием ТСС;
- организовывать последовательность расчетов задач, реализуя при этом отдельные алгоритмы.

Именно таким образом нами реализуется алгоритм построения надежных ТСС.

В настоящее время в рамках АРМТЕСТ работают пакеты:

- оптимизации параметров многоконтурных и разветвленных ТСС (СОСНА);
- сетевых потоковых моделей;
- расчета показателей надежности теплоснабжения потребителей.

Заканчивается доработка пакета расчета потокораспределения в сложных ТСС, а также предполагается включить пакет по оптимизации структуры ТСС (для определения мест расположения, типа и числа источников тепла).

Заметим, что система АРМТЕСТ разработана и применялась для решения задач функционирования теплоэнергетических систем. При попытке использования ее для задач развития и проектирования ТСС возникли некоторые проблемы. Так, в результате работы пакета по оптимизации параметров, в некоторых узлах ТСС появлялись насосные станции, которых не было до этого на схеме сети (в качестве объектов они отсутствуют). Алгоритмически наличие таких насосных станций учтено, но графически пока не реализовано.

Для адекватного отображения схемы сети используются возможности задания нескольких "режимов" объектов.

Для объекта "участок" определены следующие режимы:

- участок подающей и обратной магистрали;
- участок обратной магистрали;
- участок подающей магистрали;
- участок отключен;
- существующий участок;
- участок проектируемый;
- участок с насосной станцией на подающей магистрали и т.д.

Режимы отображаются на экране различным цветом и типом линий. С помощью задания соответствующих режимов объектов имеется возможность формирования расчетных схем сложных ТСС для потокораспределения.

Возможность "выделения" объектов используется для указания на схеме потребителей, для которых будут считаться показатели надежности. Для цепочки "выделенных" участков строятся пьезометрические графики.

АРМТЕСТ предоставляет большие возможности для отображения данных на схеме сети посредством создания специальных "форм данных". Обращение к соответствующей "форме" позволяет показать на экране результаты расчета того или иного пакета, проанализировать полученное решение. Кроме того, АРМТЕСТ позволяет создавать и использовать различные "Справочники" и "Системные базы данных", в которых может храниться информация по схеме, источникам, насосам, трубопроводам, технико-экономические показатели и т.п.

АРМТЕСТ позволяет также строить иерархические структуры. Для ТСС на первом уровне иерархии могут находиться магистральные тепловые сети, на следующем — внутриквартальные сети и т.д. — до схем систем отопления отдельных домов. Каждый из объектов нижнего уровня имеет собственное графическое изображение, базу данных и свои расчетные модули.

Основным видом общения пользователя с системой АРМТЕСТ является система иерархического меню. Все операции, связанные с формированием изображения и передвижением по меню, производятся с помощью манипулятора "мышь" и клавиш перемещения курсора.

Таким образом, система АРМТЕСТ весьма перспективна для разработки СППР в исследованиях ТСС.

#### **4.5. Опыт эксплуатации и перспективы развития информационных технологий на примере Загорской ГАЭС**

Среди различных аспектов применения компьютерных технологий в энергетике особый интерес представляет направление, связанное с созданием экспертных систем, позволяющих при решении технологических задач применять специальные знания человека-эксперта.

За рубежом работа над созданием подобных систем началась значительно раньше, чем в России, и энергетическая отрасль неизменно входила в число их заказчиков и пользователей [25].

В России разработаны и эксплуатируются несколько вариантов экспертных систем для тепловых и электроэнергетических станций. К сожалению, ни в Российской Федерации, ни в странах ближнего зарубежья ни на одной гидро-

электростанции не существует подобных систем. В то же время известно, что за рубежом экспертные системы на ГЭС и ГАЭС достаточно широко распространены и эффективно эксплуатируются. В качестве примера может быть названа система VIMOS, разработанная фирмой АБВ (АВВ) и устанавливаемая на вновь строящиеся ГЭС и ГАЭС Швеции комплексно с гидроэнергетическим оборудованием.

Проблема создания и внедрения экспертных систем для ГАЭС особенно актуальна из-за резко перемещенного характера работы оборудования ГАЭС и отсутствия в России опыта его эксплуатации.

Основными проблемами на особенностях эксплуатации гидроаккумулирующих электростанций на примере единственной в России Зарской ГАЭС.

Гидроаккумулирующие электростанции являются наиболее эффективными типом маневренных электростанций, позволяющих надежностью и экономичностью работы энергообъектов. Существенно возрастает значение ГАЭС, способных выравнивать суточные графики электрических нагрузок энергообъектов, имеющих в своем составе мощные тепловые (ТЭЦ, ГРЭС) или атомные (АЭС) электростанции, оборудованные котлами весьма чувствительно к резким изменениям нагрузки.

Зарская ГАЭС расположена в центре европейской части России, и ее мощность (энергия) используется в объединенной энергосистеме Центра (ОЭС Центра).

Суточные графики электрических нагрузок ОЭС Центра имеют ярко выраженный пиковый характер. В то же время генерирующие мощности ОЭС Центра и в особенности Московского, сосредоточены в основном на тепловых электростанциях, режим которых определяется графиком тепловых нагрузок. Это создает трудности как с реализацией избыточной некомпенсируемой электрической мощности в ночные часы (провалы графика электрических нагрузок), так и с покрытием пиковых частей графика. Технические трудности усугубляются экономическим ущербом и ухудшением экологической обстановки в случае привнесения тепловых электростанций для покрытия пиковых частей графика из-за пережогов топлива и увеличения вредных выбросов в атмосферу.

Эффективность Зарской ГАЭС при ее работе в энергосистеме объединения определяется уникальным сочетанием функций плани-

ковой станции (в генераторном режиме) и потребителя-регулятора (в насосном режиме), который в часы ночного провала суточного графика электрических нагрузок обеспечивает потребление избыточной электрической мощности теплофикационного оборудования энергообъединения. Кроме того, высокая маневренность гидроэнергетического оборудования ГАЭС позволяет использовать станцию для регулирования напряжения в системообразующей сети 500 кВ.

Введенная в эксплуатацию в 1988 г. Загорская ГАЭС интенсивно используется при регулировании режима работы ОЭС Центра. Более того, прогнозные проработки тенденций и масштабов развития энергетической базы ОЭС Центра и Мосэнерго показывают: в перспективе сохраняются, с одной стороны, устойчивый дефицит маневренной мощности, а с другой — избыток мощности в ночные часы. Таким образом, в перспективе сохраняется объективная необходимость строительства в центральном регионе России новых ГАЭС с их уникальными возможностями осуществлять двойное регулирование.

В составе Загорской ГАЭС — шесть обратимых гидроагрегатов суммарной мощностью 1200 МВт в генераторном режиме и 1320 МВт в насосном режиме. Таким образом, суммарный диапазон регулирования мощности составляет 2520 МВт. Генераторы-двигатели связаны с сетью 500 кВ через блочные трансформаторы связи напряжением 15,75/500 кВ и открытое распределительное устройство 500 кВ (ОРУ-500). В насосный режим (режим двигателя) агрегаты пускаются с помощью одного из двух пусковых тиристорных устройств (ПТУ) — статических преобразователей частоты.

На рис. 4.11 показаны наиболее характерные суточные графики работы Загорской ГАЭС в рабочие дни в летний (а) и зимний (б) сезоны.

Резко переменный характер работы ГАЭС и многообразие ее функций предъявляют особые требования к ее надежности и своевременности исполнения диспетчерских заданий, что возможно не только при условии соответствующей надежности оборудования, но и при наличии добротного информационного обеспечения эксплуатационного и административно-технического персонала. По этой причине на Загорской ГАЭС особое внимание уделяется разработке и развитию информационно-измерительной подсистемы, создаваемой на базе

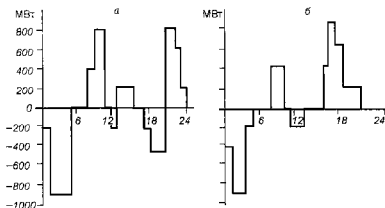


Рис. 4.11. Суточные графики работы Загорской ГАЭС: а — летний, б — зимний.

программируемых микропроцессорных контроллеров и персональных ЭВМ.

На рис. 4.12 представлена структурная схема действующей трехуровневой распределенной информационно-измерительной подсистемы Загорской ГАЭС, в которую интегрирована общестанционная база данных гидроэнергетического оборудования.

На нижнем (объектном) уровне на базе микропроцессорных контроллеров семейства SLC-5 американской фирмы ALLEN BRADLEY организованы три взаиморезервированные локальные производственные сети (ЛПС). На этом уровне проводятся предварительная обработка первичной информации и ее регистрация с ограниченным сроком хранения.

Фирменный пакет программ APS, установленный на контроллерах, фиксирует изменение событий, буферизирует их и передает обработанную информацию на второй уровень.

Последующая обработка информации и дублированная регистрация ее изменений ведутся на среднем уровне, представляющем собой локальную вычислительную сеть информационных серверов, состоящую из концентраторов (источников) информации, файл-сервера сети среднего уровня и информационного сервера. Общестанционная база данных, содержащая ретроспективную информацию по основному гидроэнергетическому оборудованию ГАЭС, размещается на файл-сервере второго уровня. Главная база данных размещена на информационном сервере и содержит информацию обо всех контролируемых сигналах на текущий момент времени.

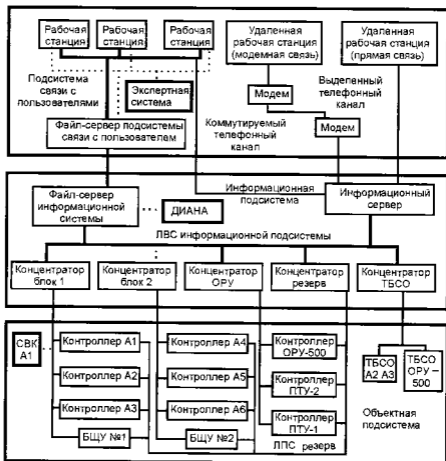


Рис 4.12. Структурная схема действующей информационно-измерительной подсистемы Загорской ГАЭС.

Одной из важнейших функций информационного сервера является обеспечение двустороннего взаимодействия с рабочими станциями верхнего уровня — распределенной подсистемой связи с пользователями. По запросу от рабочих станций верхнего уровня информационный сервер передает технологическую информацию для формирования отчетов и вывода их на дисплей и/или печать. Кроме того, информационный сервер контролирует работу элементов всего аппаратно-программного комплекса нижнего и среднего уровней и в случае



обнаружения отказов осуществляет реконструкцию системы с исключением поврежденных участков.

Программное обеспечение среднего уровня построено на основе сетевого программного комплекса Control View фирмы ALLEN BRADLEY. Программное обеспечение прикладных задач, выполняемых информационным сервером, написано на языке C-Toolkit в среде Control View.

В качестве концентраторов (источников) информации и серверов среднего уровня, а также файл-сервера и рабочих станций верхнего уровня используются персональные ЭВМ общего назначения. Минимальная конфигурация концентраторов — 386DX/40 RAM 8Mб, информационного сервера — 486DX4/100 RAM 16Mб HDD 2 × 1 Tb, рабочих станций верхнего уровня — 386DX/40 RAM 4Mб.

Структура информационно-измерительной подсистемы Загорской ГЭС имеет широкие возможности для последующего развития. На ближайшую перспективу с целью увеличения объема и качества технологической информации, предоставления персонала электростанции, предусматривается развитие подсистемы в следующих направлениях:

1. Увеличение перечня контролируемого оборудования, входящего в технологическую цепочку генераторов, с целью организации полного контроля наиболее ответственных технологических операций — пуска и останова агрегатов.
2. Внедрение дополнительных программно-аппаратных средств, позволяющих реализовать ряд дополнительных функций: дистанцию и анализ параметров аварийных ситуаций, мониторинг электрической сети, автоматизацию коммерческого и технического учета электроэнергии, автоматизацию формирования оперативных отчетных документов и управления.
3. Разработка и внедрение систем контроля и управления электродвигателями вспомогательного оборудования, непосредственно влияющего на надежность работы и живучесть станции (компрессорные установки, насосные станции дренажных систем и т.п.), на базе интеллектуальных контроллеров электродвигателей.
4. Разработка и внедрение подсистем автоматического управления режимами станций (РАМ — групповой регулятор активной мощности, ГРН — групповой регулятор напряжения).

Сравнительно небольшой и, на первый взгляд, успешный опыт разработки и эксплуатации информационно-измеритель-

ной подсистемы на Загорской ГАЭС позволяет, однако, сделать несколько парадоксальный вывод: создаваемая подсистема не полностью выполняет и принципиально не может оправдать возлагаемых на нее надежд.

Основанием для такого вывода послужили следующие обстоятельства:

1. Подсистема по составу представляемой информации ориентирована на оперативный персонал без учета потребности обслуживающего (ремонтного) и административно-технического персонала. Исключение — хронологическая регистрация сигналов релейной защиты и автоматики (РЗА), позволяющая выполнить ретроспективный анализ развития событий.

2. В нештатной ситуации (возникновение и/или развитие дефектов, авария и т.п.) подсистема лишь информирует о свершившемся событии. Динамика изменения параметров, характеризующих состояние оборудования, анализ ситуации и прогноз ее вероятного развития, выбор наиболее оптимального решения, адекватного создавшейся ситуации, — все это остается за кадром. Интеллектуальная обработка всего объема информации, выводы и принятие решений, как и прежде, остаются исключительно прерогативой персонала.

В соответствии с функциональным распределением обязанностей принципы выбора и реализации решений оперативным и обслуживающим персоналом энергообъекта различны.

Действия оперативного персонала в соответствии с общепринятым порядком, как правило, жестко регламентированы. По каждому виду оборудования разработаны инструкции по эксплуатации, содержащие в зависимости от квалификации исполнителя более или менее полный перечень возможных нештатных ситуаций и предписания по их нейтрализации. По сути дела, эти инструкции представляют собой фиксированный набор стереотипов, в соответствии с которыми и предписывается действовать оперативному персоналу.

Проблема, однако, заключается в том, что, во-первых, невозможно заранее предусмотреть и вписать в инструкцию все возможные ситуации и, во-вторых, в реальной жизни возникают, как правило, комбинации простых ситуаций, когда предписания, правильные для каждого отдельного случая, при их комбинации могут вступать в противоречие друг с другом.

Совершенно очевидно, что подобные варианты являются потенциальной причиной неправильных действий оперативно-

го персонала с соответствующими последствиями. Не менее очевидно, что эти варианты представляют собой классический пример, когда целесообразна и необходима оперативная экспертная оценка ситуации. Кроме того, действия оперативного персонала в нештатной ситуации определяются, как правило, текущей информацией и не учитывают ретроспективную информацию — повторяемость и частоту возникновения дефектов, реальное состояние оборудования, результаты предшествующих испытаний и ремонтов и т.п.

Решения административно-технического и обслуживающего персонала электростанции, на первый взгляд, свободны от жестких инструктивных предписаний и основываются, как принято считать, на личном опыте работника, т.е. на знаниях, накопленных за предыдущий период работы с подобным оборудованием. Чем больше стаж работы специалиста и его индивидуальная способность к анализу ситуации, тем обширнее накопленный опыт, тем выше вероятность правильных выводов и правильного решения.

Однако совершенно очевидно, что этот "опыт" представляет собой также набор стереотипов, сообразуясь с которым и делаются соответствующие выводы.

Если говорить о конкретных условиях Загорской ГАЭС как первой в России станции такого типа, то в условиях отсутствия долговременного опыта эксплуатации основного гидроэнергетического оборудования ГАЭС, когда данные о его ресурсе являются гипотетическими, личный опыт, накопленный при эксплуатации оборудования обычной ГЭС, иногда может привести к ложным выводам.

Принимая тезис о выборе решения на основе знаний определенного банка стереотипов, можно сказать, что основное отличие "эксперта" от рядового специалиста (независимо от его должностного ранга) заключается в том, что эксперт обладает не только знанием обширного банка стереотипов, но способностью к анализу их возможных комбинаций и соответственно способностью к прогнозированию событий.

Возвращаясь к проблеме разработки информационно-изменяемой подсистемы ГАЭС, можно утверждать, что для качественного изменения ее функциональных возможностей и расширения состава показателей необходимо наделить ее способностями к анализу ситуаций и формированию решения,декватного реальной ситуации. Иначе, речь идет о создании

системы поддержки принимаемых решений на уровне эксплуатационного персонала станции или экспертной системы.

Представляется удачной формулировка, в соответствии с которой "под экспертной системой понимается система, объединяющая возможности компьютера со знаниями и опытом работы эксперта в такой форме, что система может предложить разумный совет или осуществить разумное решение поставленной задачи" [26].

Учитывая особенности эксплуатации оборудования ГАЭС, в том числе Загорской, актуальность создания для них подобной системы очевидна, поэтому здесь принято решение о разработке и внедрении пилотной экспертной системы, охватывающей основное гидросиловое и электротехническое оборудование.

В рамках разрабатываемой системы на Загорской ГАЭС создана и проверена в процессе опытной эксплуатации система виброконтроля и вибродиагностики гидроагрегатов<sup>1</sup> (см. разд. 1.5), формируется общестанционная база данных по гидроэнергетическому оборудованию.

Кроме гидроэнергетического оборудования, значительных усилий на ГАЭС требует эксплуатация гидротехнических сооружений (плотин, дамб, склонов, зданий и т.п.), включающая не только профилактические мероприятия (ремонт), но и большой объем натуральных наблюдений, обработку их результатов, прогнозирование поведения гидросооружений. С учетом важности современной информации о состоянии гидросооружений с точки зрения оценки живучести всей станции, своевременность и правильность обработки результатов наблюдений, а также точность прогнозирования поведения гидросооружений приобретают первостепенное значение. Поэтому на Загорской ГАЭС с участием специалистов НИИЭС сформирована общестанционная база данных по гидротехническим сооружениям за весь период строительства и эксплуатации ГАЭС с использованием СУБД PARADOX и проводятся предварительные проработки с целью последующего создания экспертной системы, ориентированной на контроль гидротехнических сооружений.

---

<sup>1</sup>Разработка выполнена ВНИИЭ, ОРГЭС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### К главе 1

1. Lam D.C.L., Swayne D.A. Integrating Database, Spread-sheet, Graphics, GIS, Statistics, Simulation Models and Expert Systems: Experiences with the Reason Systems on Microcomputers // Decision Support Systems (Water Resources Planning). NATO ASI Series, Series G: Ecological Sciences. — 1991. — Vol. 26.
2. Кисель Е.Б. Обзор функциональных возможностей и технических характеристик G2 // Экспертные системы реального времени (материалы семинара). — М.: РИТАП, 1995. — С. 22—32.
3. Башлыков А.А. Проектирование систем принятия решений в энергетике. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 120 с.
4. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. — М.: МЭИ, 1994. — 216 с.
5. Бибер Л.А., Любарский Ю.Я., Надточий В.М., Цейтлин А.С. Экспертная система вибрационного контроля гидрогенератора // Электричество. — 1990. — № 8.
6. Любарский Ю.Я., Надточий В.М., Рабинович Р.С. и др. Экспертные системы для энергетики // Электричество. — 1991. — № 1. — С. 1—6.
7. Sancha J.L., Fernandez J.L., Herbero J. SEGRE: An Expert System for Reactive Power Management in Electric Power Systems // Intern. Conf. on Intelligent System Application to Power Systems. — Montpellier, France, 1994. — P. 389—395.
8. A Progress Report on Practical Use of Expert System in Planning and Operation // CIGRE, Task Force 38.03.10, Session, 30 August — 5 September. — 1992. — P. 1—10.
9. Гаврилова Т.А., Червицкая К.Р. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем. — М.: Радио и связь, 1992. — 200 с.
10. Гаврилова Т.А. Объектно-структурная технология разработки баз знаний интеллектуальных систем: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: СПб. ГТУ, 1996. — 34 с.
11. Кочетков В.В., Скотникова И.Г. Индивидуально-психологические проблемы принятия решений. — М.: Наука, 1993. — 143 с.

12. Меренков А.П. Основные итоги и задачи системных исследований в энергетике (по результатам 35-летней деятельности Сибирского энергетического института СО РАН в 1960—1995 гг.) // Энергетика. — 1996. — № 3. — С. 3—9.
13. Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях / Под ред. Н.И. Воропая, А.П. Меренкова. — Новосибирск: Наука. Сиб. издательская фирма РАН, 1995. — 335 с.
14. Криворудский Л.Д., Массель Л.В. Информационная технология исследований развития энергетики. — Новосибирск: Наука Сиб. издательская фирма РАН, 1995 — 160 с.
15. Энергетика России в переходный период: Проблемы и научные основы развития и управления / Под ред. А.П. Меренкова. — Новосибирск: Наука. Сиб. издательская фирма РАН, 1996. — 359 с.
16. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. — М.: Радио и связь, 1981. — 561 с.
17. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. — М.: Наука, 1981. — 208 с.
18. Розен В.В. Цель — оптимальность — решение (математические модели принятия оптимальных решений). — М.: Радио и связь, 1982. — 168 с.
19. Теория выбора и принятия решений. — М.: Наука, 1982. — 328 с.
20. Мелюхин И.С. Реинжиниринг бизнеса и новые информационные технологии // Научно-техническая информация. Сер. 1. — 1994. — № 10. — С. 8—13.
21. Попов Э.В., Шалот М.Д. Реинжиниринг бизнес-процессов и интеллектуальное моделирование // Динамические интеллектуальные системы в управлении и моделировании (материалы семинара). — М.: РИТАП, 1996. — С. 22—30.
22. Воропай Н.И., Славин Г.Б., Чельцов М.Б. и др. О сущности и основных проблемах энергетической безопасности России // Изв. РАН. Энергетика. — 1996. — № 3. — С. 38—50.
23. Воропай Н.И., Клименко С.М., Сендеров С.М. и др. Методы анализа и обоснования решений по повышению надежности и безопасности в энергетике // Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях. — Новосибирск: Наука. Сиб. издательская фирма РАН, 1995. — С. 64—125.
24. Кучеренко В. У бочки показалось дно (беседа с заместителем министра топлива и энергетики РФ В. Бушуевым) // Российская газета. — 1996. — 18 янв.
25. Агарков О.А., Войтов О.Н., Воропай Н.И. и др. Разработка программного обеспечения нового поколения АСДУ ЭЭС с использованием ПЭВМ // Изв. РАН. Энергетика. — 1992. — № 4.
26. Гуссон М.Г., Дондер М.И., Моржин Ю.И., Тимофеев В.А. Типовая АСДУ энергосистемы на базе локальной сети супермини-ЭВМ и ПЭВМ // Изв. РАН. Энергетика. — 1992. — № 4.
27. Володин В.В., Гамм А.З., Гришин Ю.А. и др. Экспресс-анализ ЭЭМ на основе оценивания состояния // Электричество. — 1985. — № 6.

28. Гамм А.З., Кучеров Ю.Н., Паламарчук С.И. Методы решения задач реального времени в электроэнергетике / Под ред. А.З. Гамма, М.Н. Розанова. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. — 224 с.
29. Гамм А.З., Герасимов Л.Н., Голуб И.И. и др. Оценивание состояния в электроэнергетике / Под ред. Ю.Н. Руденко. — М.: Наука, 1983.
30. Гамм А.З., Голуб Н.И. Наблюдаемость электроэнергетических систем. — М.: Наука, 1990. — 200 с.
31. Гамм А.З. Вероятностные модели режимов электроэнергетических систем. — Новосибирск: ВО "Наука", 1993. — 132 с.
32. Schweppe F.C. Power Systems '2000': Hierarchical Control Strategies // IEEE Spectrum. — 1978. — July. — P. 42—47.
33. Вышеславцев Б.П. Этика преобразованного Эроса. — М.: Республика, 1994. — 368 с.
34. Надточий В.М. Психологические аспекты построения экспертных систем // Электричество. — 1994. — № 1.
35. Магрук В.И., Родионов В.Г. Концепция разработки и перспективы развития АСУ ТП Загорской ГАЭС // Гидротехническое строительство. — 1996. — № 4.
36. Александров А.Е., Безчастнов Г.А., Кулаковский В.Б., Надточий В.М. Экспертные системы диагностики гидроагрегатов // Энергетика. — 1994. — № 9.

## К г л а в е 2

1. Новорусский В.В. Конечно-автоматные системы управления (принципы построения и анализ поведения). — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. — 259 с.
2. Новорусский В.В. Теоретические основы анализа и синтеза конечно-автоматных систем управления / АН СССР, Сиб. отд-ние. Сиб. энерг. ин-т. — Иркутск, 1989. — 301 с. — Деп. в ВИНТИ 06.06.89, № 3747—В89.
3. Искусственный интеллект: В 3 кн. — М.: Радио и связь, 1990. — Кн. I. Системы общения и экспертные системы: Справочник / Под ред. Э.В. Попова. — 464 с.
4. Малпас Дж. Реляционный язык Пролог и его применение: Пер с англ / Под ред. В.Н. Соболева. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. — 464 с.
5. Новорусский В.В. Экспертные системы для решения задач диагностики, прогнозирования и управления функционированием энергетических систем и объектов (Подходы к синтезу). — Иркутск: СЭИ СО РАН, 1992. — 108 с. — (Препринт.)
6. Попов Э.В. Экспертные системы реального времени // Материалы семинара "Экспертные системы реального времени". — М.: ЦРДЗ, 1995. — С 5—22.
7. Gensym Corp. G2 reference manual. Version 4.0. — Cambridge, Mass., USA, 1995.

- 8 Gensym Corp. *NeurOn-Line Reference Manual*. — Cambridge, Mass., USA, 1995
- 9 Кисель Е.В., Попов Э.В., Фоминых И.Б., Шапот М.Д. Экспертные системы реального времени. — М.: Финансы и статистика, 1996.
- 10 Гусев В.А. Применение инструментального комплекса G2 в энергетике // *Динамические интеллектуальные системы в управлении и моделировании: Материалы семинара*. — М.: 1996.
- 11 Delfino B., Denegri G.B., Invernizzi M., Morini A. Enhancing Flexibility of Restoration Guidelines Through an Integrated Simulator-KB Approach // *IEEE/KTH, Stockholm Power Tech. Conf.*, June, 1995.
- 12 Hammer M., Champy J. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution* — N. Y.: Harper Collins, 1993.
- 13 Попов Э.В., Шапот М.Д. Реинжиниринг бизнес-процессов и интеллектуальное моделирование // *Динамические интеллектуальные системы в управлении и моделировании: Материалы семинара*. — М., 1996.
- 14 Петров Э.И. ReThink — инструментальное средство поддержки реинжиниринга бизнес-процессов // *Динамические интеллектуальные системы в управлении и моделировании: Материалы семинара*. — М., 1996.
- 15 Rosenof H.P. A Spot Market For Electricity // *Cogeneration And Competitive Power Journ.* — 1995. — Oct.-Dec. — P. 24—33.
- 16 Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. — М.: Наука, 1981. — 208 с.
- 17 Beer S. The Viable System Model: Its provenance, development, methodology and pathology. *The Viable System Model: Interpretations and Applications of Stafford Beer's VSM*. — N.Y.: John Wiley & Sons Ltd., 1989.
- 18 Grossman W.D., Watt K.E.F. Viability and Sustainability of Civilizations, Corporations, Institutions and Ecological Systems // *Systems Research*. — 1992. — N 2
- 19 Volkov L. On the way to a viable systems theory // *Proc. Third European Congress on Systems Science*. — Rome, 1996.
- 20 Beer S. *Brain of the Firm*. — N.Y.: John Wiley & Sons Ltd., 1981.
- 21 Абасов Н.В., Гутерман И.М., Оськина О.Н. Специализированная система генерации выходных документов (ССГВД) // *Инструментальные системы и моделирование*. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1998. — С. 100—105.
- 22 Абасов Н.В., Оськина О.Н. Логический том (ЛТ) — средство построения информационно-замкнутых программных систем // *Тез. докл. Всесоюз. конф. "Диалог Человек — ЭВМ"*. — Свердловск, 1989. — Ч. 3. — С. 4—6.
- 23 Абасов Н.В., Чернышев М.Ю. HIRUS как инструментальная гомеостатическая система программирования и средство логико-семантического анализа и синтеза естественно-языкового предложения // *Сб. трудов Всесоюз. семинара "Гомеостатика живых и технических систем"*. — Иркутск: Политехн. ин-т, 1991. — С. 240—247.



24. **Абасов Н.В.** Подход к компьютерному моделированию и его инструментальная поддержка (ЗИРУС) // Тез. докл. междунар. конф. "Технология программирования 90-х". — Киев, 1991. — С. 65—67
25. **Абасов Н.В., Васильев С.Н., Косов А.А. и др.** Система интеллектуальной поддержки контроля договорных ограничений // Сб. трудов Всерос. шк. "Компьютерная логика, алгебра и интеллектуальное управление. Проблемы анализа стратегической стабильности и устойчивости развития". — Иркутск: ИрВЦ СО РАН, 1994. — Т. 4. — С. 3—34.
26. **IEEE Standard 1178—1990, IEEE Standard for the Scheme Programming Language, IEEE.** — N.Y., 1991.

### К главе 3

1. **Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях / Н.И. Воропай, Н.Н. Новицкий, Е.В. Сеннова и др.** — Новосибирск: Наука. Сиб. издательская фирма РАН, 1995. — 335 с
2. **Кини Р.Л., Райфа Х.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. — М.: Радио и связь, 1981. — 560 с.
3. **Орловский С.А.** Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. — М.: Наука, 1981 — 208 с.
4. **Обоснование рациональной концентрации генерирующих мощностей и единичной мощности электростанций и агрегатов в ЕЭС СССР с учетом надежности электроснабжения, роста экологических ограничений и применения прогрессивных технологий производства и транспорта электроэнергии (науч. доклад).** — Свердловск: ИТФ, 1991.
5. **Гантмахер Ф.Р.** Лекции по аналитической механике. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1961. — 172 с.
6. **Brayton R.K., Moser J.K.** A theory of nonlinear networks-1 // Quarterly of Applied Mathematics. — 1964. — Vol. 22, N 1. — P. 1—33.
7. **Brayton R.K., Moser J.K.** A theory of nonlinear networks-2 // Quarterly of Applied Mathematics. — 1964. — Vol. 22, N 2. — P. 81—104.
8. **Войтов О.Н., Мантров В.А., Семейова Л.В.** ПВК исследования режимов ЭЭС СДО-6 // Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях / Н.И. Воропай, Н.Н. Новицкий, Е.В. Сеннова и др. — Новосибирск: Наука. Сиб. издательская фирма РАН, 1995. — С. 293—294.
9. **Крумм Л.А., Насвицевич Б.Г.** Исследование и развитие обобщенных методов ньютоновского типа при анализе установившихся режимов и управлении ими // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1982. — № 2. — С. 25—38.
10. **Войтов О.Н.** Детерминированные методы и алгоритмы определения управлений при коррекции режимов ЭЭС // Методы решения задач

- реального времени в электроэнергетике. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. — С. 243—258.
11. Крумм Л.А., Мангров В.А. Методы адаптивного эквивалентирования в задачах анализа установившихся режимов ЭЭС и управление ими // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1989. — С. 19—32.
  12. Войтов О.Н., Мангров В.А. Оперативная управляемость ЭЭС // Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях / Н.И. Воропай, Н.И. Новицкий, Е.В. Сеннова и др. — Новосибирск: Наука Сиб. издательская фирма РАН, 1995. — С. 89—97.
  13. Гамм А.З., Голуб И.И. Обнаружение слабых мест в электроэнергетической системе // Изв. РАН. Энергетика. — 1993. — № 3. — С. 83—92.
  14. Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. — 126 с.
  15. Боршевский М.З., Макаров А.А., Ткаченко Г.Е., Шевчук Л.М. Оптимизация развития топливно-энергетического комплекса при неоднозначной исходной информации // Экономика и математические методы. — 1987. — Т. 23, вып. 5
  16. Антонова Н.Н., Шевчук Л.М. Алгоритм решения двухэтапной минимаксной задачи с линейными ограничениями // Приближенные методы анализа и их приложения. — Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1990.
  17. Антонова Н.Н., Макарова А.С., Ткаченко Г.Е., Шевчук Л.М. Выбор гарантированных решений по перспективному развитию энергетического комплекса страны // Методы и модели исследования живучести систем энергетики. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.
  18. Резников А.П. Детерминированно-вероятностная обучающаяся информационная система (ДВОИС) // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1969. — № 3. — С. 20—30.
  19. Резников А.П. Обработка накопленной информации в затрудненных условиях. — М.: Наука, 1976. — 242 с.
  20. Резников А.П. Предсказание естественных процессов обучающейся системой (физические, информационные, методологические аспекты). — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. — 287 с.
  21. Резников А.П. Аналого-сходственные соотношения в долгосрочном прогнозировании природных процессов — методологические аспекты // География и природ. ресурсы. — 1986. — № 3. — С. 114—122.
  22. Резников А.П. Сверхдолгосрочные прогнозы природных процессов — народному хозяйству. — Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1991. — 72 с.
  23. Резников А.П., Бережных Т.В., Васильева Э.Н., Мутина Т.Б. Будущая природная обстановка в Приангарье и экологическая устой-

- чивость (прогностическая экспресс-информация с комментарием). — Иркутск: СЭИ СО РАН, 1994 — 50 с.
24. Абасов Н.В. Подход к компьютерному моделированию и его инструментальная поддержка (ЗИРУС) // Тез. докл. междунар. конф. "Технология программирования 90-х". — Киев, 1991. — С. 65—67.
  25. Абасов Н.В., Васильев С.Н., Матросов В.М. и др. Система интеллектуальной поддержки контроля договорных ограничений // Сб. трудов Всерос. шк. "Компьютерная логика, алгебра и интеллектуальное управление. Проблемы анализа стратегической стабильности и устойчивости развития". — Иркутск: ИрВЦ СО РАН, 1994. — Т. 4. — С. 3—34.
  26. Грис Д. Наука программирования. — М.: Мир, 1984. — 416 с.
  27. Пробилюк А. Excel 7.0 для Windows 95 в бюро — Киев: ВНУ, 1996. — 243 с.
  28. Арушанов Х.Р. Visual Basic 3.0, Visual Basic 4.0 для Windows. — М.: АБФ, 1996. — 348 с.
  29. Бутаков Е.А. Методы создания качественного программного обеспечения. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 232 с.
  30. Кургалский В.И. О решении задач верификации, синтеза и построения тестов для одного класса структурированных программ // Теоретические и прикладные основы программных систем: Сб. науч. тр. — Переславль-Залесский: Ин-т программных систем РАН, 1994. — С. 413—422.

#### К г л а в е 4

1. Антонов Г.Н., Воропай Н.И., Криворучкий Л.Д., Массель Л.В. и др. Комплексные исследования живучести систем энергетики // Изв. РАН Энергетика — 1992 — № 6. — С. 31—41.
2. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: Пер. с англ. — М.: Конкорд, 1992. — 519 с.
3. Kruchten Ph. A Rational Development Process — Cross Talk — 9
4. Stansifer R., Beaven M., Marinescu D.C. Modelling concurrent programs with colored Petri nets // J. Syst. Softw. — 1994. — Vol. 26. — P. 129—148.
5. Котов В.Е. Сети Петри. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984.
6. Java™ Remote Method Invocation Specification, Sun Microsystems, Inc., 1997.
7. Юткин А. Объектные технологии в распределенных системах // Открытые Системы. — 1995. — Т. 11, № 3. — С. 6—11.
8. Vinoski S. Distributed object computing with CORBA // SIGS C ++ Report. — 1993. — July/August.
9. Schmidt D.C., Vinoski S. Object interconnection // SIGS C ++ Report — 1995. — October.

10. **Beguelin A., Dongarra J.J., Geist G.A. et al.** A users' guide to PVM parallel virtual machine // Technical Report ORNL/TM-11826. — Oak Ridge National Laboratory. — 1991. — July
11. **Beguelin A., Dongarra J.J.** Recent enhancement to PVM // Intern. J. Supercomputer Applications and High Performance Computing. — 1995. — Vol. 9, N 2. — P. 108—127.
12. **Stonebraker M., Rowe L.** The design of POSTGRES // Proc. 1986 ACM-SIGMOD Conf. — Washington, D.C., 1986 June.
13. **Stonebraker M., Rowe L.** The POSTGRES data model // Proc. 1987 VLDB Conf. — Brighton, England, 1987 Sept.
14. **Janssen B., Spreitzer M.** 1LU 2. Oalpha7 Reference Manual. — Xerox Corporation Prerelease, 1996. — April
15. **Сейтин Н., Jagahathan S., Kelsey R.** Higher Order Distributed Objects. — ACM Prerelease. NEC Research Institute, 1995.
16. **ГИС для изучения и картографирования окружающей среды** // Материалы междунар. конф. "ИТЕРКАРТО 2: ГИС для изучения и картографирования окружающей среды" (26—29 июня 1996 г.). — Иркутск, 1996.
17. **Криворучкий Л.Д.** Имитационная система для исследований развития топливно-энергетического комплекса — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. — 125 с.
18. **Дарахвелидзе П., Марков Е.** Delphi — среда визуального программирования. — СПб.: BHV — Санкт-Петербург, 1996. — 352 с.
19. **Подмарков В.Ю., Рутковский И.П., Фридман В.Е. и др.** Модернизация информационной системы управления ЕСГ РАО "Газпром" // Газовая пром-сть. — 1966. — № 3—4. — С. 36—40.
20. **Колетантинова И.М., Дубивский А.В., Дубровский В.В. и др.** Математическое моделирование технологических объектов транспорта газа. — М.: Недра, 1988. — 192 с.
21. **Меренков А.П., Хасилев В.Я.** Теория гидралических цепей. — М., 1985. — 278 с.
22. **Сейнова Е.В., Сидлер В.Г.** Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. — 221 с.
23. **Бумагин В.И., Меренкова Н.Н., Ощепкова Т.Б. и др.** Разработка диалоговой системы для проектирования тепловых сетей с заданным уровнем надежности // Методы оптимального развития и эффективного использования трубопроводных систем энергетики. — Иркутск, 1994. — С. 30—31.
24. **Аверьянов В.К., Пономарев В.Н., Чаньивев И.А., Челябинов А.В.** Информационные технологии в системах теплоснабжения // Водоснабжение и сан. техника. — 1993. — № 3. — С. 13—14.
25. **Стебунов А.** Экспертные системы Японии: стратегия и состояние. — Компьютер Пресс, 1990. — № 9.
26. **Нейлор К.** Как построить свою экспертную систему. — М.: Энергоиздат, 1991. — 286 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . .	3
<b>Глава 1</b>	
ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ И СОЗДАНИЯ СППР В ЭНЕРГЕТИКЕ . . . . .	9
1.1. Состояние и общеметодологические проблемы построения систем поддержки принятия решений в энергетике (Массель Л.В.) . . . . .	—
1.2. Проблемы принятия решений при исследованиях и обеспечении энергетической безопасности России (Клименко С.М., Пяткова Н.Н., Сендеров С.М., Славин Г.Б., Чельцов М.Б.) . . . . .	14
1.3. Проблемы создания АСДУ центральной электроэнергетической системы Монголии (Гамм А.З., Дашпунцаг М., Ценджав З.) . . . . .	24
1.4. Сравнение централизованного и рыночного механизмов взаимодействия электроэнергетических систем в объединении (Гамм А.З.) . . . . .	44
1.5. Формирование решений для персонала электростанций: психологические аспекты (Надточий В.М.) . . . . .	50
<b>Глава 2</b>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ЗНАНИЯХ, ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СППР В ЭНЕРГЕТИКЕ . . . . .	64
2.1. Создание экспертных систем для управления плохоформализуемыми технологическими процессами (Новорусский В.В.) . . . . .	—
2.2. Применение методов, основанных на знаниях, для моделирования гидравлических режимов каскадов водо-	

хранилищ (Гусев В.А., Канарейкин О.М., Лазаренко В.А., Протопопова Т.Н., Шапот М.Д.) . . . . .	80
2.3. Использование инструментального комплекса G2 для разработки экспертных систем реального времени в энергетике (Шапот М.Д.) . . . . .	87
2.4. Система распознавания образов для решения энергетических задач (Мезенцев П.Е.) . . . . .	95
2.5. Информационно-интеллектуальная среда исследователя (Волков Л.Н.) . . . . .	104
2.6. Представление данных, программ, знаний в среде ЗИРУС (Абасов Н.В.) . . . . .	110

### Глава 3

#### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ . . . . .

3.1. Разработка системы поддержки принятия решений при выборе вариантов развития электроэнергетической системы в условиях многокритериальности (Бычкова Н.В., Вороний Н.И., Иванова Е.Ю., Труфанов В.В.) . . . . .	—
3.2. Многокритериальный анализ развития электроэнергетики в нечеткой среде (Бобырева И.Н., Мезенцев П.Е.)	133
3.3. Об использовании электромеханических аналогий (Ирменгов В.А., Титаренко Т.Н.) . . . . .	136
3.4. О некоторых вопросах обеспечения управляемости ЭЭС (алгоритмы, реализация) (Войтов О.Н., Майстров В.А., Семенова Л.В.) . . . . .	145
3.5. Программный комплекс "Минимакс" для решения трех- и двухэтапных минимаксных задач (Антонова Н.Н., Скурят Е.И.) . . . . .	153
3.6. Гибридная информационно-прогностическая система (Абасов Н.В., Резников А.П.) . . . . .	157
3.7. Модификация табличного процессора для новых моделей вычислений (Курганский В.И., Соловьев Д.В.) . . . . .	168

### Глава 4

#### РЕАЛИЗАЦИЯ СППР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКОЙ . . . . .

4.1. Архитектура и реализация распределенной объектно-ориентированной СППР для исследований и обеспечения энергетической безопасности (Ершов А.Р., Макагонова Н.Н.) . . . . .	—
---	---

4.2. Интерпретация данных в СППР для исследований и обеспечения энергетической безопасности (Ершов А.Р., Макагонова Н.Н., Проконченко Н.С., Трипутина В.В.)	187
4.3. Информационная поддержка оперативно-диспетчерского управления единой системы газоснабжения России (Дробина Н.Г., Смоляницкая В.А.)	195
4.4. Использование графической системы АРМТЕСТ для решения задач развития теплоснабжения (Ощепкова Т.Б.)	201
4.5. Опыт эксплуатации и перспективы развития информационных технологий на примере Загорской ГАЭС (Родионов В.Г.)	204

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	213
К главе 1	—
К главе 2	215
К главе 3	217
К главе 4	219