АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНЫМ ПРОБЛЕМАМ ЭНЕРГЕТИКИ
Государственный научно-исследовательский
энергетический институт им. Г.М. Кржижановского

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Ответственные редакторы:
член-корреспондент АН СССР Л.С. ПОПЫРИН,
доктор экономических наук В.И. ДЕНИСОВ



МОСКВА "НАУКА" 1989

89

Авторы:

Г.М. Беляева (разд. 6.1, 6.3)
В.П. Браилов (разд. 5.1)
С.В. Воронина (разд. 5.2)
Н.П. Деканова (разд. 7.3)
С.П. Жаворонков (разд. 3.1, 3.2, 4.1, 4.3, 6.4; гл. 8)
И.Я. Карасик (разд. 6.4)
А.М. Клер (разд. 7.2, 7.3)
Ю.С. Кретинина (разд. 5.2)
Ю.В. Нефедов (разд. 9.1, 9.3)
Л.С. Попырин (гл. 1–3, 9, 10; разд. 6.1, 6.3, 7.1, 7.2, 8.1, 8.2)
В.И. Самусев (гл. 7)
К.С. Светлов (разд. 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 4.4, 9.2; гл. 8)
О.Д. Середа (разд. 4.1, 4.2, 4.4, 9.1, 9.2)
И.А. Столярова (разд. 4.1, 4.2, 4.4)
И.А. Широков (разд. 6.2)
В.Е. Штейнгауз (разд. 5.2)
В.В. Эпельштейн (разд. 7.1)

УДК 621.039:697.34:338.984.2.001.13

Исследование систем теплоснабжения / Л.С. Попырин, К.С. Светлов, Г.М. Беляева и др. М.: Наука, 1989. 215 с. ISBN 5-02-006538-2

В книге изложены основы системных исследований централизованного теплоснабжения. Рассмотрены методы построения математических моделей систем теплоснабжения и их оборудования. Особое внимание уделено проблемам развития систем, надежности, принятия решений в условиях неполной определенности информации. Приведены примеры решения конкретных задач оптимального проектирования систем теплоснабжения.

Для специалистов в области теплоснабжения, работников проектных, конструкторских, научно-исследовательских организаций и студентов соответствующих вузов.

Рецензенты: *А.А. Авдеева*, *Л.С. Хрилев*

Редактор *Ю.А. Юдина*

District Heating Systems Investigation/L.S.Popyrin, K.S.Svetlov, G.M. Belyaeva et al. Moscow, Nauka, 1989. 215 p.

Basic principles of district heating systems are presented. Methods of mathematical models design of district heating systems and their equipment are described. In particular, problems of system development, reliability, decision with incomplete data are discussed. Examples of specific proble[illegible] optimal design are given.

For specialist[illegible]ntific–research organizations and students of a[illegible]

И 2203070000-218 КБ-3-[illegible]
055(02)-89

ISBN 5-02-006538-2

© Издательство "Наука", 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) закономерно становятся важнейшим элементом энергетического хозяйства нашей страны. Преимущества централизованного теплоснабжения в условиях СССР неоспоримы: это экономия топлива и затрат на его транспортировку, значительный рост производительности труда в тепловом хозяйстве, возможность эффективного оздоровления воздушного бассейна городов и др. Поэтому вопросам научно-технического прогресса в централизованном теплоснабжении должно уделяться неослабное внимание.

Основными направлениями совершенствования и дальнейшего развития СЦТ являются концентрация производства теплоты, широкое применение комбинированного производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, применение атомных источников теплоты и централизация распределения теплоты. По уровню развития централизованного теплоснабжения Советский Союз занимает первое место в мире. В настоящее время централизованное теплоснабжение в СССР осуществляется более чем от 900 ТЭЦ и 2 тыс. котельных производительностью более 200 ГДж/ч. Услугами централизованного теплоснабжения в стране пользуются около 100 млн человек [1].

Производство тепловой энергии связано с большим расходом энергоресурсов. Так, в 1985 г. на производство теплоты низкого и среднего потенциала (температура менее 300 °С) израсходовано более 500 млн. т у.т., в том числе до 200 млн т у.т. дефицитных нефтепродуктов. На цели теплоснабжения расходуется до 40–43% всех потребляемых в стране энергоресурсов, что в 1,6–1,7 раза больше, чем на выработку электроэнергии. Перестройка энергетического баланса страны требует резкого изменения структуры потребления энергоресурсов для производства тепловой энергии за счет снижения расхода мазута на ТЭЦ и в котельных и широкого применения угля и ядерной энергии [1].

Привлечение ядерной энергии для централизованного теплоснабжения в принципе более эффективно, чем ее вовлечение в систему электроснабжения, поскольку органического топлива замещается при этом почти на 30% больше. Если учесть, что атомные источники теплоты замещают преимущественно высококачественное топливо, а атомные электростанции – уголь, то сравнительная эффективность атомного теплоснабжения еще более возрастает. Из этого следует важность задачи определения рациональной структуры источников теплоты (ИТ) в отдельных регионах страны, различающихся условиями формирования энергетического баланса.

Процесс концентрации тепловой нагрузки в крупных городах и промышленных центрах требует более глубокого изучения ряда проблем развития мощных СЦТ. Здесь приобретают новое звучание проблемы динамики

развития систем, режимов использования ИТ разных типов, надежности обеспечения тепловой энергией потребителей и др.

В соответствии с изложенным выбор обоснованных путей развития СЦТ перерастает в важнейшую проблему, особенно в условиях осуществляемой в СССР перестройки энергетического баланса страны. Решение этой проблемы предъявляет высокие требования к методике исследования перспектив развития СЦТ. К настоящему времени разработаны основные положения такой методики, базирующиеся на системном подходе к изучению перспектив развития энергетики.

Инструментом системных исследований является математическое моделирование СЦТ с учетом их внутренних и внешних связей. Используются также методы оптимизации и согласования решений, обеспечивающих выбор оптимальных стратегий развития СЦТ с ИТ разных типов, в том числе при неоднозначности исходной информации.

Необходимость дальнейшего повышения эффективности теплоснабжения требует совершенствования методов исследования развития СЦТ в части повышения комплексности исследований и более полного учета связей СЦТ с внешними системами, разработки новых иринципов и приемов моделирования и оптимизации, исследования надежности, учета неполноты используемой информации и др. Существенно важна роль работ, нацеленных на расширение возможностей применения новых математических методов и ЭВМ для разработки и проектирования СЦТ.

По вопросам развития систем теплоснабжения имеется большое количество публикаций, например [2–11]. В этих работах изложены многие положения сложной и многогранной проблемы повышения экономичности и надежности теплоснабжения городов и промышленных центров. Поэтому содержание данной книги ограничено рассмотрением и развитием ряда положений системного подхода к выбору оптимальных решений по СЦТ и ИТ на стадии их разработки и проектирования на базе широкого использования математических методов и ЭВМ. В настоящее время именно эти вопросы имеют большое научное и практическое значение и требуют скорейшего решения.

Предлагаемая читателю книга имеет целью изложение принципов, методов и практических приемов применения математического моделирования для выбора оптимальных решений при исследовании и проектировании систем теплоснабжения с учетом условий их функционирования и развития в энергетическом комплексе страны. С этой целью в книге освещается опыт построения и реализации математических моделей СЦТ и ИТ разных типов, применения математических методов решения многофакторных экстремальных задач, исследования проблем надежности и принятия решений в условиях неполноты информации. В соответствии с этим в книге изложены:

в гл. 1 и 2 – задачи, условия и основные положения системных исследований систем теплоснабжения и их оборудования. Рассмотрены основные свойства, внешние и внутренние связи исследуемой системы, сформулирована иерархия задач оптимизации системы теплоснабжения, предложены подходы к построению соответствующего комплекса математических моделей;

в гл. 3–7 – теоретические основы и примеры построения математичес-

ких моделей СЦТ, систем ядерной энергетики и электроэнергетики, а также источников теплоты разных типов. Сформулированы основные понятия метода математического моделирования и даны общие подходы к построению математических моделей. Рассмотрены специальные методы, используемые при построении математических моделей и программно-вычислительных комплексов. Приведены примеры построения программно-вычислительных комплексов для исследования СЦТ и ИТ;

в гл. 8–10 – проблемы учета динамики, надежности и неполноты информации при оптимизации СЦТ и ИТ. Основное внимание здесь обращено на корректную формулировку постановки задач, разработку методов учета указанных факторов, доведение разработанных программно-вычислительных комплексов до уровня, обеспечивающего возможность решения реальных задач оптимизации СЦТ и ИТ.

Книга содержит примеры системных исследований эффективности и надежности СЦТ и ИТ разных типов и собственно ИТ.

Вопрос об издании данной монографии неоднократно обсуждался с основоположником учения о теплофикации академиком Л.А. Мелентьевым. С ним было согласовано содержание книги, и он был готов взять на себя нелегкую работу по ее редактированию. Л.А. Мелентьев считал, что увлечение в последние годы общими вопросами системных исследований в энергетике привело к известному отставанию прикладных исследований конкретных типов больших систем энергетики. В частности, Л.А. Мелентьев придавал большое значение обобщению исследований эффективности и надежности систем централизованного теплоснабжения, чему и посвящена настоящая монография. Основной материал книги подготовлен после неожиданной кончины Л.А. Мелентьева в июле 1986 г. Авторы старались возможно полнее использовать основные идеи и принципы системных исследований в энергетике, сформулированные и развитые Л.А. Мелентьевым, и там, где это оказалось возможным, конкретизировать и развить их применительно к исследованию систем теплоснабжения.

Достигнутый к настоящему времени уровень изученности отдельных направлений системных исследований СЦТ и их оборудования неравномерен; это не могло не отразиться на глубине изложения отдельных вопросов, обсуждаемых в монографии; ряд из них, несомненно, дискуссионен.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АИТ – атомный источник теплоты
АСПТ – атомная станция промышленного теплоснабжения
АСТ – атомная станция теплоснабжения
АТЭЦ – атомная теплоэлектроцентраль
АЭС – атомная электростанция
АЭУ – атомная энергетическая установка
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор
ГТУ – газотурбинная установка
ГЭС – гидроэлектростанция
ИТ – источник теплоты
КПД – коэффициент полезного действия
КЭС – конденсационная электростанция
ОТЭЦ – теплоэлектроцентраль на органическом топливе
ПВК – программно-вычислительный комплекс
ПГУ – парогазовая установка
ПК – пиковая котельная
ПРК – пиково-резервная котельная
РК – районная котельная
СТ – сетевой теплообменник
СЦТ – система централизованного теплоснабжения
СЯЭ – система ядерной энергетики
ТС – тепловая сеть
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
ЭК – энергетический комплекс
ЭУ – энергетическая установка
ЭЭС – электроэнергетическая система

Глава первая

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В СССР

1.1. Условия развития

Основные положения Энергетической программы СССР на длительную перспективу [12] предусматривают проведение активной энергосберегающей политики на базе ускорения научно-технического прогресса во всех звеньях энергетического комплекса страны. При этом тепловое хозяйство страны рассматривается в качестве одной из важнейших областей, в которых принципиально возможно значительное повышение эффективности использования энергетических ресурсов. Задача состоит в том, чтобы определить конкретные пути повышения эффективности теплоснабжения, а это, в свою очередь, требует знания внешних условий, при которых системы теплоснабжения будут развиваться.

Выполненные исследования [9, 10] показали, что при определении перспектив развития СЦТ необходимо учитывать следующие особенности развития энергетики нашей страны на ближайшие 15—20 лет:

нарастающие сложности в обеспечении ИТ высококачественными видами топлива и трудовыми ресурсами;

необходимость скорейшего прекращения роста расхода органического топлива на теплоснабжение в европейской части страны;

целесообразность развития новых типов ИТ, ориентированных на использование ядерного топлива;

нарастающий физический и моральный износ оборудования ТЭЦ на органическом топливе (ОТЭЦ) с агрегатами мощностью 100 Мвт и ниже;

обострение проблемы покрытия переменной части графика электрических нагрузок в европейской части страны и новые требования повышенной маневренности ОТЭЦ.

Рассмотрим характеристики указанных условий развития теплоснабжения в СССР и определяемые ими основные задачи перестройки и совершенствования СЦТ.

Особенности формирования топливного баланса СССР. Советский Союз является единственной промышленно развитой страной, разведанные запасы органического топлива которой способны обеспечить развитие ее народного хозяйства в течение многих лет. Однако сложившееся в настоящее время размещение потребителей топлива и энергии по территории страны не соответствует размещению запасов энергетических ресурсов. В европейской части страны (включая Урал), где сосредоточено свыше 3/4 энергопотребления, добыча органического топлива имеет тенденцию к снижению. Следствием этого является создание уникальных по мощности транспортных потоков энергетических ресурсов (нефть, природный газ, уголь) и электрической энергии из восточных районов страны в европейские.

Таблица 1.1. **Некоторые показатели энергетического баланса СССР по годам, млн т у.т. [13, 14]**

Показатель	1960 г.	1970 г.	1980 г.	1985 г.	1990 г.
Производство энергоресурсов	760	1270	1960	2190	2560
Потребление энергоресурсов	700	1160	1670	1840	2070
в том числе в европейской части СССР	550	930	1310	1430	1580
Объем передачи энергоресурсов из восточных районов в европейскую часть СССР (с учетом экспорта)	–	130	700	950	1100
Расход энергоресурсов на производство электроэнергии	110	230	370	450	525
Расход энергоресурсов на производство пара и горячей воды	105	260	440	510	550
Расход энергоресурсов на производство тепловой энергии высокого потенциала	130	205	270	280	290

Данные табл. 1.1 хорошо иллюстрируют отмеченное. Как видно из этой таблицы, в настоящее время передача энергоресурсов из восточных районов восполняет энергетический баланс европейских районов (с учетом экспорта) примерно на 2/3. К концу века абсолютный объем всех видов энергоресурсов, транспортируемых с востока на запад, должен возрасти.

Колоссальные объемы перемещения энергетических ресурсов на расстояние 3–4 тыс.км требуют больших средств на развитие транспортной сети, что приводит к закономерному росту затрат на энергетические ресурсы в направлении с востока на запад; при этом наименьшая стоимость энергетических ресурсов приходится на Восточную Сибирь. Так, замыкающие затраты на энергетический уголь возрастают с 18–20 руб/т у.т. в Красноярском крае до 48–52 руб/т у.т. в центральных районах европейской части страны.

Указанные особенности и сложности формирования энергетического баланса районов европейской части страны предопределили целесообразность использования ядерной энергии, прежде всего на базе опережающей электрификации народного хозяйства. В европейских районах страны атомные конденсационные электростанции (АЭС) могут обеспечить весь прирост базисной электрической нагрузки. В конце столетия доля атомных электростанций может достигнуть 25–30% в структуре генерирующих мощностей, что позволит существенно сократить расход мазута и природного газа на выработку электроэнергии. Вместе с тем нужно иметь в виду, что на выработку электрической энергии расходуется только 1/4 первичных энергоресурсов (см. табл. 1.1). Поэтому нельзя лишь за счет сооружения АЭС устранить все недостатки энергетического баланса районов европейской части СССР.

Существенный вклад в улучшение энергоснабжения европейских райо-

нов страны может дать использование ядерной энергии для целей теплоснабжения. Из данных табл. 1.1 видно, что расход энергетических ресурсов на производство пара и горячей воды, т.е. тепловой энергии среднего и низкого потенциала, больше, чем на производство электроэнергии. Достаточно велик расход энергетических ресурсов и на производство теплоты высокого потенциала*. Здесь имеются в виду высокотемпературные процессы в черной металлургии, производстве строительных материалов, машиностроении и т.п.

Однако разработка и освоение атомных источников теплоты (АИТ) требуют значительного времени, и в ближайшей перспективе они не смогут заметно повлиять на выбор структуры новых ИТ централизованного теплоснабжения. В этот период централизованное теплоснабжение европейских районов может ориентироваться только на использование органического топлива. Исходя из необходимости перестройки энергетического баланса европейской части СССР, можно утверждать, что потребуется резкое изменение структуры потребляемого органического топлива СЦТ в следующих направлениях: 1) снижение до минимально возможного расхода мазута на ОТЭЦ и в котельных путем замены его другими энергоресурсами (на первом этапе – в основном природным газом); 2) постепенная стабилизация общего расхода газа на ОТЭЦ и в котельных, несмотря на то что именно газом будет замещаться большая часть мазута в ближайшие годы; 3) широкое применение угля в европейских районах страны для централизованного производства теплоты вне крупных городов.

В районах Сибири СЦТ на обозримую перспективу должны быть ориентированы на использование органического топлива. Сооружение АИТ здесь нецелесообразно; исключение могут составить районы Крайнего Севера Сибири.

Тенденции теплопотребления в народном хозяйстве СССР. Потребление тепловой энергии народным хозяйством играет важную роль в формировании единого энергетического комплекса страны. Формы конечной энергии (тепловая энергия высокого, среднего или низкого потенциала) обусловлены совокупностью технологий в материальном производстве и сфере услуг. В свою очередь, формы конечной энергии во многом предопределяют выбор обеспечивающих их энергоносителей (пар, горячая вода) и состав производящих эти энергоносители генерирующих установок. Наконец, последние обусловливают требования к виду и качеству природных энергетических ресурсов.

Динамика расхода конечной энергии в народном хозяйстве СССР за последние 35 лет показана в табл. 1.2. Изменения в отраслевой структуре народного хозяйства привели к сдвигам в пропорциях использования конечной энергии по видам: возросла доля механической энергии вследствие механизации труда во всех областях материального производства и быстрого развития транспорта; снизилась доля тепловой энергии высокого потенциала, главным образом за счет опережающего развития обрабатывающей промышленности, потребляющей небольшое количество тепловой энергии

---

* Тепловую энергию по уровню температуры условно делят на низкопотенциальную (от 30–40 до 100–120 °С), среднепотенциальную (от 100–120 до 300–400 °С) и высокопотенциальную (более 300–400 °С).

Таблица 1.2. **Некоторые показатели потребления энергии в народном хозяйстве СССР по годам, % [13, 14]**

Показатель	1955 г.	1965 г.	1975 г.	1980 г.	1985 г.	1990 г.
Расход конечной энергии						
электромагнитной	0,5	0,6	0,9	1	1	1,1
механической	15,5	18,2	21,0	22,0	22,5	23,0
тепловой						
высокого потенциала	29,9	26,8	23,3	21,6	20,5	19,4
среднего и низкого потенциала	54,1	54,4	54,8	55,4	56,0	56,5
Доля в общем расходе конечной энергии						
электроэнергии	7,5	10,8	13,3	13,7	13,8	14,0
пара и горячей воды	22,6	30,5	38,0	39,7	42,3	44,0
топлива и продуктов его переработки	69,9	58,7	48,7	46,6	42,9	42,0
Обеспечение тепловой энергией среднего и низкого потенциала за счет						
электроэнергии	–	0,1	1,1	1,3	1,6	2,0
пара и горячей воды	41,6	55,4	68,4	70,6	73,5	78,7
топлива	58,4	44,5	30,5	28,1	24,9	19,3
Расход конечной тепловой энергии						
среднего потенциала	64,2	47,8	44,3	43,0	41,3	39,8
низкого потенциала	35,8	52,2	55,7	57,0	58,7	60,2
Доля расхода энергетических ресурсов на производство пара и горячей воды от общего расхода энергоресурсов в СССР	15,6	19,7	25,2	26,3	27,7	26,6

высокого потенциала; относительно стабилизировалась доля тепловой энергии среднего и низкого потенциала.

Из данных табл. 1.2 видно, что главными направлениями совершенствования структуры энергоносителей является увеличение доли электроэнергии, пара и горячей воды в обеспечении всех видов конечной энергии при снижении доли топлива, непосредственно используемого в конечных потребительских установках.

Тенденция увеличения доли пара и горячей воды в расходе конечной энергии служит важным ориентиром в формировании производственной части энергетического комплекса. В настоящее время паром и горячей водой обеспечивается свыше 40% расхода конечной энергии. Следует предвидеть дальнейшее увеличение доли пара и горячей воды в общем расходе энергии до 50%.

Анализ участия энергоносителей в обеспечении тепловой энергии среднего и низкого потенциала выявил следующие важные тенденции (см. табл. 1.2):

увеличение доли пара и горячей воды почти в 2 раза; значительное сокращение доли топлива, непосредственно используемого в потребительских установках. В настоящее время паром и горячей водой обеспечивается более 70% потребности в теплоте среднего и низкого потенциала; в перспективе предполагается увеличение этого показателя до 80%. В табл. 1.2 приведены также данные по структуре конечной тепловой энергии, которые показывают рост доли тепловой энергии низкого потенциала при снижении доли тепловой энергии среднего потенциала. Увеличение доли теплоты низкого потенциала — результат централизации теплоснабжения населения и сферы обслуживания.

Увеличение доли конечной энергии, обеспечиваемой паром и горячей водой, естественно, привело к росту доли энергетических ресурсов на производство пара и горячей воды. За 30 лет эта доля выросла с 15,6 до 27,7%. В 1985 г. на эти цели было израсходовано более 500 млн т у.т. Ожидается дальнейший абсолютный рост расхода энергоресурсов на выработку пара и горячей воды. Это, в свою очередь, открывает возможность широкого использования атомной энергии и твердого топлива для целей теплоснабжения.

Анализ расхода тепловой энергии среднего и низкого потенциала по отраслям народного хозяйства страны (табл. 1.3) показывает, что в настоящее время основная доля этой энергии (около 60%) поглощается в сфере материального производства, преимущественно в промышленности. Рост доли теплоты среднего и низкого потенциала, потребляемой в промышленности, в значительной мере вызван ускоренным развитием химической и нефтеперерабатывающей отраслей. В связи с углублением отбора светлых нефтепродуктов в перспективе можно ожидать дальнейшего увеличения потребления рассматриваемого вида тепловой энергии при переработке нефти.

Вторым после промышленности крупным потребителем тепловой энергии среднего и низкого потенциала в сфере материального производства является сельское хозяйство. В последние 30 лет его энергоемкость по теплоте среднего и низкого потенциала резко возрастала в результате коренной реконструкции производственной базы животноводства. Процесс этот еще не завершен, и рост энергоемкости продукции сельского хозяйства по тепловой энергии среднего и низкого потенциала будет продолжаться.

Таблица 1.3. **Расход тепловой энергии среднего и низкого потенциала по отраслям народного хозяйства СССР по годам, % [10, 14]**

Отрасль народного хозяйства	1955 г.	1965 г.	1975 г.	1980 г.	1985 г.	1990 г.
Промышленность	34,9	40,1	44,8	48,3	49,1	49,9
Строительство	5,2	3,8	3,2	2,9	2,6	2,6
Транспорт	1,4	1,3	1,8	1,8	1,9	2,0
Сельское хозяйство	1,7	3,0	4,1	4,3	4,5	5,0
Прочие отрасли	6,1	3,9	3,0	3,9	3,3	3,1
Быт и сфера обслуживания	50,7	47,9	43,1	38,8	38,6	37,4

Примечание. Расход в целом по народному хозяйству принят за 100%.

Как видно из табл. 1.3, доля расхода тепловой энергии среднего и низкого потенциала в непроизводственной сфере (быт и сфера обслуживания) за последние 30 лет заметно снизилась, особенно в первые десятилетия. Это связано прежде всего с тем, что темпы развития теплоемких отраслей народного хозяйства (химия, нефтепереработка) были существенно выше, чем темпы жилищного строительства и развития сферы услуг по стране в целом.

Централизация теплоснабжения и концентрация тепловых нагрузок. Потребление тепловой энергии за последние 25 лет выросло в 2,5 раза. Оно все в большей мере обеспечивается централизованным производством пара и горячей воды, доля которого увеличится с 35% в 1965 г. до 57% в 1990 г. (табл. 1.4).

Массовое развитие теплофикации (от ОТЭЦ обеспечивается 1/3 общего теплопотребления и свыше 40% теплопотребления городских поселений) — одно из главных направлений научно-технического прогресса в энергетике СССР, дающее существенную экономию топлива (ежегодно около 40 млн т у.т.) и трудовых ресурсов, а также возможность маневрировать энергетическими ресурсами.

Значительную роль в обеспечении централизованного теплоснабжения играют крупные котельные на органическом топливе. По сравнению с децентрализованными источниками теплоты крупные котельные также обладают рядом преимуществ: их развитие обеспечивает существенную экономию органического топлива и резкое (почти десятикратное) снижение удельной численности обслуживающего персонала; при их сооружении достигается заметное снижение удельных капиталовложений. Вместе с тем

Таблица 1.4. **Теплоснабжение в народном хозяйстве СССР [9, 14]**

Источник теплоснабжения	1965 г.	1975 г.	1980 г.	1985 г.	1990 г.
Централизованные источники	1940	3800	4500	5200	5500
Теплоэлектроцентрали	30	34	34	34	33
Крупные котельные (производительностью более 200 ГДж/ч)	200	1200	1900	2600	3140
	3	11	14	17	19
Утилизационные установки	140	360	480	620	840
	2	3	4	4	5
Итого	2280	5360	6880	8420	9480
	35	48	52	55	57
Мелкие котельные (производительностью менее 200 ГДж/ч)	1950	2600	2700	2800	2950
	30	24	20	18	18
Индивидуальные установки	2300	3100	3640	3980	4170
	35	28	28	27	25
Всего	6530	11060	13220	15200	16600
	100	100	100	100	100

Примечание. В числителе — млн ГДж, в знаменателе — %.

Таблица 1.5. **Удельный вес городов и поселков городского типа в СССР по концентрации тепловых нагрузок, % [10]**

Максимальная часовая тепловая нагрузка, тыс. ГДж/ч	1975 г.	1980 г.	1985 г.	1990 г.
Более 40	9,2	8,8	11	11,9
20 – 40	7,7	11,7	11,5	17,2
12 – 20	8,4	11,4	16,3	13,7
6 – 12	18,2	18,0	18,6	19,1
2 – 6	56,5	50,1	42,6	38,1

крупные котельные в ряде случаев имеют некоторые преимущества и перед ОТЭЦ: они, как правило, размещаются в центре тепловых нагрузок и поэтому требуют меньших затрат на сооружение тепловых сетей (ТС) и др.

Сопоставление данных о росте абсолютных и относительных размеров производства теплоты в крупных котельных и ОТЭЦ (см. табл. 1.4) показывает, что они развивались неравномерно: удельный вес отпуска теплоты от крупных котельных за 1965–1990 гг. вырос с 2 до 19%, а от ТЭЦ – лишь с 30 до 33%; абсолютный же размер отпуска теплоты от крупных котельных за этот период увеличился примерно в 16 раз, а от ТЭЦ – лишь в 2,8 раза.

Однако высокоэффективные крупные установки централизованного теплоснабжения обеспечивают лишь немногим более половины общего теплопотребления страны (в том числе в городах – 70%), а остальную часть – многочисленные (около 300 тыс.) малоэкономичные мелкие котельные и индивидуальные бытовые установки. Как видно из табл. 1.4, несмотря на снижение доли мелких котельных и индивидуальных установок, абсолютная суммарная теплопроизводительность этих видов источников теплоты продолжает расти. Причина этого в отставании темпов централизации теплоснабжения от темпов роста концентрации тепловых нагрузок, которое в первую очередь обусловлено недостатками организации в планировании, проектировании, строительстве и эксплуатации систем теплоснабжения. Следствием этого являются заниженные вводы крупных ИТ и неупорядоченное строительство множества мелких промышленных и отопительных котельных. Рост централизации теплоснабжения до экономически целесообразного уровня путем дальнейшего совершенствования структуры теплового хозяйства – важная задача развития энергетики.

Дальнейшее развитие народного хозяйства СССР предопределяет значительное увеличение потребностей в теплоте в промышленности, сельском хозяйстве, быту и сфере обслуживания. Годовые темпы роста теплопотребления составляют в настоящее время 2–3%. Продолжается дальнейшая концентрация тепловых нагрузок в городах. Из данных табл. 1.5 следует, что за рассматриваемый период существенно возрастает удельный вес городов с максимальной часовой тепловой нагрузкой 20 000 ГДж/ч и выше. Также растет доля городов с нагрузками в диапазоне 12 000–20 000 ГДж/ч, а удельный вес городов с тепловой нагрузкой 6000–

12 000 ГДж/ч мало меняется. Снижение доли городов с тепловой нагрузкой 2000–6000 ГДж/ч объясняется переходом части из них (по мере роста теплопотребления) в группы городов с более высокими уровнями теплопотребления.

В целом достаточно устойчиво наблюдается тенденция роста удельного веса больших концентраций тепловых нагрузок и уменьшения доли малых концентраций потребителей тепловой энергии. Последующий период будет характеризоваться дальнейшим ростом концентрации тепловых нагрузок. Так, на уровне 1990 г. удельный вес городов, максимальная тепловая нагрузка в которых превышает 6000 ГДж/ч, достигает 62%, в том числе городов с тепловой нагрузкой 20 000 ГДж/ч и выше – 29%. Указанная тенденция создает благоприятные предпосылки для сооружения крупных ИТ.

Непрерывный рост концентрации тепловых нагрузок служит основой дальнейшего увеличения доли централизованного теплоснабжения. Исходя из допущения, что централизованным теплоснабжением обеспечиваются только города с тепловой нагрузкой более 2000 ГДж/ч, его долю в общем теплопотреблении страны можно увеличить до 65–70%, что соответствует возрастанию степени централизации теплоснабжения городов до 75–80%.

Режимы теплопотребления. Они существенно различны для отдельных групп потребителей. Для промышленных предприятий режимы теплопотребления определяются видом технологической схемы, сменностью наиболее теплопотребляющих цехов, особенностью производственного цикла предприятия, климатической характеристикой района расположения предприятия и другими факторами. По режимным признакам промышленные потребители теплоты могут быть разбиты на две группы [5]: 1) наиболее теплоемкие отрасли – нефтеперерабатывающая, химическая, целлюлозно-бумажная, металлургическая с предприятиями, работающими в три смены, с непрерывным технологическим процессом и соответствующим суточным режимом теплопотребления; 2) менее теплоемкие отрасли – машиностроение, легкая промышленность с двухсменными предприятиями, у которых суточный режим теплопотребления имеет регулярные снижения потребления теплоты в ночные часы.

Коэффициент неравномерности, определяемый как отношение минимального часового потребления теплоты к максимальному в течение суток, колеблется на предприятиях нефтеперерабатывающей и химической отраслей промышленности в пределах 0,92–0,96, на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности – 0,80–0,85, на предприятиях металлургической промышленности – 0,70–0,85. На предприятиях машиностроения и легкой промышленности недельные графики показывают четкое снижение потребления теплоты в выходные и предпраздничные дни, которое по различным предприятиям меняется в пределах от 10 до 50%. Двухсменная работа предприятий этой группы определяет ежесуточное снижение тепловой нагрузки в ночное время на 10–25%. Режим теплопотребления в течение рабочего времени суток имеет ровный характер, колебания нагрузки незначительны – в пределах 5–10%.

Все нефтеперерабатывающие, химические и целлюлозно-бумажные предприятия имеют сезонное снижение технологического потребления теплоты. Это снижение происходит за счет снятия технологического обогре-

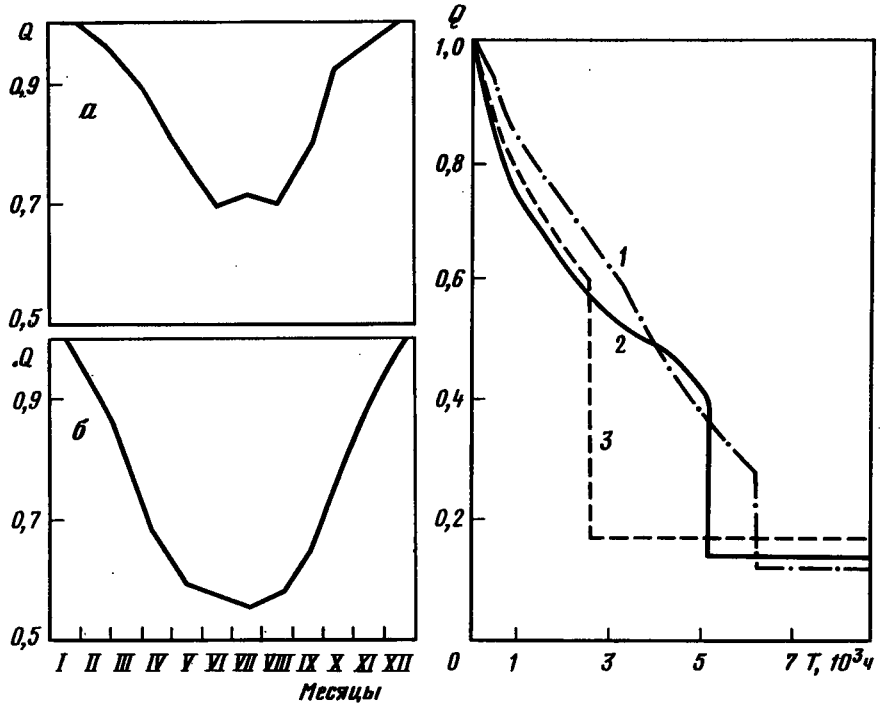


Рис. 1.1. Годовые графики теплопотребления (в относительных единицах) нефтехимической (*а*), машиностроительной и легкой (*б*) промышленностью

Рис. 1.2. Годовые графики теплопотребления при совмещенном максимуме тепловой нагрузки городов Якутск (*1*), Москва (*2*), Баку (*3*)

ва, снятия отопительно-вентиляционного теплопотребления и снижения нагрузки горячего водоснабжения. Для второй группы предприятий также характерно сезонное снижение теплопотребления. На рис. 1.1 показаны усредненные годовые графики тепловых нагрузок для трех характерных отраслей промышленности, построенные по среднемесячной нагрузке предприятий. Как видно, снижение тепловых нагрузок летнего периода по отношению к зимнему составляет около 30% на нефтехимических комбинатах и 45% на предприятиях машиностроительной и легкой промышленности [5].

Режим расхода теплоты на отопление и вентиляцию находится в прямой зависимости от климатических факторов: температуры наружного воздуха и силы ветра. Этим определяется резко сезонный характер потребления. Влияние климатических условий на величину и характер теплопотребления трех характерных городов иллюстрирует рис. 1.2 [15]. Видно, что основной параметр — продолжительность отопительного периода — колеблется от 2600 до 6200 ч.

Колебания нагрузки в течение суток и недели в отопительный период в основном зависят от расхода воды на горячее водоснабжение. В отличие от отопительно-вентиляционного потребления, которое в течение суток можно считать равномерным и непрерывным, расход на го-

рячее водоснабжение изменяется в течение дней недели, суток и отдельных часов в широких пределах. Как правило, максимум теплопотребления наблюдается в утренние и вечерние часы (рис. 1.3). Дневное снижение расхода теплоты на горячее водоснабжение составляет 15—45% максимума, ночные провалы в потреблении горячей воды достигают 80—90%. Сутки наибольшего потребления на горячее водоснабжение — суббота и воскресенье в течение всего года [5].

Работа ОТЭЦ в электроэнергетических системах. При разработке концепции развития теплоснабжения необходимо учитывать обострившиеся проблемы покрытия переменной части графика электрических нагрузок электроэнергетических систем (ЭЭС) в европейской части страны. Исследования перспективной структуры электрогенерирующих мощностей выявили необходимость существенного повышения удельного веса маневренного оборудования в европейских районах страны. В настоящее время удельный вес маневренного оборудования в структуре генерирующих мощностей европейской части страны не превышает 13%, тогда как на перспективу требуется иметь не менее 20—22% [10].

В восточных районах страны проблема обеспечения переменной части графика электрической нагрузки не возникает из-за высокого удельного веса гидроэлектростанций (ГЭС); в перспективе эта проблема также может быть решена за счет использования собственных гидроресурсов. Поэтому действующим и вновь вводимым ТЭЦ на органическом топливе может быть обеспечен базисный режим работы.

Учитывая тенденции к возможному разуплотнению графиков электрической нагрузки, ограниченность собственных гидроресурсов и ввод базисных атомных конденсационных электростанций, в европейских районах уже в ближайшие годы необходимо развивать специальные маневренные тепловые электростанции (паротурбинные и газотурбинные) в масштабах, достаточных для увеличения доли маневренного оборудования. В качестве одного из весьма эффективных типов маневренных электростанций на органическом топливе выступает маневренная паротурбинная ОТЭЦ.

Специальный тип маневренных ТЭЦ на органическом топливе сочетает преимущества централизованного теплоснабжения, теплофикации и маневренных электрогенерирующих установок, которые могут взять на себя регулирование суточной и недельной неравномерности графика электрической нагрузки. При этом профиль и параметры ОТЭЦ изменяются в следующих основных направлениях: 1) применение котлов и турбин на докритические параметры пара и без промежуточного перегрева пара, что обеспечивает получение высокой маневренности; 2) установка редукционно-охладительных устройств, дублирующих производительность отборов пара турбин в целях обеспечения возможности полной их остановки в нерабочие сутки или снижения мощности примерно до 50% в ночные часы рабочих суток.

Изменение места ТЭЦ на органическом топливе на графиках нагрузки ЭЭС европейских районов СССР иллюстрирует рис. 1.4. В настоящее время ОТЭЦ занимают базисную часть графиков электрической нагрузки как в рабочие, так и в выходные дни (рис. 1.4, *а* и *б*) и являются конкурентами атомным конденсационным электростанциям. При этом, естественно, снижается их относительная эффективность и ставится под вопрос целесооб-

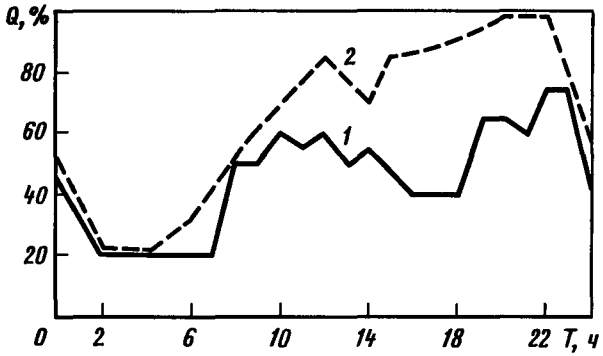


Рис. 1.3. Суточный график горячего водоснабжения жилого района для рабочего дня (*1*) и субботы (*2*)

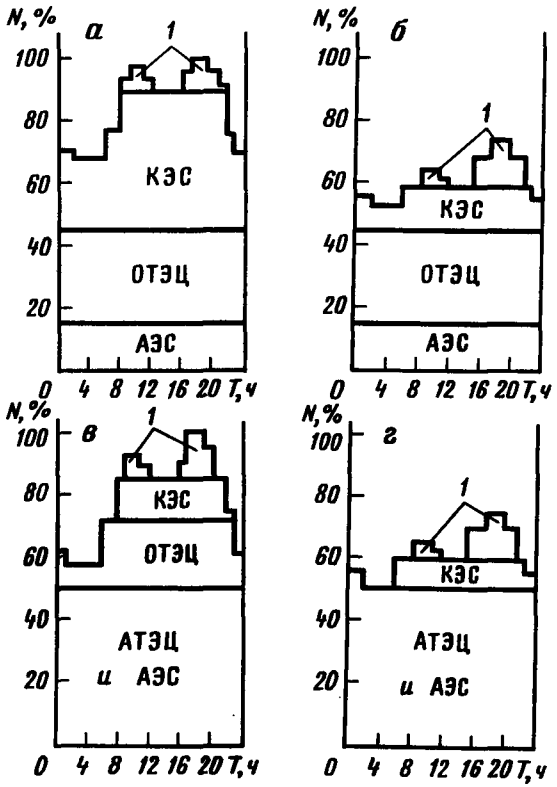


Рис. 1.4. Место ОТЭЦ на графиках электрической нагрузки ЭЭС европейской части СССР

а, б — настоящее время; *в, г* — перспектива; *а, в* — рабочие дни; *б, г* — выходные и праздничные дни; *1* — пиковые энергоустановки

Таблица 1.6. **Основные показатели теплофикационных ПГУ ($t_{нар}$ = –5° С)**

Показатель	Тип энергетического блока		
	ПГУ-350	ПГУ-250	Т-250
Тип газовых турбин	ГТЭ-150	ГТЭ-45	–
Число газовых турбин	1	2	–
Начальная температура газов, °С	950/1100*	900	–
Общая мощность ГТУ, МВт	146/196*	116	–
Тип паровой турбины	Т-180/210-130	Т-110/120-130	Т-250/300-240
Мощность паровой турбины, МВт	190	120	247
Давление пара, МПа	13	13	24
Температура пара, °С	540/540	560	540/540
Отпуск теплоты, Гкал/ч	310	253	344
Электрическая мощность (брутто), МВт	336/386*	236	247
Расход топлива, т у. т./ч	104/110*	78	108

*Слева от черты – для первоочередных ГТУ, справа – для перспективных.

разность сооружения новых ОТЭЦ. Напротив, маневренные ОТЭЦ, занимая место в полупиковой части графика электрических нагрузок ЭЭС рабочих дней (рис. 1.4, *в*) и не участвуя в покрытии графика нагрузки в нерабочие дни (рис. 1.4, *г*), перестают быть конкурентами как АЭС, так и вновь появляющимся атомным ТЭЦ (АТЭЦ).

Источники тепловой энергии. На новом этапе развития энергетики централизованное теплоснабжение может осуществляться установками пяти типов: ТЭЦ на органическом топливе; атомными ТЭЦ; атомными конденсационными электростанциями с нерегулируемыми отборами пара для целей теплоснабжения; крупными районными котельными (РК), работающими на органическом топливе; крупными котельными на ядерном топливе – атомными станциями теплоснабжения.

Развитие ОТЭЦ будет происходить за счет строительства маневренных ОТЭЦ в европейских районах и базисных ОТЭЦ в восточных районах страны. Технология разгрузки теплофикационной турбины достаточно проста и заключается в передаче нагрузки теплофикационных отборов на дополнительный бойлер с подогревом в нем сетевой воды редуцируемым острым паром котла. В принципе может быть достигнут регулировочный диапазон блоков по электрической мощности от 100 до 0%. Каких-либо серьезных эксплуатационных трудностей такой способ регулирования электрической мощности ОТЭЦ не представляет, поскольку все котельное оборудование остается работать в режиме, близком к базовому, с разгрузкой не более чем на 40%.

На маневренных ОТЭЦ в европейских районах страны целесообразно устанавливать турбины типа "Т" мощностью до 175–200 МВт на докри-

тические параметры пара. Более мощные (250/300 МВт), но не маневренные теплофикационные блоки на закритическое давление пара целесообразно устанавливать только в районах Сибири, где проблема маневренности в ЭЭС решается другими способами и где ОТЭЦ обеспечена работа в базе графика нагрузки ЭЭС.

Значительные возможности повышения эффективности ОТЭЦ обеспечивает применение на них парогазовых установок (ПГУ). Наибольшую экономичность обеспечивают ПГУ с повышенной степенью бинарности (табл. 1.6). Так, ПГУ мощностью 300 МВт в сравнении с паровой турбиной Т-250/300-240 (в условиях приведения обоих вариантов к одинаковому энергетическому эффекту) обеспечивает годовую экономию топлива 9—15%. Могут представить интерес и ОТЭЦ преимущественно небольшой мощности, оборудованные газотурбинными установками (ГТУ).

На атомных ТЭЦ реализуется традиционная для теплоэнергетики теплофикационная схема. На начальном этапе развития атомного теплоснабжения разрабатываются и реализуются АТЭЦ на базе водоохлаждаемых реакторов (рис. 1.5), генерирующих насыщенный пар средних параметров и потому характеризуемых сравнительно невысокой выработкой электроэнергии на тепловом потреблении. В настоящее время в Советском Союзе ведутся проектные разработки АТЭЦ единичной электрической мощностью порядка 2000 МВт и тепловой мощностью отборов турбин 7000—7500 ГДж/ч на базе реакторов ВВЭР-1000-60 и турбин ТК-450/500-60 или ТК-900/1000-60.

При выборе характеристик указанных и перспективных АТЭЦ и других типов атомных источников теплоты следует учитывать принципиальные отличия в развитии теплоснабжения на ядерном и органическом топливе, связанные с особенностями формирования затрат. Во-первых, более низкая топливная составляющая на теплофикационных агрегатах АТЭЦ (в отличие от ОТЭЦ) повышает эффективность производства электроэнергии

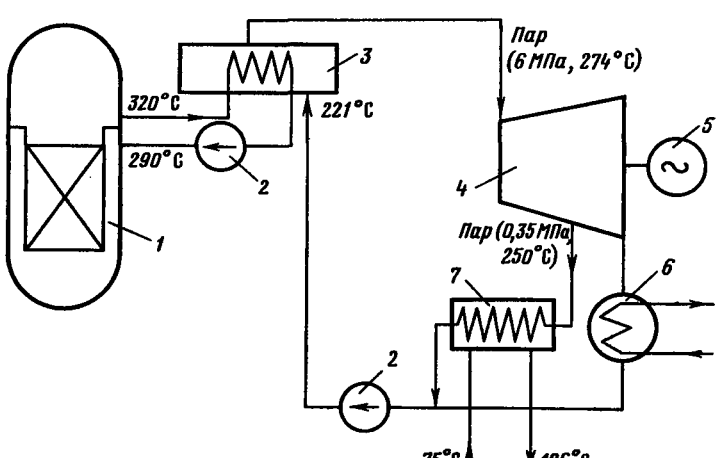


Рис. 1.5. Тепловая схема АТЭЦ на основе реактора ВВЭР-1000

1 — реактор; *2* — насос; *3* — парогенератор; *4* — паровая турбина; *5* — электрогенератор; *6* — конденсатор; *7* — подогреватель воды для теплоснабжения

по конденсационному циклу на АТЭЦ. Во-вторых, существенная зависимость удельной стоимости ядерного реактора от его производительности предопределяет установку на АТЭЦ реакторов предельной мощности.

Расчеты показывают, что при отсутствии внешних ограничений (по условиям водоснабжения, экологии и др.) на АТЭЦ следует устанавливать не менее двух реакторов предельной мощности и применять турбины типа "ТК" с большой "привязанной" конденсационной мощностью. Если же такие ограничения существуют, то может быть целесообразной установка турбины без "привязанной" или со сниженной "привязанной" конденсационной мощностью. В этом случае тому же расчетному расходу теплоты на турбину будет соответствовать существенно больший расчетный отпуск теплоты от турбины для целей теплоснабжения и меньшая ее электрическая мощность.

Важным источником теплоснабжения является конденсационная атомная электростанция. Из нерегулируемых отборов конденсационных турбин АЭС можно получать до 800–1600 ГДж/ч и более теплоты отборного пара на 1 млн кВт мощности АЭС. Массовое сооружение АЭС открывает возможности широкого развития теплоснабжения потребителей, расположенных в радиусе экономически оправданного транспорта горячей воды.

Совершенствование оборудования крупных районных котельных предусматривает укрупнение производительности котлоагрегатов, производящих пар (параметры до 2,4 МПа и 250° С), до 100–150 т/ч (при работе на угле и газомазутном топливе) и создание водогрейных котлов на углях восточных районов производительностью 200 и 400 ГДж/ч. Целесообразно создавать такие котлы для работы под наддувом с повышенной заводской готовностью в виде транспортабельных блоков, а также широко применять для них принцип сжигания твердых топлив в кипящем слое [9].

Атомная станция теплоснабжения – это одноцелевой генератор теплоты требуемых параметров. Возможны два варианта выполнения такого генератора: 1) атомная станция теплоснабжения (АСТ) для обеспечения теплотой бытового потребления и 2) атомная станция промышленного или промышленно-бытового теплоснабжения (АСПТ), ориентированная на более высокий потенциал используемого пара (рис. 1.6).

Как известно, во всех ядерных энергетических установках предусматриваются необходимые меры радиационной безопасности. Характер этих мер и набор соответствующих технических решений зависят от типа установки и условий ее размещения по отношению к потребителю. В предназначенных для целей теплоснабжения АСТ и АСПТ предусматриваются специальные технические мероприятия, повышающие их радиационную безопасность: применение естественной циркуляции в ядерном реакторе; низкое давление теплоносителя в основном контуре; низкая температура теплоносителя и умеренная энергонапряженность активной зоны; размещение основного корпуса реактора внутри страховочного корпуса, что исключает перегрев активной зоны в аварийных ситуациях; нагрев сетевого теплоносителя промежуточной греющей средой, давление которой ниже давления теплоносителя в сети и др. Все это позволяет создать АСТ и АСПТ повышенной безопасности [13, 16].

Для целей высокотемпературного теплоснабжения разрабатываются высокотемпературные реакторы. Одна из возможных технологических

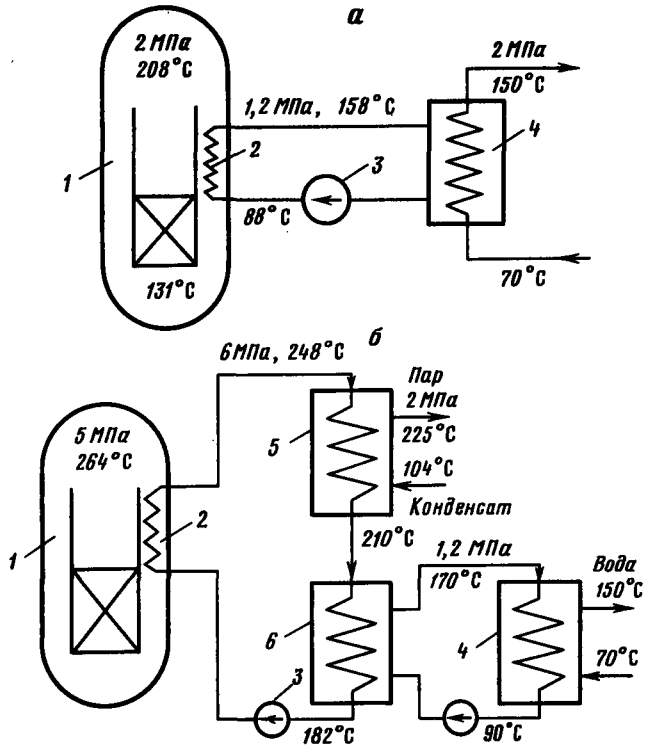


Рис. 1.6. Тепловые схемы АСТ (*а*) и АСПТ (*б*) с водоохлаждаемыми реакторами
1 – реактор; *2* – встроенный реакторный теплообменник (ВРТ); *3* – насос; *4* – сетевой теплообменник вода–вода (СТВ); *5* – парогенератор (ПГ); *6* – промежуточный теплообменник (ПТ)

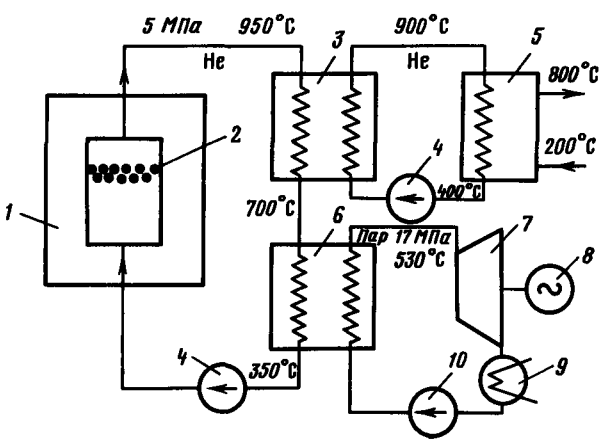


Рис. 1.7. Тепловая схема ядерного энергоисточника с высокотемпературным реактором
1 – реактор; *2* – шариковые ТВЭЛы; *3* – теплообменник гелий–гелий; *4* – компрессор; *5* – теплообменник гелий–технологический продукт; *6* – теплообменник гелий–вода (пар); *7* – паровая турбина; *8* – электрогенератор; *9* – конденсатор; *10* – насос

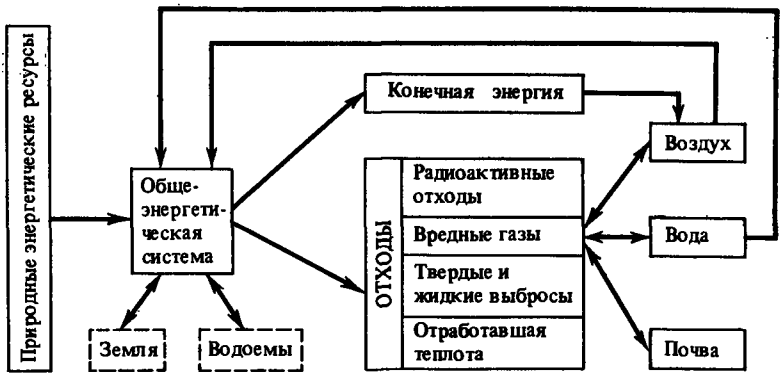


Рис. 1.8. Принципиальная схема основных энергоэкологических связей

схем перспективной высокотемпературной ядерной энергетической установки приведена на рис. 1.7. Эта схема позволяет отбирать тепловую энергию с температурой до 800°С. Параметры частично охладившегося газа достаточны для генерации перегретого пара стандартного паросилового цикла.

Роль экологических факторов. Связи энергетики с окружающей средой (биосферой) имеют в основном отрицательные экологические последствия: энергетическое хозяйство, потребляя природные энергетические ресурсы, трансформирует их в конечную энергию, полезно используемую народным хозяйством, и в отходы (рис. 1.8). Основные из них – радиоактивные отходы, вредные газы, твердые и жидкие выбросы, а также отработавшая теплота. Эти отходы так или иначе соприкасаются с воздухом, водой и почвой. Потребляет же энергетическое хозяйство для своего функционирования из биосферы (кроме энергетических ресурсов) в основном кислород и воду; последнюю главным образом для отвода теплоты из теплосилового цикла [9].

Применительно к теплоснабжению проблема локализации радиационных излучений имеет усложняющий аспект: два типа атомных источников теплоты – АСТ и АСПТ – территориально приближены к потребителю. Поэтому при решении этой проблемы, кроме общих подходов и методов, используемых для обеспечения безопасности АЭС и АТЭЦ, принимаются дополнительные меры для повышения радиационной безопасности этих типов АИТ. Некоторые из этих мер уже названы при описании АСТ и АСПТ.

Ныне считается, что при высоком качестве оборудования и монтажа АИТ, строгом соблюдении в эксплуатации действующих правил радиационной безопасности, должным образом организованной службе контроля может быть обеспечена требуемая безопасность АИТ. Естественно, что при этом под радиационной безопасностью понимают как нормальные, так и практически самые тяжелые возможные аварийные и послеаварийные ситуации на АИТ. Вместе с тем, учитывая, что использование ядерной энергии для целей теплоснабжения находится в начальной стадии, к этим вопросам необходимо постоянное внимание.

Весьма существенную долю в загрязнение атмосферы вносят ОТЭЦ, РК и особенно мелкие котельные, выбрасывающие с продуктами сгорания золу, окислы серы и азота. Особенно сложна и практически еще не решена проблема уменьшения выбросов серы даже для крупных энергоустановок. Ныне разрабатываемые методы очистки требуют очень больших затрат, а поэтому пока нереальны. Следовательно, необходимо направить большие силы и средства на решение этой задачи.

Уменьшения выбросов твердых частиц на крупных энергоустановках добиваются сооружением высокоэффективных золоуловителей (коэффициент улавливания до 97–99%). На установках малой мощности эффективность улавливания твердых частиц во много раз меньше. Очевидно, что наряду с совершенствованием технических решений по мелким котельным на них нужно сжигать топливо повышенного качества. Для сокращения выбросов окислов азота, относительная вредность которых в 6–10 раз превышает вредность окислов серы, в настоящее время предложен ряд конструктивных и технологических мероприятий, которые позволяют без крупных затрат в 1,5–2,5 раза снижать концентрацию окислов азота в дымовых газах ОТЭЦ и РК.

Существенное уменьшение всех видов выбросов ОТЭЦ и РК в атмосферу может дать применение новых типов топочных устройств (например, разные виды топок с кипящим слоем) и использование комбинированных энерготехнологических установок. Такие установки могут обеспечить практически безотходное производство различных видов энергии, химических продуктов, строительных материалов, что повышает их экономическую эффективность.

Значительный эффект в уменьшении экологического воздействия с одновременным улучшением процессов горения и повышения экономических показателей ИТ дает обогащение топлива перед его сжиганием. Особенно важно обеспечить обогащенным топливом мелкие и средние ИТ.

Уменьшение вредных экологических последствий от развития энергетики в целом и теплоснабжения в частности требует достаточно крупных затрат (5–10% от общих затрат на энергетику). Поэтому нужно уметь обоснованно определять наиболее эффективные направления расходования этих средств.

1.2. Задачи развития

Дальнейшее развитие централизованного теплоснабжения, сопровождающееся значительным расходом материальных и трудовых ресурсов, приводит к необходимости более широкого анализа взаимосвязей СЦТ с другими элементами энергетического комплекса (ЭК). Этот анализ можно выполнить с использованием методологии системных исследований, которая в последние годы получает все большее применение в энергетике [9].

Основные задачи, связанные с оптимизацией развития системы централизованного теплоснабжения, можно с определенной долей условности сгруппировать на четырех иерархических уровнях: энергетический комплекс страны; электроэнергетическая система и система ядерной энергетики (СЯЭ); система теплоснабжения города или промышленного центра;

источники теплоты (рис. 1.9). Кроме этого, необходимо иметь в виду временную иерархию задач, т.е. зависимость их состава и содержания от временного разреза изучения. Для каждого из указанных иерархических уровней должны быть разработаны соответствующие методы и модели, учитывающие особенности решаемых задач [17].

На I иерархическом уровне оптимизация масштабов развития централизованного теплоснабжения в стране и в отдельных крупных регионах осуществляется в рамках исследования ЭК. Это позволяет увязать вопросы развития теплоснабжения страны с формированием структуры ЭК и определить их взаимное влияние.

Результаты оптимизации ЭК позволяют определить: оптимальные уровни развития централизованного теплоснабжения на органическом и ядерном горючем в стране и в отдельных регионах; суммарную мощность ОТЭЦ и АТЭЦ и соответственно оптимальные уровни развития теплофикации на органическом и ядерном горючем; масштабы применения РК, АСТ и АСПТ; вид и объемы топлива, выделяемого на цели теплоснабжения для каждого региона. При решении задач учитываются технические и экологические ограничения, например: по возможности работы ОТЭЦ и АТЭЦ в разных частях графика электрической нагрузки ЭЭС; по удаленности ОТЭЦ и АТЭЦ от городской застройки и др. Большая часть задач на этом уровне решается с заблаговременностью 10–20 лет.

На II иерархическом уровне решаются две группы задач: а) применительно к ЭЭС (определяются суммарные мощности и режимы использования ОТЭЦ и АТЭЦ и очередности развития отдельных теплоэлектроцентралей на перспективу 5–15 лет; оценивается целесообразность создания новых типов оборудования, наилучшим образом учитывающего требования ЭЭС) и б) применительно к СЯЭ (уточняются тип, единичная и суммарная мощности, вид топлива и другие характеристики ядерных реакторов АТЭЦ, АСТ и АСПТ на перспективу).

На III иерархическом уровне, т.е. при исследовании системы теплоснабжения города или промышленного центра, решаются задачи выбора стратегии оптимального развития системы теплоснабжения при использовании органического и ядерного горючего, включающие определение оптимальной единичной мощности, состава и сроков ввода основного оборудования ОТЭЦ, АТЭЦ, РК, АСТ, АСПТ, а также направлений трасс и параметров магистральных тепловых сетей; здесь же анализируется сравнительная эффективность применения комбинированной и раздельной схем энергоснабжения. Конкретное содержание названных задач определяется временным уровнем изучения системы. Наиболее важным представляется уровень, при котором развитие системы теплоснабжения города (промышленного центра) оптимизируется на перспективу 10–15 лет, поскольку именно на этом этапе выбираются число, тип, место размещения и возможная мощность централизованных источников теплоснабжения и трассировка магистральных тепловых сетей.

IV иерархический уровень включает оптимизацию отдельных элементов системы теплоснабжения (ОТЭЦ, АТЭЦ, РК, АСТ, АСПТ, тепловые сети) при заданных связях с системой теплоснабжения, электроэнергетической системой, системой ядерной энергетики и другими внешними системами. Применительно к источникам теплоты ищется рациональный вид технологи-

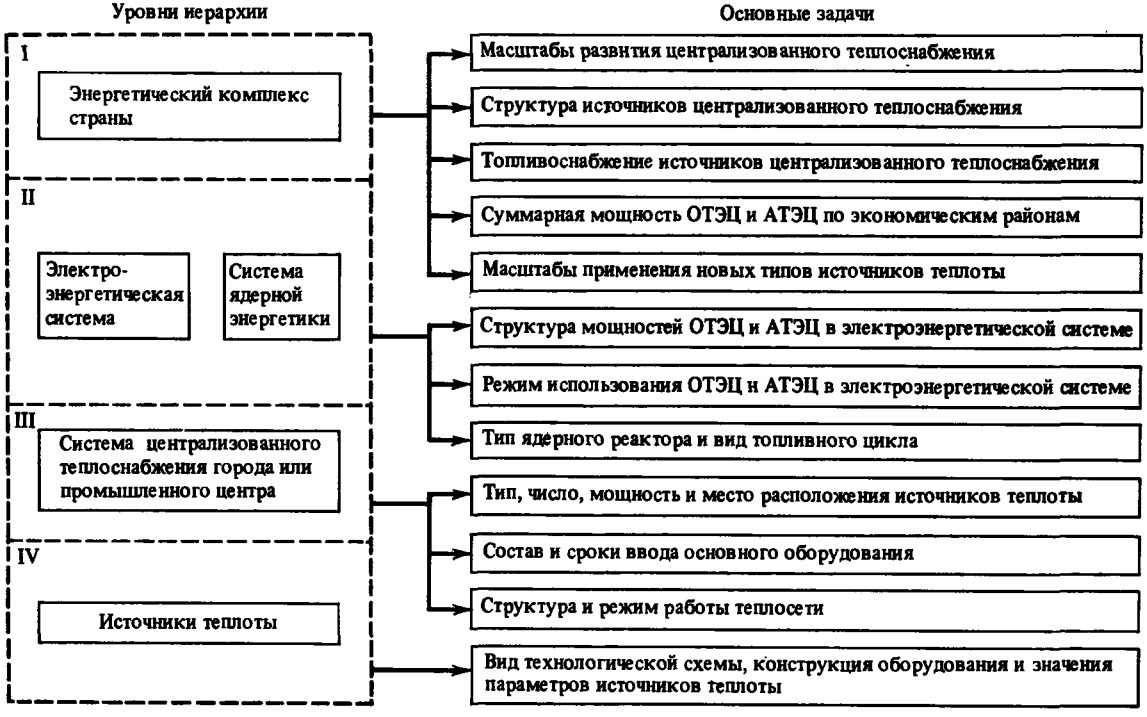


Рис. 1.9. Взаимосвязь уровней иерархии и основных задач развития систем теплоснабжения

ческой схемы, наилучшие конструктивно-компоновочные решения по оборудованию и оптимальные значения расходных и термодинамических параметров. Создание новой теплогенерирующей установки, особенно на ядерном горючем, – сложная техническая задача, поэтому основные решения ее должны находиться заблаговременно, на перспективу 7–10 лет.

Вследствие существенного взаимного влияния результатов решений задач разных иерархических уровней необходимо обеспечить их итерационное взаимодействие.

Глава вторая

ОСНОВЫ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

2.1. Исходные положения

Современная система централизованного теплоснабжения города или промышленного центра представляет собой технический комплекс разнородных теплопроизводящих и теплопотребляющих установок со сложной схемой внутренних и внешних связей. В энергоустановках этого комплекса одновременно протекают и тесно взаимодействуют различные физико-химические процессы. СЦТ может иметь множество различных схем распределения теплоты, в ней могут найти применение разнообразные типы энергоустановок. Развитие СЦТ идет по пути создания новых технологий, увеличения отпуска теплоты в виде пара и горячей воды, внедрения новой техники, экономного расходования топлива и других материалов, создания безотходных и малоотходных производств.

Большая сложность внутренних взаимосвязей параметров, процессов и характеристик СЦТ, а также внешних ее связей с другими объектами энергетического комплекса и народного хозяйства страны является отличительной чертой современных СЦТ. Весьма существенны также такие факторы, как непрерывность, а часто и неразрывность во времени процессов производства, распределения и потребления тепловой энергии. Поэтому комплексный выбор оптимальных параметров для любой СЦТ означает, с одной стороны, максимально возможный учет всех внешних технических и экономических факторов, а с другой стороны, полноту учета внутренних физических, технических и экономических взаимосвязей при многочисленных факторах, действующих в конкретной специфике схемы, и типов энергоустановок СЦТ.

Принимая во внимание многообразие типов оборудования энергоустановок, число параметров, характеризующих каждый тип оборудования, число возможных схем подачи теплоты потребителям, без труда можно убедиться, что количество возможных вариантов выполнения СЦТ очень велико. Задача состоит в том, чтобы найти эти варианты, проверить их техническую выполнимость, экономически оценить каждый из них и, сравнивая между собой, выбрать наилучший.

При поиске конструктивных путей решения этой очень сложной задачи целесообразно использовать методологию системных исследований, которая является одним из ведущих направлений в современном научном

познании [9, 18, 19]. Главное в системных исследованиях – изучение объектов (явлений) в единстве, развитии, целостности, во временно́й взаимосвязи при относительности знаний об этих объектах (явлениях).

Традиционные методы решения сложных задач ориентированы на непосредственное изучение объектов с учетом их специфики. При этом полагают, что исследуемый объект можно выделить, ограничить от окружающей среды, т.е. его можно изучать изолированно. Для этих методов характерно стремление к разложению исследуемого сложного объекта на отдельные составляющие и объяснение свойств целого из свойств, его составляющих. В отличие от этого системные исследования базируются на рассмотрении изучаемого объекта во взаимосвязи с окружающими его объектами. Системные исследования исходят в общем случае из того, что целое и его составляющие имеют разные качества (свойства) и что целое поэтому обладает особыми свойствами при синтезе их составляющих.

Системные исследования в настоящее время – это широко распространенная научная методология, наиболее продуктивная для исследования сложных и очень сложных объектов, которые представляют собой целенаправленно развивающиеся высокоорганизованные множества сложной структуры. Средствами реализации системных исследований во многих случаях стали численные математические методы и модели, расчеты по которым производятся с использованием ЭВМ.

Среди системных исследований особое место занимает описание строения системных объектов. Эти исследования опираются на ряд понятий, среди которых в первую очередь следует отметить понятие системы.

Пока еще не выработано общее определение системы, а поэтому приведем основные положения, которые наиболее часто высказывают советские философы. Системой называют совокупность любым способом выделенных реальных или воображаемых элементов. Эта совокупность является системой, если: а) заданы связи, существующие между этими элементами; б) каждый из элементов внутри системы считается неделимым; в) с окружающей средой система воздействует как целое; г) при изменении во времени совокупность будет считаться одной системой, если между ее элементами в разные моменты времени можно провести однозначное соответствие.

Как видно, система рассматривается как целостное множество взаимосвязанных неделимых элементов. Однако такое деление системного объекта на части носит условный характер и изменяется в зависимости от принимаемого уровня систем. Это значит, что при системных исследованиях рассматриваемого объекта любое системное представление о нем носит относительный характер. Любой элемент при определенных условиях может рассматриваться как система.

Наличие связей между составляющими системы означает, что изменение одной части системы вызывает изменение другой. Связи между частями относятся к категории внутренних связей. Кроме внутренних связей, имеют место внешние связи, с помощью которых осуществляется взаимодействие между системой и окружающей средой. Для системы характерна бо́льшая сила внутренних связей относительно силы внешних связей. Именно наличие сильных внутренних связей между элементами обусловливает появление у совокупности элементов новых качеств, отражающих интегральные

свойства системы. Указанные свойства отличают систему от простого конгломерата и выделяют ее из окружающей среды в виде целостного объекта.

Одной из основных операций системных исследований является определение границ системы. Эта операция в принципе является качественной и базируется на изучении связей между структурными составляющими и их свойствами. Ошибки в определении границы системы могут быть двух видов: объединение в систему тех элементов, которые не имеют между собой связей, и разделение на структурные составляющие объектов, которые нельзя разделить, так как при этом нарушается их целостность.

Цель, вытекающая из постановки проблемы, дает ориентир для отбора того, что должно войти в систему и что образует окружающую среду. В систему включают конечное число элементов, которое необходимо для функционирования системы и обеспечивает достижение системой поставленной цели. Исходя из этого, можно представить границу между созданной системой и окружающей средой.

Принципиальное значение имеют понятия замкнутых и открытых систем. Ни одна система не является абсолютно замкнутой. Взаимодействие системы со средой представляется внешними связями. На входе система получает воздействие от среды, а выход системы воздействует на среду. Следует отметить, что технические системы не просто находятся в окружении, они существуют благодаря окружению, и успех проектирования объектов (искусственных систем) определяется их совместимостью с окружающей средой.

Всякая система допускает разделение ее на подсистемы. Объекты, принадлежащие к одной подсистеме, можно рассматривать как составляющие окружения другой подсистемы. Поведение подсистемы необязательно во всем подобно поведению всей системы. Разделение системы на подсистемы приводит к иерархичности структуры.

В свою очередь, подсистемы включают элементы, не подвергающиеся дальнейшему разделению. Число подсистем в системе, как и число элементов в подсистеме, может быть различным и зависит от сложности систем и подсистем, а также от постановки задачи.

В зависимости от постановки и цели решаемой задачи один и тот же объект, рассматриваемый как система, в другой иерархической системе может быть рассмотрен как подсистема, а в третьей – как элемент. В общем случае можно считать, что любая часть технической системы может изменять свое положение в иерархическом построении системного объекта.

Границы структурных составляющих определяются сложностью системы, задачами исследования, а также взаимодействием с окружающей средой. При этом под окружающей средой понимают совокупность естественных и искусственных систем, по отношению к которым рассматриваемая система не является функциональной.

Весьма важен вопрос о взаимоотношении человека и средств вычислительной техники, поскольку современные автоматизированные системы включают человека в управляющую часть системы, а очень часто и в ее управляемую часть. Сочетание способностей человека и возможностей вычислительной техники существенно повышает эффективность системы. Одна из важнейших проблем построения человеко-машинной автоматизи-

рованной системы – оптимальное распределение функций между человеком и техническими средствами.

В системных исследованиях введены понятия простой, сложной и большой системы [9]. Простой называют систему по уровню ее элементарных компонентов (элементов), которые могут быть точно количественно соизмерены. При этом свойства простой системы достаточно полно характеризуются на основе свойств элементов, образующих систему. Под сложной понимают систему, в которой ее составляющие компоненты (элементы) сами являются системами (подсистемами) со всей характерной сущностью системы (в первую очередь определяемой понятием целостности). Или, иначе, сложная система сложна уже на элементном уровне. Большими обычно называют сложные, иерархически построенные (многоуровневые) человеко-машинные системы, в которых пространственный (географический) фактор имеет существенное значение; в то же время для большой системы характерно, что она обладает столь сложной структурой, что ее нельзя в целом одновременно точно количественно охарактеризовать, а органы, ею управляющие, располагают лишь неполной (неоднозначной) информацией о системе. Рассматриваемые в данной монографии системы централизованного теплоснабжения следует относить к большим системам, а входящие в СЦТ в качестве элементов энергетические установки и тепловые сети – к сложным системам.

Одним из центральных вопросов методологии системных исследований является процесс количественной оценки альтернатив, поэтому важно выбрать соответствующий критерий, выраженный в терминах цели системы. Назначение критерия состоит в том, чтобы установить предпочтительный вариант выполнения объекта при решении многовариантных задач в процессе разработки и проектирования.

При решении массовых оптимизационных задач на нижних ступенях иерархии в энергетике, к которым относятся задачи исследования систем централизованного теплоснабжения, их подсистем и элементов, в качестве основного критерия можно принимать минимум приведенных затрат, т.е. затрат, соизмеряющих с учетом фактора времени единовременные (капиталовложения) и ежегодные расходы. Вместе с тем наряду с критерием минимума приведенных затрат следует применять и другие, в том числе, неэкономические, критерии выбора оптимального решения. К ним нужно отнести: наибольшее приближение к объективным тенденциям научно-технического прогресса, обеспечивающим рост общественной производительности труда, прямой рост производительности труда, экономию материальных затрат, экологические ограничения и др. Причем чем выше иерархический уровень исследуемого объекта, тем большее значение приобретают дополнительные критерии.

Кратко резюмируя изложенное, можно наметить следующую последовательность решения сложных задач.

1. Постановка задачи: установление цели; выявление условий и ограничений при решении и достижении поставленной цели; установление границы исследуемой системы и критерия эффективности состояния системы и ее структурных составляющих; выявление взаимосвязей и их оценка.

2. Анализ решаемой задачи: установление границ структурных составляющих и существенных связей между структурными составляющими;

уточнение данных, описывающих состояние структурных составляющих; проверка возможности использования установленных критериев; разработка схемы решения задачи; установление возможных вариантов решения задачи, подлежащих сравнению для выбора оптимального.

3. Решение поставленной задачи: разработка плана решения задачи; установление количественной оценки связей между структурными составляющими; оценка частичных и полных решений; принятие решения, подлежащего реализации.

Вместе с тем следует оговорить, что в настоящее время метод системных исследований еще не вполне оформился теоретически и недостаточно оснастился конструктивным аппаратом исследования. В связи с этим системные исследования нельзя рассматривать как совокупность строго установленных правил, применение которых позволит автоматически получать решения сложнейших проблем. Тем не менее образующие его в значительной мере эвристические процедуры существенно облегчают решение таких проблем.

Применительно к энергетике системные исследования охватывают три направления: а) теоретическое, нацеленное на изучение природы исследуемых систем: исследование свойств систем энергетики и особенностей их проявления, анализ формирования и силы проявления основных объективных тенденций развития систем; б) методическое, включающее: создание и совершенствование методов исследования систем, в том числе при неполной информации; формирование более совершенных математических моделей систем и процедур принятия решений; создание и совершенствование методов и средств сбора, обработки, передачи и изучения информации; в) прикладное, направленное на использование системных исследований в решении основных проблем энергетики: разработка концепции оптимального управления в энергетике и создание научных основ автоматизированных систем управления, в том числе плановыми расчетами и проектированием систем; решение основных межотраслевых комплексных проблем энергетики, например проблемы научно-технического прогресса в энергетике; долгосрочное прогнозирование энергетики; разработка концепций развития основных функциональных больших систем энергетики; оптимизация схем и параметров сложных энергетических установок.

Рассмотрению указанных трех направлений системных исследований в энергетике применительно к системам централизованного теплоснабжения посвящено содержание всех последующих глав монографии.

2.2. Основные свойства СЦТ и ИТ

Важным аспектом системных исследований является изучение свойств систем. В последние годы этой проблеме уделяется большое внимание [9, 20]. Такое изучение позволяет найти характерные обобщенные свойства поведения и структуры систем данного типа. Знание этих свойств позволяет более правильно сформулировать задачу комплексной оптимизации СЦТ и ИТ, наилучшим образом создавать методы и средства ее решения и находить наиболее обоснованное решение.

Как известно, свойство – это то, что обусловливает отличие или сходство данного объекта (системы) с другими объектами (системами). Поэтому

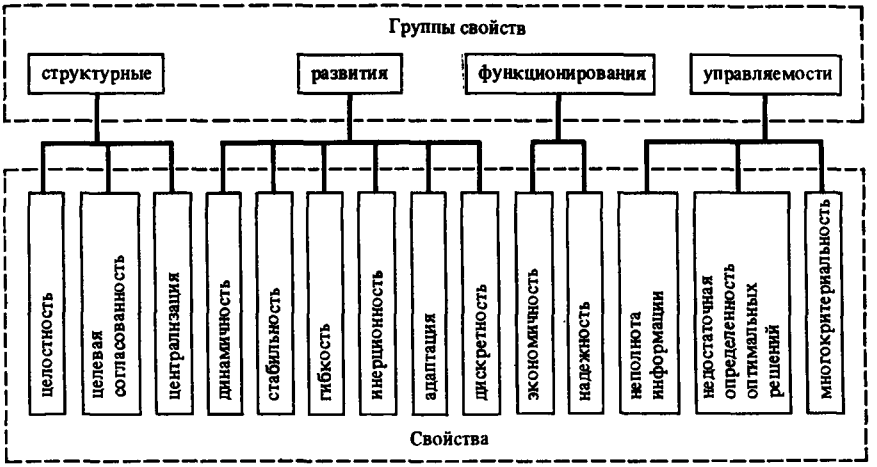


Рис. 2.1. Основные свойства систем теплоснабжения

свойство присуще данному объекту, а следовательно, оно объективно. В то же время каждый объект может обладать множеством свойств. Научный системный анализ должен из такого множества свойств объекта выделить ограниченное число наиболее существенных с целью их содержательного изучения. Последнее следует подчеркнуть особо, так как изучение свойств реальных объектов (систем) нужно именно для того, чтобы с их помощью познать процессы, происходящие в объектах (системах), и воздействовать на них в нужных направлениях. Но существенность свойств объектов (систем) конкретного вида во многом зависит от аспекта изучения объекта. Применительно к системным энергетическим исследованиям главный аспект изучения систем — это изучение условий их оптимального функционирования. Под этим понимается изучение причинных связей развития систем энергетики и выявление тех их структур и свойств, которые при данных ограничениях обеспечат наиболее эффективную реализацию задач, поставленных на рассматриваемый период времени народным хозяйством перед энергетикой [9].

Другой аспект изучаемых свойств заключается в том, что они могут характеризовать как реальную (энергетическую) сущность систем, так и их управляемость в смысле организации управления, информационных связей, средств управления и т.д. Поскольку в больших человеко-машинных системах управляемые и управляющие части не имеют четких граней, подобный сложный характер свойств систем энергетики нужно учитывать.

При изучении какого-либо свойства систем энергетики необходимо дать содержательную интерпретацию свойства применительно к условиям и особенностям решаемой задачи. Важно установить количественные измерители силы проявления свойства; однако это не всегда удается сделать и в некоторых случаях могут применяться и чисто качественные оценки. Не менее важно выявить параметры, через которые можно влиять на силу проявления свойств и оценить требуемую силу проявления свойства в исследуемой системе. Все это должно найти отражение при математическом моделировании исследуемой системы (выбор вида модели и ее содержа-

ния), а в конечном итоге – в формировании принципов и правил создания, развития и функционирования систем энергетики.

В настоящее время можно назвать достаточно много свойств, которые в той или иной мере важны для понимания систем энергетики. Состав свойств в определенной мере зависит от уровня и места рассматриваемой системы в иерархии систем энергетики. Применительно к СЦТ и ИТ можно выделить 4 группы наиболее важных свойств (рис. 2.1). Рассмотрим их.

Группа структурных свойств системы. Под структурой системы понимается ее строение, т.е. единство основных связей и входящих в нее элементов (подсистем). Структурные свойства раскрывают сущность иерархичности систем, т.е. соподчиненности систем разных уровней. Для качественной оценки и сравнения вариантов иерархии больших и сложных технических систем используют 3 основных иерархических свойства – целостность, целевую согласованность и централизацию.

Свойство целостности системы выражается в наличии у системы таких свойств, которые не присущи составляющим ее подсистемам (элементам). Это свойство характеризует силу внутренних взаимосвязей в иерархии систем по сравнению с внешними связями. В свойстве целостности проявляется сущность системного подхода: несовпадение целого и частных, входящих в это целое, т.е. частные не суммируются, а синтезируются в целом с новым качеством (свойствами). В практических исследованиях учет свойства целостности важен при выработке принципов построения системы математических моделей и управления системой.

Свойство целевой согласованности отражает степень совпадения целей (интересов) систем на разных уровнях иерархии. Естественно, что свойство целевой согласованности тем сильнее, чем однороднее состав критериев, по которым разрабатываются и проектируются системы на разных уровнях иерархии. Конечной целью оптимизационных расчетов, выполняемых при разработке и проектировании СЦТ, является достижение оптимальных пропорций в распределении капиталовложений между отдельными элементами системы, а также установление оптимального соотношения между затратами на топливо и капиталовложениями в систему. Для таких задач в наибольшей степени оправданно принятие в качестве критерия эффективности минимума приведенных затрат, соизмеряющих капиталовложения и ежегодные расходы с учетом фактора времени. Другие возможные цели оптимального проектирования СЦТ и входящих в них ИТ на отдельных уровнях иерархии следует рассматривать как подчиненные и учитывать при формировании основного критерия эффективности или в системе ограничений на решение задачи.

Свойство централизации характеризует силу воздействия верхних уровней иерархии на решение задач, осуществляемое нижестоящими системами. Это свойство оказывает влияние на многие свойства иерархии системы: структуру системы, силу проявления вертикальных и горизонтальных связей и т.д. Чем выше уровень централизации, тем проще структура системы. Это прогрессивная сторона централизации. Вместе с тем при высоком уровне централизации системы даже небольшие изменения в функционировании подсистемы верхнего иерархического уровня могут существенно сказаться на функционировании подсистем более низкого иерархического уровня. Очевидно, что для каждой системы есть свой

уровень централизации, нахождение таких уровней — главная задача изучения их иерархической структуры.

Группа свойств, характеризующих развитие системы. В нее включены шесть основных свойств: динамичность, структурная и экономическая стабильность, гибкость, инерционность, адаптация и дискретность.

Свойство д и н а м и ч н о с т и отражает взаимное влияние состояний системы в разные моменты (интервалы) времени (настоящего состояния — на будущее и наоборот). Свойство динамичности проявляется в движении системы, характеризуя изменения во времени ее параметров и процессов. По силе проявления этого свойства задачи оптимизации систем делятся на динамические и условно-статические. Динамическими называют задачи оптимизации непрерывно развивающихся систем за совокупность временных периодов, т.е. с учетом влияния предыдущих состояний системы на последующие и наоборот (см. гл. 8). Задача оптимизации параметров и структуры системы теплоснабжения — задача динамическая. Условно-статическими называются задачи, в которых ищется решение по созданию систем к заданному сроку, после чего основные их характеристики остаются неизменными. К этому типу задач относятся задачи оптимизации параметров и вида технологической схемы источников теплоты и их оборудования. Вместе с тем при оценке экономического эффекта от ввода и использования оптимизируемой энергоустановки за многолетний период ее эксплуатации необходимо учитывать возможные изменения условий работы энергоустановки.

Со свойством динамичности развития систем тесно связаны свойства с т а б и л ь н о с т и; они ослабляют проявление динамичности систем. Свойство структурной стабильности отражает способность системы в своем развитии сохранять постоянным (или меняющимся в нешироких пределах) свое строение, т.е. большую часть основных элементов и связей. Применительно к проблеме поиска оптимальных решений ИТ структурная стабильность проявляется как способность оптимальных проектных решений по энергоустановке реагировать на значительные изменения исходных данных относительно небольшим изменением технологической схемы установки. Под экономической стабильностью понимается такое свойство системы, при котором достаточно существенные изменения в ее структуре, составе элементов или (и) значении параметров характеризуются значительно меньшими изменениями суммарных денежных затрат. Это свойство системы позволяет, например, понять причины незначительного колебания денежных затрат по вариантам СЦТ, существенно различающимся своими техническими характеристиками. Свойство экономической стабильности систем важно для изучения силы проявления свойства неопределенности оптимальных решений о параметрах и структуре СЦТ и ИТ, для оценки степени подробности построения математических моделей, для определения требуемой точности оптимизационных расчетов и т.д.

Свойство г и б к о с т и развития системы отражает ее способность с необходимой быстротой изменять свою структуру для обеспечения нормального развития, а также функционирования при возможных возмущениях. Это свойство особенно важно в условиях неполноты информации, используемой при принятии решения. Практически всегда может быть ряд направлений развития системы, определяемых заранее точно неизвестными

условиями, влияющими на это развитие. Реализация при проектировании развития СЦТ свойства гибкости системы означает выбор такого направления ее развития, которое в наибольшей мере будет отвечать возможностям ее оптимального развития в заранее недостаточно определенно известных условиях. При таком широком понимании свойство гибкости тесно взаимосвязано со свойством централизации и включает в себя в определенной мере свойства инерционности (как ограничивающее свойство гибкости), адаптации и надежности.

Свойство *инерционности* можно определить как свойство системы противостоять внешним и внутренним воздействиям, имеющим целью изменить ранее намеченное движение системы. Инерционность движения в основном зависит от инерционности как отдельных ее элементов, так и органов управления, а также от уровня стабильности системы. Количественно инерционность системы может измеряться периодом времени, который должен пройти от момента, когда стала известна необходимость изменить сложившиеся направления развития системы, до того, когда это новое направление развития может быть реализовано. В то же время характеристикой инерционности развития системы может служить размер затрат, направляемых на ее преодоление.

Свойство *адаптации* в общем случае характеризуется как процесс накопления и использования информации, направленный на достижение некоторого, обычно оптимального состояния системы при наличии начальной неопределенности ее состояния и изменяющихся внешних условий. Применительно к проблеме развития энергетики свойство адаптации можно понимать как способность системы приспосабливать свое развитие к появлению новых внешних и внутренних возмущающих событий (новых условий развития). Соответственно понятие адаптации связано с появлением некоторых новых элементов и связей системы, необходимых для успешного ее развития в быстроизменяющихся, преимущественно внешних условиях, и со временем, требуемым для такой перестройки ее структуры. Из сказанного вытекает понятие "затрат на адаптацию" в смысле тех денежных затрат, которые необходимо дополнительно произвести для того, чтобы обеспечить относительно наиболее надежное развитие системы при возможных изменениях в условиях такого развития.

Динамический характер задач оптимального развития систем теплоснабжения и условно-статический – задач оптимального проектирования источников теплоты предопределили специфику использования свойства адаптации при решении этих групп задач и необходимость применения существенно различающихся методов (см. разд. 10.2 и 10.3).

Свойство *дискретиости* определяется скачкообразностью ввода новых связей и элементов системы. Это свойство для систем теплоснабжения весьма существенно из-за сооружения отдельных достаточно крупных теплогенерирующих установок и теплопроводов, а также применения стандартной (дискретной) шкалы типоразмеров оборудования и трубопроводов. Для элементов СЦТ характерно дискретное изменение свойств используемого материала при переходе от одного его вида к другому и дискретное изменение значений ряда параметров. Как известно, учет фактора дискретности принадлежит к числу особо трудных в оптимизационных задачах.

Группа свойств, характеризующих функционирование системы. В эту группу свойств отнесены два комплексных свойства: экономичность и надежность.

Экономичность — это свойство системы осуществлять свои функции с минимумом затрат овеществленного (капиталовложения) и живого (ежегодные расходы) труда при ряде заданных ограничений, среди которых основные — по надежности развития и функционирования, по качеству поставляемой энергии, по виду используемых энергетических ресурсов, по требованиям экологии и др. Свойство экономичности отнесено с определенной условностью к функционированию, а не к развитию систем, потому что именно в функционировании — в эксплуатации — проявляется действительная экономичность системы, которая только в этот период отдает народному хозяйству свою реальную продукцию. Это очень важное свойство системы. На повышение экономичности СЦТ за счет снижения капитальных вложений и сокращения текущих затрат направлены основные усилия разработчиков обрудования и проектировщиков систем теплоснабжения в целом.

Надежность — свойство объекта сохранять способность выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования. Для систем теплоснабжения в числе этих функций особое место занимает бесперебойное обеспечение потребителей тепловой энергией требуемого качества. Надежность — сложное свойство, включающее, в свою очередь, применительно к системам теплоснабжения и их элементам такие свойства, как безотказность, безопасность, долговечность, живучесть, ремонтопригодность или сочетание этих свойств системы. Рациональный уровень надежности технических систем должен иметь экономическое обоснование, при котором рассматриваются все способы повышения надежности системы.

Учитывая динамический характер систем теплоснабжения, необходимо обеспечить требуемую надежность системы не только на условно конечном этапе ее развития, но и на всех промежуточных этапах развития при неполном наборе функционирующих источников тепловой энергии и теплопроводов. Соответственно понятие надежности используется расширенно; оно охватывает как процесс эксплуатации, так и процесс развития системы теплоснабжения. Применительно к эксплуатации условия надежности находятся для заданной структуры системы; надежность развития предполагает нахождение такой структуры системы, которая обеспечит ее надежное развитие и функционирование. Видимо, в общем случае под надежностью развития можно понимать способность системы иметь такую структуру, которая (при заданных ограничениях) может в пределах влияния ряда негативных возмущений (изменяющихся условий) обеспечить требуемую надежность развития и функционирования системы с необходимой экономичностью (подробнее см. гл. 9).

В целом такие системные понятия, как гибкость структуры, надежность развития, затраты на адаптацию, тесно взаимосвязаны. С известной долей упрощения схематически связь этих понятий следующая: гибкость структуры характеризует способность системы своевременно, т.е. с необходимой быстротой, обеспечивать ее экономичное развитие при возникновении определенных (позитивных, негативных) возмущений (в пределах заданных

их ограничений). Надежность развития – понятие относительно более узкое: оно характеризует возможность нормального (в том числе относительно экономичного) развития, а поэтому и функционирования системы при появлении негативных возмущений (опять-таки в заданных ограничениях). Затраты на адаптацию характеризуют те дополнительные затраты, которые необходимы для нормального функционирования системы при появлении непредвиденных (не предусмотренных планом) возмущений, которые можно локализовать проведением относительно небольших корректирующих мероприятий [9].

Группа свойств, характеризующих управляемость системы. В эту группу включены три свойства: неполнота информации, недостаточная определенность оптимальных решений, многокритериальность.

Свойство неполноты информации отражает невозможность получения исходных данных, необходимых для однозначного определения прошлого, текущего или будущего состояния системы. Это обусловлено тем, что наряду с детерминированной значительная часть информации является недостаточно определенной. Обычно свойства информации не включаются в свойства систем. Однако особенности информации существенно определяют свойства системы как объекта управления и изучения.

Неполнота информации есть результат постоянного изменения условий, в которых происходит развитие систем энергетики, а также недостаточности наших знаний о появлении этих условий и в целом о будущем состоянии систем. В общем случае недостаточная определенность знаний о будущем состоянии систем энергетики является следствием сложности их внутренней структуры и наличия совокупности многих факторов, особенно внешних, переменно во времени влияющих на их развитие. Вместе с тем очень часто неполнота используемой информации есть результат несовершенства методов сбора, обработки и подготовки информации при различных формах ее представления. Совершенствование этих методов – важнейшая задача.

Свойство недостаточной определенности оптимальных решений формулируется как невозможность определения одного (единственного) варианта решения о создании, развитии и функционировании системы, который был бы наилучшим с точки зрения цели (критерия) управления. Это свойство в значительной мере обусловлено неполнотой информации об условиях создания, развития и функционирования систем энергетики. Обоснованный учет этого свойства потребовал разработки методов принятия решения при неполной информации, которые включают как формализованные приемы, так и активное участие человека. Применением лишь формализованных методов невозможно получить оптимальное решение для подавляющего большинства сложных задач развития систем энергетики. Рассматриваемое свойство тесно связано со структурными свойствами и свойствами развития систем (см. гл. 10).

Свойство многокритериальности определяется наличием нескольких критериев для оценки эффективности создания, функционирования и развития системы. Второй аспект многокритериальности – несовпадение критериев управления подсистемами на разных уровнях иерархии. Наиболее сложна иерархия целей, решений и критериев в системе народного хозяйства страны. Системы энергетики, в том числе теплоснаб-

жения, относятся к тому иерархическому уровню народного хозяйства, при котором считаются принятыми основные его пропорции, а главная цель заключается в наиболее эффективном их достижении. Однако опыт убедительно показывает, что для систем энергетики затруднительно сформулировать единый критерий как мерило истинности для всего многообразия принимаемых в энергетике решений, направленных на достижение указанной цели.

В качестве главного экономического критерия при исследовании систем теплоснабжения в настоящее время принимается денежное выражение приведенных во времени совокупных общественно необходимых затрат живого и овеществленного труда. При неполной информации о развитии систем теплоснабжения их оптимизация с помощью экономических критериев во многих случаях может дать не однозначное решение, а лишь некоторую зону равноэкономичных решений. Тогда логично вводить ряд других критериев, в том числе количественно непосредственно несоизмеримых с экономическим.

При решении ряда сложных задач развития систем наряду с экономическими одновременно должны реализовываться столь же важные другие цели, например обеспечения гибкости развития, социальные, экологические и др. Тогда наряду с экономическими появляются и другие критерии соизмеримой важности.

Приведенную в данном разделе классификацию основных свойств СЦТ и их состав следует рассматривать лишь в качестве одного из возможных предложений. Многие из названных свойств применительно к СЦТ еще недостаточно изучены. В зависимости от результатов их изучения могут быть внесены необходимые коррективы.

2.3. Централизованное теплоснабжение как объект системных исследований

Энергетика охватывает сложную совокупность процессов преобразования и передачи энергии от источников получения природных энергетических ресурсов до приемников энергии включительно. Она представляет собой сложный развивающийся объект, исследования которого возможны только на основе системного подхода. Ныне энергетику принято рассматривать как Единую государственную общеэнергетическую систему. Эта система как иерархически наивысшая в энергетике объединяет сложнейшую совокупность процессов, охватывающих основные элементы и связи энергетического хозяйства страны. Обоснованное определение основных оптимальных пропорций и направлений развития энергетики страны и ее районов возможно только в рамках Единой общеэнергетической системы.

Однако Единая общеэнергетическая система столь велика, что исследователь не может охватить все ее элементы и связи, а поэтому и их одновременно охарактеризовать. Любое описание Единой общеэнергетической системы неизбежно является укрупненным. В этих условиях продуктивным является членение целого — Единой общеэнергетической системы — на квазинезависимые подсистемы. Отдельные подсистемы являются более обозримыми, и в них можно существенно подробнее рассмотреть ряд элементов и связей. К числу таких подсистем относятся и СЦТ.

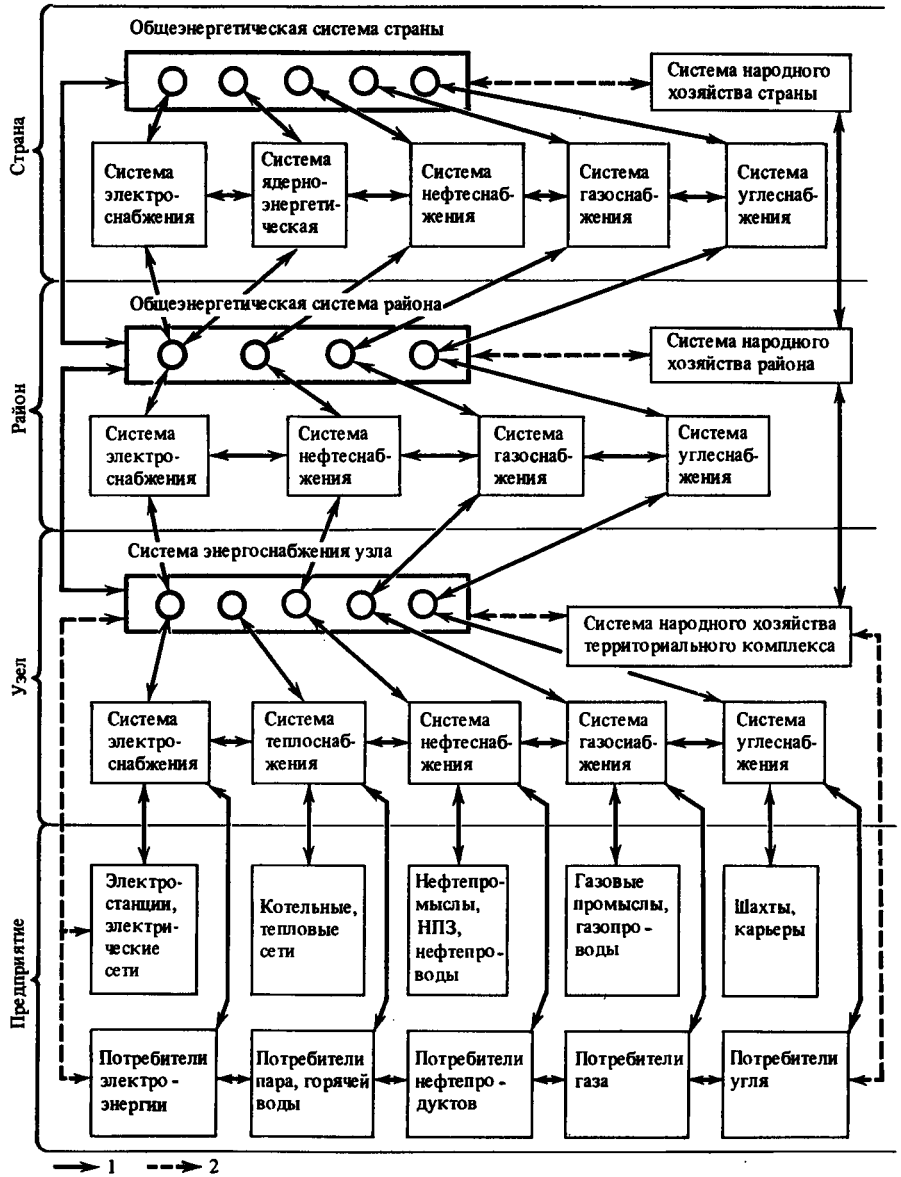


Рис. 2.2. Принципиальная схема иерархической структуры систем в энергетике
***1* – вертикальные связи; *2* – горизонтальные связи**

В основе формирования иерархической структуры систем энергетики находятся производственный и территориальный признаки. В едином энергетическом хозяйстве страны наряду с отраслевыми вертикальными связями, применительно к которым в настоящее время строится хозяйственное управление, существуют и сильные территориальные (горизонтальные) связи. Шесть главных систем энергетики (межотраслевая – общеэнергетическая и входящие в нее функциональные – электроэнергетическая, ядерно-энергетическая, нефте-, газо- и углеснабжения) подразделяются территориально по основным уровням (страна – районы – узлы энергоснабжения – предприятия), создавая единую совокупность иерархически построенных, расположенных на равных и разных иерархических уровнях, но относительно автономно функционирующих систем (рис. 2.2).

Каждая из указанных систем страны (кроме ядерно-энергетической) образует соответствующие районные подсистемы. Виды продукции, производимой функциональными системами, широко взаимозаменяемы и тесно переплетаются в отдельных районах и энергетических узлах в зависимости от условий производства, транспорта энергоносителей и расположения потребителей. Поэтому совокупность районных функциональных систем создает автономные районные общеэнергетические системы горизонтального типа. Но любой энергетический район состоит из отдельных узлов энергоснабжения. Ими могут быть: промышленный центр, относительно крупный город, развитый сельскохозяйственный район. Совокупность энергетических установок и транспортно-энергетических связей этих узлов и центров энергоснабжения также образует специфические локальные системы энергоснабжения, конечными элементами которых в данном случае приняты отдельные потребители энергии [9].

Под системами теплоснабжения на рис. 2.2 понимаются как системы, обеспечивающие питание потребителей паром и горячей водой от электростанций, так и системы, получающие теплоту от котельных, а также системы, включающие в виде источников теплоты и электростанции, и котельные. Если системы теплоснабжения, имеющие в своем составе только котельные, не имеют вертикальных связей с районной электроэнергетической системой, то они непосредственно входят в систему энергоснабжения данного города, промышленного центра. Системы электроснабжения и теплоснабжения часто могут быть связаны непосредственно через ТЭЦ.

В рассмотренной иерархической схеме в качестве ее конечных элементов выступают предприятия – производители энергетической продукции и предприятия – потребители энергетической продукции. В свою очередь, каждое предприятие – производитель энергетической продукции – является сложной системой, которая включает большое количество единиц разнотипного энергетического оборудования, объединенных физико-техническими связями. Каждую такую сложную систему целесообразно представить в виде ряда иерархически соподчиненных систем. Применительно к источникам теплоснабжения обычно выделяют четыре иерархических структурных уровня: энергетическая установка в целом, энергетические агрегаты, группы элементов оборудования и сооружений, элементы оборудования и сооружений (рис. 2.3).

Конечные элементы иерархической структуры ИТ – элементы оборудования и сооружений – можно подвергнуть дальнейшей детализации с целью



Рис. 2.3. Уровни технологической иерархии источников теплоты

Сплошные линии – исходная информация; штриховые – искомая информация; штрихпунктирные линии – обменная информация

изучения отдельных явлений, процессов, конструкций. Эти исследования производятся на следующей нижестоящей ступени иерархии, т.е. на уровне физико-технических систем частей элементов. На этом уровне проблемы развития систем теплоснабжения и источников теплоты переходят в проблемы механики, теплофизики, ядерной физики, металловедения и других смежных дисциплин. Для иерархического представления ИТ также характерно наличие сильных связей между объектами, находящимися на разных иерархических уровнях.

Решение задач оптимизации СЦТ и ИТ предполагает выделение СЦТ и ИТ из более общих систем энергетики (см. рис. 2.2). На этом этапе должны быть четко очерчены границы исследуемого объекта в более общей совокупности систем энергетического комплекса страны с целью рассмотрения СЦТ и (или) ИТ как самостоятельных объектов изучения и оптимизации. При таком выделении должны быть учтены все связи исследуемых

СЦТ и ИТ с внешними системами как в производственном, так и в территориальном разрезах. Самостоятельное изучение и оптимизация СЦТ и ИТ предполагают организацию обмена информацией с внешними более общими и смежными системами. По отношению к этим системам СЦТ и ИТ выступают в двойном качестве — как потребители продукции указанных систем и как поставщики тепловой энергии. Этому соответствуют две категории внешних связей СЦТ и ИТ, одни из которых можно назвать прямыми, а другие обратными.

К числу основных прямых внешних связей, определяющих условия оптимизации СЦТ и ИТ, относятся технологические и экономические связи с системами народного хозяйства страны, района и территориального комплекса; системами энергетического комплекса страны и района, системой энергоснабжения узла; системой машиностроения страны и с другими локальными системами, характеризующими район сооружения (развития) и функционирования СЦТ и ИТ. Связи с системой энергетического комплекса страны, района и узла, в свою очередь, можно подразделить на связи с системами электроснабжения, связи с системами топливоснабжения, связь с системой ядерной энергетики.

Связи с системами народного хозяйства страны, района и узла весьма многочисленны и разнообразны; ими определяются масштабы применения тепловой энергии высокого, среднего и низкого потенциала; концентрация тепловых нагрузок; фонды материальных и трудовых ресурсов, которые государство может выделить на развитие систем теплоснабжения, и т.д. Решения по развитию общеэнергетических систем страны, района и узла обусловливают выбор долгосрочной стратегии использования различных видов органического и ядерного горючего, доли комбинированной и раздельной выработки тепловой энергии, масштабы применения разных источников теплоты. Связи с системами электроснабжения определяют объемы вводов ТЭЦ, требования к единичной мощности ТЭЦ и основных ее агрегатов, режимы использования ТЭЦ по выработке электроэнергии. Связь с системой ядерной энергетики существенно влияет на основные решения по нейтронно-физическим характеристикам атомных ИТ. Очень важна связь с энергомашиностроением, отражающая технологические возможности и ограничения по производству основного оборудования, по ассортименту конструкций оборудования, их массам и габаритам, по стоимостным показателям производства серийного оборудования.

Получаемая в результате решения задач оптимизации СЦТ и ИТ информация, кроме прямого назначения — установления оптимальных параметров и характеристик СЦТ и ИТ, выступает также в качестве обратной внешней информации. Обратная внешняя информационная связь включает следующие характеристики и показатели оптимизированных СЦТ и ИТ:

оптимальные технико-экономические показатели СЦТ и ИТ в зависимости от условий их создания (развития) и функционирования: удельные капитальные вложения, расход органического и ядериого горючего, удельные приведенные затраты, состав ИТ, маневренность и надежность СЦТ и ИТ и др. Эти показатели используются при технико-экономических исследованиях электроэнергетических систем, систем ядериой энергетики и общеэнергетических систем на разных уровнях;

технологические, массовые и конструктивные характеристики оборудо-

вания оптимальных ИТ и тепловой сети СЦТ, в том числе оказавшиеся на предельно допустимых значениях по условиям изготовления, транспортировки, монтажа и т.п. По этим характеристикам могут формироваться новые требования к производственной базе энергомашиностроительных и других предприятий;

различные характеристики выбросов, производственных отходов, тепловыделений и других факторов влияния ИТ и тепловой сети СЦТ на окружающую среду, подлежащие учету при планировании развития народного хозяйства территориальных комплексов.

В обобщенном виде прямые и обратные внешние информационные связи показаны на рис. 2.2 и 2.3.

Для построения иерархии задач оптимизации СЦТ и ИТ в дополнение к технологическому и территориальным аспектам, использованным при формировании систем в энергетике, необходимо применить классификацию задач во времени. По составу решаемых задач различаются следующие этапы планирования энергетического комплекса: текущее (годовое), среднесрочное (пятилетнее), долгосрочное (10–15 лет). Кроме того, силами научно-исследовательских организаций выполняются прогнозы направлений развития энергетики страны на 20–30 лет вперед. Задачи этих этапов решаются параллельно и на каждом цикле планирования взаимно увязываются для обеспечения непрерывности развития энергетики. Рассматриваемые в книге задачи охватывают три последних этапа.

На этапе среднесрочного планирования основная цель оптимизации энергетического хозяйства – определение рациональных темпов развития топливно-энергетических отраслей, выявление состава, очередности и сроков строительства новых и реконструкции действующих энергетических объектов. При этом учитываются реальные возможности народного хозяйства в обеспечении энергетики капиталовложениями, материальными и трудовыми ресурсами.

Основная цель этапа долгосрочного планирования – определение рационального размещения, мощности, сроков строительства и режимов функционирования новых крупных энергетических объектов, формирующих технический уровень энергетики. Именно на этом этапе намечаются коренные структурные сдвиги в развитии энергетики.

Главные цели этапа долгосрочного прогнозирования – выявление ведущих направлений научно-технического прогресса систем энергетики; выбор наилучших пропорций получения и переработки отдельных энергетических ресурсов, их распределения по районам страны и по категориям потребителей; оценка основных взаимных требований развития энергетического хозяйства и смежных отраслей промышленности и транспорта, а также народного хозяйства в целом; обоснование ведущих направлений развития энергетической науки с определением ее главных задач.

Естественно, что для каждого из указанных временны́х этапов характерна своя степень детализации решаемых задач. Так, на этапе долгосрочного прогнозирования объектом исследования выступает только общеэнергетическая система страны. На этапах долгосрочного и среднесрочного планирования задачи оптимизации существенно детализируются в территориальном разрезе. При этом рассматривается как уровень страны, так и уровни района, узла энергоснабжения и предприятия.

Применительно к предприятиям — производителям энергетической продукции также имеется определенная временна́я последовательность этапов выполнения проектно-конструкторских работ: технико-экономическое обоснование, технический проект, рабочие чертежи. При проектировании агрегатов различают разработку технического задания, технического проекта, рабочего проекта. Весьма часто указанным этапам проектирования ИТ и его основных агрегатов предшествует этап предпроектных проработок — стадия научного поиска. Для каждого из указанных этапов задачи оптимизации ИТ и агре́гатов также целесообразно различать по глубине и детальности проработки вопросов [20].

Совместное рассмотрение трехмерной иерархии задач оптимизации СЦТ и ИТ (иерархии по технологическому, территориальному принципам и по принципу этапности проектирования и планирования) позволяет выявить общую характеристику состава получаемых при их решении основных результатов (табл. 2.1).

Инструментом для решения задач технико-экономической оптимизации параметров и характеристик развивающихся систем теплоснабжения, тепловых сетей и источников теплоты в столь сложной, но реальной постановке является математическое моделирование. Многообразие задач, которые необходимо решать при выборе структуры генерирующих мощностей СЦТ, конфигурации тепловой сети, параметров и профиля оборудования ИТ, а также при определении роли и места СЦТ и ИТ в системах электроснабжения, ядерной энергетики, топливоснабжения и в общеэнергетических системах, обусловливает целесообразность применения не единой математической модели, а взаимосвязанной иерархической системы моделей.

Наиболее общие модели — линейные динамические модели общеэнергетических систем страны, района и системы энергоснабжения узла — характеризуются укрупненным, недетализированным описанием СЦТ и ИТ, но учитывают их связи с другими отраслями и комплексами народного хозяйства. Модели состоят из ряда взаимосвязанных блоков: основных функциональных систем энергетики — электроснабжения, теплоснабжения, ядерно-энергетической, нефтеснабжения, газоснабжения, углеснабжения; внешних связей со смежными отраслями народного хозяйства. Основная задача таких моделей — по заданным критериям оптимизации и ряду народнохозяйственных ограничений найти наилучшие пропорции в использовании различных видов энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь, ядерное горючее) как в целом по стране, так и по основным районам страны, а в их пределах по узлам энергоснабжения [21].

Важным результатом решения задачи оптимизации общеэнергетической системы страны являются значения замыкающих затрат на топливо, электрическую и тепловую энергию, дифференцированных по отдельным районам страны. Выявленная достаточная устойчивость этих показателей позволяет их использовать для условно независимой оптимизации систем относительно низкого иерархического уровня — узлов энергоснабжения, систем теплоснабжения города или промышленного центра, тепловых сетей, источников теплоты и их оборудования.

Из математических моделей отдельных функциональных систем для решения рассматриваемой проблемы необходимы модели системы электро-

Таблица 2.1. **Состав основных решений о развитии СЦТ и ИТ**

Технологический уровень	Территориальный уровень	Заблаговременность, лет	Решение
1. Общеэнергетическая система	Страна	20–30	1.1. Потребность в высоко-, средне- и низкотемпературной тепловой энергии 1.2. Уровни развития централизованного теплоснабжения на органическом и ядерном горючем 1.3. Типы установок, производящих высокотемпературную теплоту, пар и горячую воду 1.4. Требования к энергомашиностроению по созданию новых типов ИТ 1.5. Направления научных исследований по СЦТ и ИТ
2. Общеэнергетическая система	Страна, район, узел	5–15	2.1. Уточнение решений пп. 1.1–1.5 2.2. Детализация решений пп. 1.1–1.3 применительно к районам и узлам энергоснабжения 2.3. Суммарные мощности ОТЭЦ, АТЭЦ, РК, АСТ и АСПТ
3. Система электроснабжения	Страна, район, узел	5–15	3.1. Мощность, очередность и сроки строительства ОТЭЦ и АТЭЦ 3.2. Режим использования ОТЭЦ и АТЭЦ 3.3. Создание новых типов комбинированных источников тепловой и электрической энергии
4. Системы нефте-, газо- и углеснабжения	Страна, район, узел	5–15	4.1. Топливоснабжение источников централизованного теплоснабжения
5. Система ядерной энергетики	Страна	10–30	5.1. Тип ядерного реактора и вид топливного цикла
6. Система теплоснабжения	Узел энергоснабжения	5–15	6.1. Мощность, тип, очередность и сроки строительства ИТ 6.2. Структура и режим работы тепловой сети 6.3. Режим работы ИТ 6.4. Создание новых типов ИТ
7. Источник теплоты	Предприятие	5–15	7.1. Вид технологической схемы, конструкции оборудования, значения параметров и характеристик 7.2. Требования к машиностроению по созданию ИТ
8. Агрегат	Предприятие	3–10	8.1. Тип и конструкция основных элементов 8.2. Требования к машиностроению по созданию основных элементов агрегатов

снабжения страны, района, узла и модель системы ядериой энергетики страны.

Математические модели системы электроснабжения предназначены для исследования вопросов перспективного развития электроэнергетики страны, района, узла. Они позволяют определить оптимальный вариант размещения, последовательности сооружения и развития электростанций, а также режима их использования за расчетный период. Модели строятся по блочной схеме. Каждый блок модели соответствует определенному временно́му этапу развития электроэнергетических систем. В модели могут рассматриваться как отдельные электростанции, так и их группы, сформированные по какому-либо признаку. В частности, в качестве такой группы могут выступать ТЭЦ.

Математическая модель развития ядерной энергетики страны позволяет найти оптимальную структуру атомных станций по типам реакторов. При этом определяются объемы производства оборудования для разных типов атомных станций, а также объемы производства по обогащению ядерного топлива, изготовлению ТВЭЛов и химической переработке отработавшего горючего, объемы добычи природного урана и ряд других показателей, характеризующих развитие ядерной энергетики. Модель представлена в виде задачи линейного программирования.

Созданные математические модели и решаемые с их помощью задачи оптимизации соответствующих объектов еще не являются системой моделей или системой оптимизационных задач. Для превращения их в таковые нужно осуществить взаимоувязку решений, получаемых на каждом уровне приведенной иерархии систем, задач и моделей. Этой цели служит система информационных взаимосвязей, также организованная по иерархическому принципу.

Следует особо подчеркнуть, что любая иерархия задач оптимизации приобретает конструктивный вид и реальную полезность только при условии, что подготовлена необходимая для их решения исходная информация и выявлен состав обменной информации, обеспечивающей взаимную увязку оптимальных решений. Иначе, рассмотренной иерархии задач оптимизации СЦТ и ИТ должна соответствовать иерархия информационных потоков.

Всю информацию, которой необходимо оперировать в процессе решения рассматриваемой совокупности задач, можно подразделить на исходную, искомую и обменную. В процессе переработки информации (решения систем задач) получаемая на промежуточных стадиях (решение отдельных задач) информация может одновременно играть роль искомой – для данной стадии решения и исходной – для последующих стадий. Потоки информации, полученной на промежуточных стадиях решения системы задач и обеспечивающей взаимоувязку решений всех задач системы, формируют совокупность обменной информации. Эта информация направлена как от более общих задач к находящимся на более низких иерархических уровнях задачам, так и от нижестоящих задач к задачам верхних уровней. Пример организации названных потоков информации показан на рис. 2.3.

Такая иерархическая структура обменной информации в сочетании с использованием известных методов решения задач в иерархических системах [9, 20, 21] позволяет привести в соответствие локальные и глобальные оптимумы.

Глава третья

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

3.1. Общие подходы к построению математических моделей

При разработке, проектировании и создании (развитии) сложных объектов, к которым относятся все системы энергетики на уровне страны, района и узла, а также входящие в них предприятия, необходимы знания о количественных и качественных закономерностях, свойственных рассматриваемым объектам. Осуществить практическую проверку тех или иных закономерностей, закладываемых в проекты, очень часто по ряду соображений не представляется возможным. Так, реализация всех разрабатываемых в настоящее время типов ИТ и их модификаций с целью практической проверки потребовала бы исключительно больших материальных затрат и значительного времени. Еще более сложна и практически неосуществима реализация возможных вариантов создания и развития систем теплоснабжения на уровне узла энергоснабжения, не говоря уже о системах энергетики на уровнях района и страны. В связи с этим приобретает все большее значение изучение свойств и закономерностей рассматриваемых больших и сложных систем на базе метода математического моделирования.

Математическая модель — это система математических соотношений, описывающих с той или иной точностью определенные характеристики реальной системы. В наиболее общем случае модель включает количественные и логические взаимосвязи и соотношения между основными параметрами рассматриваемой системы, технологическими и материальными характеристиками ее элементов, характеристиками внешних технологических и экономических связей, системой ограничений и соответствующим критерием эффективности. Форма и структура представления системы зависят от природы происходящих в ней процессов и внешних факторов, от характера количественных взаимосвязей между параметрами и характеристиками, а также от того, какие стороны процесса и факторы выдвигаются на первый план применительно к конкретной цели, средствам и методам исследования.

Математические модели могут быть полными, неполными (частичными) относительно моделируемого объекта или отражать его отдельные свойства — функциональные модели. Применительно к рассматриваемым системам энергетики математические модели являются неполными и в значительной мере функциональными в том смысле, что они не могут полностью отразить все свойства, элементы и связи изучаемых больших и сложных систем. Происходит это потому, что в своем развитии они слишком сложны для описания, не могут быть точно и одновременно количественно охарактеризованы, а также включают (и в управляемую, и в управляющую части) во многом не формализуемые действия трудовых коллективов.

В связи с этим становится все более очевидным, что эффективная система разработки и проектирования сложных энергетических объектов должна быть человеко-машинной при оптимальном сочетании формализо-

ванных и неформализованных методов. При этом за человеком на всех иерархических уровнях остается решающая активная роль, выражающаяся как в формулировке целей и постановке задач, так и в оценке возможных решений и выборе среди них окончательного решения. Математические модели, являясь современным научным инструментом, позволяют: а) осуществлять быструю многовариантную переработку значительных массивов информации; б) находить из большого числа возможных решений относительно ограниченное количество наилучших решений; в) быстро определять наиболее целесообразные корректирующие воздействия на развитие системы, необходимые в процессе реализации оптимальных решений, а также выполнять ряд других важных функций.

Моделирование систем энергетики и входящих в них энергетических предприятий состоит из ряда взаимосвязанных этапов: постановка задачи моделирования, составление математического описания, алгоритмизация математического описания, проверка адекватности модели (рис. 3.1). Каждый из этапов достаточно сложен и трудоемок. Выполнение отдельных этапов может осуществляться различными группами специалистов, но должно обязательно подчиняться единой цели, поставленной при формировании общей задачи.

Как указывалось ранее, та или иная совокупность математически выраженных соотношений может считаться математической моделью системы только при условии, что эти соотношения отражают основные связи и свойства системы. Выполнение этого условия требует глубоких знаний моделируемой системы и умения формализовать эти знания, программируя их на том или ином математическом языке. В настоящее время такая формализация в значительной мере является еще научным творчеством разработчиков моделей.

Далее, математическая модель может отвечать своему назначению, если она не только достаточно точно описывает свойства и связи данной системы энергетики, но и доступна по своей сложности для реализации на серийных ЭВМ. Это требует глубокого знания особенностей и областей применения различных методов математического программирования и вычислительных возможностей ЭВМ. Часто поэтому необходимо уметь квалифицированно упрощать модель без особого ущерба для точности результата, чтобы свести ее к решаемой задаче математического программирования.

Таким образом, разработка математических моделей систем энергетики и входящих в них крупных предприятий (ОТЭЦ, АТЭЦ, АСТ) представляет собой сложный творческий процесс, требующий совместных усилий высококвалифицированных энергетиков и математиков. В ходе этого процесса постоянно углубляются наши познания свойств систем и их основных связей, а это, в свою очередь, позволяет применять более совершенные математические модели [9].

Проверка адекватности реальной моделируемой системы и ее математической модели очень трудна и в теоретическом и в практическом плане. Можно лишь утверждать, что математическая модель рассматриваемой системы энергетики всегда есть только приближенное отражение реальной системы. Кроме указанной выше невозможности (по определению) иметь полное во всех отношениях соответствие объекта и его

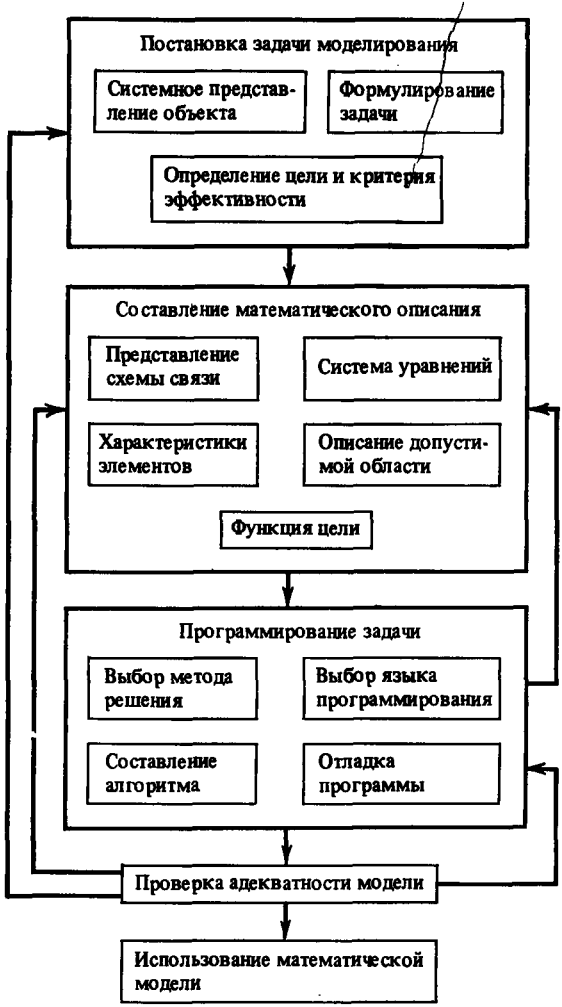


Рис. 3.1. Этапы математического моделирования

модели, причиной этого является отсутствие полномасштабной экспериментальной проверки точности многих математических моделей, особенно развивающихся больших систем энергетики. Поэтому в настоящее время оценка уровня тождественности реальной системы энергетики и математической модели — это предмет интуитивной оценки специалистов. Некоторые общие подходы включают: оценку осмысленности результатов работы модели, проверку преобразований информации от входа к выходу по всем блокам модели, проверку логики управления вычислительным процессом, сопоставление чувствительности реальной системы и модели к изменению некоторых параметров и факторов, если для реальной системы имеется такая информация, и др. Если результаты проверки неудовлетворительны, то необходимо уточнить постановку задачи исследования, усовершенствовать модель, проверить программу.

В настоящее время стала очевидной необходимость перехода от создания математических моделей, разрабатываемых для решения отдельных задач оптимизации, к системе математических моделей, отражающих в целом процесс оптимизации в реальных, иерархически построенных системах энергетики. Наиболее продуктивным направлением создания математических моделей систем энергетики является использование принципа декомпозиции. Его сущность заключается в разделении по слабым (или по сильным, но малочисленным) связям иерархии реальных систем на подсистемы, а следовательно, и задач оптимизации этих систем на отдельные подзадачи. Применительно к таким подзадачам строятся соответствующие математические модели.

Для увязки решений в иерархически построенных системах математических моделей и задач создан ряд методов, например: 1) метод корректирующего импульса развития нижестоящих иерархических систем для приведения в соответствие их локальных оптимумов глобальному оптимуму вышестоящей системы; 2) итеративный метод решения в ниже- и вышестоящих системах для приведения в соответствие локальных и глобальных оптимумов; 3) метод иерархической увязки последовательности уточнения решений путем использования комплекса разнотипных моделей.

Очевидно, что система моделей, построенная для исследования систем энергетики, будет содержать модели различных типов. Очень условно все многообразие типов математических моделей, применяемых для исследования систем энергетики, может быть разделено следующим образом:

по цели и характеру использования — на оптимизационные, расчетные, игровые, имитационные;

по учету фактора времени — на статические и динамические;

по характеру зависимостей — на линейные и нелинейные;

по степени определенности информации — на детерминированные и вероятностные (стохастические).

Рассмотрим особенности и области применения этих моделей [9]. Оптимизационные модели широко применяются на этапах прогнозирования, планирования, проектирования и функционирования систем энергетики. Оптимизация обычно формулируется как нахождение решения, в наибольшей мере отвечающего достижению поставленной цели и удовлетворению внешним условиям. Особенность оптимизационных моделей заключается в том, что сама модель выбирает из большого числа возможных оптимальное решение при заданных исходных данных и ограничениях. Расчетные (оценочные) модели являются модификацией оптимизационных моделей и отличаются от них целью расчета. В расчетной модели исследуется какой-то один из основных вариантов оптимизационной задачи, для которого решение находится в виде оценки данного варианта (естественно, с оптимизацией входящих в данный вариант промежуточных параметров). В силу ограниченности решаемой задачи расчетные модели удается сделать более подробными, чем оптимизационные. Игровые модели предназначены для решения задач в некоторых специфических неопределенных ситуациях, характеризуемых противоречивыми интересами сторон, часто выступающими как конфликтные. Они широко используются для принятия решений в условиях капиталистическо-

го общества. Применимость использования игрового подхода для нашего общества не доказана. Имитационные модели имитируют ("проигрывают") протекание изучаемого процесса развития или функционирования данной системы. Таким образом, имитационные модели — это способ моделирования ситуаций. Их исходная идея очень перспективна, она заключается в синтезе (объединении) формализуемых и неформализуемых методов мышления и анализа.

В энергетике практически все большие системы характеризуются сильными временными (динамическими) связями, а введенные в эксплуатацию энергетические установки и их агрегаты можно считать не изменяющимися (статическими) или мало изменяющимися во времени. Для учета динамики используются динамические и квазидинамические модели. Динамические модели позволяют рассмотреть процесс или систему в движении, когда учитывается как влияние предыдущего состояния системы на последующее, так и обратное влияние последующих решений о развитии системы на предыдущие. Под квазидинамическими понимаются модели, учитывающие лишь влияние предыдущего состояния на последующее. В ряде задач применение таких квазидинамических моделей существенно упрощает вычислительную процедуру. Несмотря на статический характер математических моделей энергетических установок (неизменность значений оптимизируемых параметров и характеристик), они должны охватывать весь жизненный цикл установки: разработка — создание головного образца — испытания головного образца — освоение серийных установок — период нормальной эксплуатации — вывод из эксплуатации.

Реальные системы энергетики нелинейны. Однако только для некоторых относительно простых типов нелинейных моделей существующие методы обеспечивают быструю сходимость и решение можно получить с требуемой точностью. В общем случае использование нелинейных моделей сопряжено со значительными (иногда непреодолимыми) трудностями. Поэтому, несмотря на вносимый ущерб содержательному смыслу, очень широко идут на использование линейных моделей, для которых имеются хорошо разработанные методы построения и которые гарантируют получение точного (в вычислительном плане) решения. В энергетике имеются достаточно четко очерченные области применения линейных и нелинейных моделей. Область применения линейных моделей — предварительная глобальная оптимизация систем энергетики верхних иерархических уровней на достаточно длительную перспективу, имеющая целью нахождение зоны равноэкономичных решений. Задачи оптимизации локальных систем нижних уровней иерархии и на близкие периоды времени решаются с использованием преимущественно нелинейных моделей.

Большая часть информации, используемой при исследовании систем энергетики, не является детерминированной. И тем не менее исторически сложилось так, что в настоящее время наиболее широко используются детерминированные математические модели. Они исходят из допущения о строгой определенности (однозначности) всей используемой в модели исходной информации, а следовательно, и о строгой определенности получаемых решений. Однако предпосылка об однозначности используе-

мой информации неправомерна. Поэтому круг задач, для решения которых правомерно (допустимо) применение детерминированных моделей, не широк. Многие из разработанных в последние годы методов и приемов оптимизации систем энергетики в условиях неполноты исходной информации базируются на использовании результатов расчета, полученных для ряда совокупностей детерминированно заданных исходных данных (см. гл. 10). Тем самым определилась вторая область применения детерминированных математических моделей. Вероятностные (стохастические) модели используются для решения задач, в которых есть вероятностное описание процессов. Математический аппарат вероятностного программирования теоретически достаточно разработан. Однако достоверность вероятностных описаний часто может быть поставлена под сомнение, поскольку случайные процессы в системах энергетики, как правило, не стационарны. На это нужно обращать особое внимание на этапе постановки задачи.

При создании совокупности математических моделей, предназначенных для оптимизации систем энергетики, важно определить предпочтительность применяемых математических моделей. К отдельным математическим моделям следует предъявлять такие основные требования: 1) достаточная идентичность свойств математической модели и свойств реальной системы; 2) соизмеримость точности результатов и возможной точности используемой информации; 3) приемлемая скорость решения задачи; 4) широта практического приложения; 5) простота, удобство пользования.

Накопленный опыт использования математических моделей систем энергетики показывает, что на верхних уровнях производственной иерархии целесообразно использовать достаточно упрощенные линейные квазидинамические модели. Глобальный характер моделей требует (для обеспечения работоспособности) существенного укрупнения используемой информации. Здесь важно не осложнять модель системы учетом тех факторов, без которых можно обойтись для решения главной задачи модели. Для систем нижних уровней иерархии и предприятий при построении моделей необходимо учитывать динамику развития, нелинейность зависимостей, дискретность и целочисленность изменения многих параметров. Для решения задач надежности систем энергетики в математической модели должно найти отражение сочетание динамики и стохастики. Примеры построения математических моделей разных видов приведены в гл. 4–9.

3.2. Методы агрегирования, эквивалентирования, декомпозиции и ранжирования факторов

Большая сложность реальных систем энергетики предопределяет значительные трудности при разработке их математических моделей. Опыт построения математических моделей показывает, что учет всего многообразия элементов и связей системы в рамках одной математической модели нецелесообразен по следующим обстоятельствам [9, 20]: во-первых, математическая формализация реально существующих связей и элементов системы привела бы к задаче математического программирования

слишком высокой размерности; во-вторых, практически нереально было бы интерпретировать и анализировать полученные решения.

Кроме того, разработчику математических моделей сложных объектов следует учитывать результаты теоретических исследований в области анализа эффективности алгоритмов [22]. Напомним осиовные понятия этой теории. Для любого вычислительного процесса, реализованного на ЭВМ, существенны два фактора: длительность работы алгоритма и объем использованной памяти. При фиксированной схеме кодирования исходных данных любой задачи объем использованной памяти может быть оценен в битах; например, запись последовательности из m чисел x_i потребует n битов:

$$n = \max_i (\log_2 x_i) m. \qquad (3.1)$$

Длительность работы программы является функцией от этой величины n. Если в процессе вычислений, решающих поставленную задачу, происходит не более чем k обращений к исходным данным (независимо от величины n), то верхняя оценка длительности работы программы пропорциональна n^k. С другой стороны, возможна ситуация, когда для всех известных алгоритмов, решающих поставленную задачу, число обращений к исходным данным экспоненциально зависит от числа n, например 2^n. Такие алгоритмы следует теоретически признать малоэффективными, так как при достаточно больших n длительность их работы будет астрономически велика.

Основным практическим выводом является необходимость учитывать при постановке математической задачи тот факт, что для широкого класса интересных с точки зрения практики задач длительность работы программы может экспоненциально зависеть от объема использованной информации.

В этой ситуации весьма плодотворны методы, основанные на сокращении объемов входной информации математических моделей реальных систем и процессов. Уменьшение входной информации о моделируемом объекте или системе объектов достигается методами, известными под названиями агрегирование, эквивалентирование, декомпозиция и ранжирование факторов. В настоящее время эти методы не формализованы до такой степени, чтобы можно было указать конкретные рецепты, приводящие к решению задачи, и требуют активного участия человека, моделирующего наблюдаемую систему. Несмотря на эвристичность этих методов, необходимость их применения не вызывает сомнений.

На примере системного исследования СЦТ рассмотрим особенности этих методов и возможности их применения.

Под агрегированием задачи понимается процесс перехода от большей совокупности параметров и переменных, описывающих наблюдаемую систему, к меньшей. Например, для выражения функции цели в технико-экономических расчетах и моделях используется запись:

$$З = E_н K + U, \qquad (3.2)$$

где З – приведенные затраты для рассматриваемого объекта или системы; $E_н$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K – капиталовложения; U – ежегодные расходы.

Каждую из величин K и U можно записать в виде

$$K = \sum_{i=1}^{I} K_i, \tag{3.3}$$

$$U = \sum_{j=1}^{J} U_j, \tag{3.4}$$

где I — число учитываемых компонентов капиталовложений, из которых формируются капиталовложения по объекту или системе; K_i — величина i-го компонента капиталовложений; J — число учитываемых статей ежегодных расходов; U_j — значения j-й статьи ежегодных расходов.

Переход от совокупности отдельных компонентов капиталовложений (или ежегодных затрат) к системному параметру — их сумме является простейшим примером агрегирования. Если число слагаемых в суммах (3.3) и (3.4) достаточно велико, то выделение групп отдельных слагаемых также является агрегированием. При определении капитальных затрат в ИТ принято группировать слагаемые, пропорциональные мощности ИТ, а при определении эксплуатационных расходов по ИТ — затраты, пропорциональные выработке теплоты и пропорциональные мощности установки (постоянная составляющая эксплуатационных расходов). Часто также приходится пренебрегать частью слагаемых в суммах (3.3) и (3.4), если известно, что их величина значительно меньше возможной точности модели.

С математической точки зрения агрегирование информации аналогично выбору некоторой весовой функции $\rho(x_1, \ldots, x_r; \alpha_1, \ldots, \alpha_s)$ на пространстве состояний системы $(x_1, \ldots, x_r)$ в зависимости от численных значений внешних параметров $(\alpha_1, \ldots, \alpha_s)$ и усреднению величин x_i с выбранным весом

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^{r} \rho(x_1, \ldots, x_r; \alpha_1, \ldots, \alpha_s) x_i, \tag{3.5}$$

здесь $\bar{X}$ — системная переменная, описывающая изучаемый объект; $\rho(x_1, \ldots, x_r; \alpha_1, \ldots, \alpha_s)$ — выбранная весовая функция; x_i — значения исходных наблюдаемых переменных.

В простейших ситуациях (например, (3.3) и (3.4)) весовая функция постоянна на всех состояниях и равна единице.

Агрегирование является весьма сильным средством сокращения объема исходной информации, так как позволяет исследователю не только соизмерять значимость отдельных факторов, но и пренебрегать частью наблюдаемых факторов. В связи с этим весьма важно, как отмечается в работе [9], сохранить присущие объекту или системе объектов качественные особенности, не утратив их в процессе агрегирования.

Для традиционных разделов физики соответствие между моделью и действительностью весьма точно. При системных исследованиях сложных и больших технических систем, таких, как ИТ и СЦТ, соответствие между моделью и реально существующей системой менее точно. Анализируя с помощью математики количественные соотношения в наблюдаемой системе, исследователь создает рабочую модель реального объекта. При этом модель, или математический аналог реальности, с одной сто-

роны, должна иметь много общего с реальным объектом, а с другой стороны, позволять сделать практически полезные вычисления и предсказания.

С этой точки зрения возможности агрегирования информации, как указано в работе [20], тесно связаны с ожидаемой точностью модели и возможностью различать с помощью модели интересные для исследователя состояния системы. С математической точки зрения вопрос о точности имеет смысл только при условии существования двух моделей: исходной модели A, по определению принимаемой за адекватную изучаемой системе, и модели B, отличающейся совокупностью переменных и совокупностью функций, описывающих связи и ограничения в системе. Обычно считается, что более подробная, полная модель лучше соответствует реальному объекту. Однако с помощью такой модели затруднено проведение практических расчетов для содержательных, реальных задач. Процессы агрегирования исходной информации и постановка задачи тесно связаны между собой, а первоначальная "точная" модель часто просто отсутствует, поэтому вопросы адекватности модели реальной системе решаются специалистами в данной области – группой экспертов.

Другим тесно связанным с агрегированием методом сокращения исходной информации является эквивалентирование. Термин "эквивалентирование", появившийся в связи с возможностью упрощения расчета последовательных и параллельных электрических схем, широко используется в литературе по энергетике.

Математически строго он обоснован только для линейных моделей, например для электрических сетей постоянного тока (модель процесса составляет совокупность уравнений I и II законов Кирхгофа). Формальное обоснование этого метода на нелинейные задачи представляет собой весьма трудную математическую задачу, не решенную до сих пор.

Часто считают, что эквивалентирование является процессом сокращения исходной информации более широким, чем агрегирование, понимая под эквивалентированием [20]: 1) уменьшение числа учитываемых факторов и оптимизируемых переменных, а также упрощение системы ограничений и выражения функции цели – при решении задач оптимизации; 2) уменьшение числа степеней свободы (размерности) в системе уравнений, описывающих исследуемые процессы.

Однако между понятиями "агрегирование" и "эквивалентирование" есть незначительное отличие, которое имеет смысл сохранить из методических соображений. Основой любой математической модели являются: пространство состояний процесса или системы, характеризуемое числом степеней свободы системы (размерностью), и совокупность функций, описывающих исследуемые процессы (система уравнений или ограничения, описания связей и функция цели в оптимизационной задаче). Можно связать термин "агрегирование", как было сделано в (3.2), с изменением числа степеней свободы (пространства состояний), а термин "эквивалентирование" с изменением (упрощением, аппроксимацией) функций, входящих в математическую модель. Однако следует иметь в виду, что оба процесса, агрегирование и эквивалентирование, обычно идут параллельно [20].

Применительно к системным исследованиям СЦТ эквивалентирование применяется, например, при оптимизации тепловых сетей. Тепло-

вая сеть крупного города или промышленного центра может содержать тысячи, десятки тысяч отдельных участков, имеющих разные условия прокладки, гидравлические сопротивления и другие характеристики. При гидравлическом расчете такой сети (или оптимизации диаметров ее участков) зачастую не удается рассчитать систему в целом; в таких случаях отдельные совокупности участков сети заменяются меньшим (часто одним) количеством участков, т.е. модель тепловой сети агрегируется и эквивалентируется. Особенно важно эквивалентирование при использовании метода избыточной схемы [11], так как до начала расчета требуется задать всю возможную совокупность трасс тепловых сетей.

Более сложным примером эквивалентирования, понимаемого в широком смысле, является упрощение математического описания тепловой сети. Например, при оптимизации СЦТ можно использовать как метод избыточной схемы, так и сетевую модель (в рамках специальных методов линейного программирования) [17, 23]. Так как допустимая размерность линейных сетевых задач значительно превышает возможности решения нелинейных сетевых моделей, многие процессы стараются исследовать вначале с помощью линейной аппроксимации.

При использовании агрегирования и эквивалентирования в математическом моделировании энергетического объекта или системы следует иметь в виду, что относительная погрешность исходных данных существенно зависит от уровня эквивалентирования (или агрегирования). Обычно относительная погрешность исходных данных уменьшается с увеличением уровня эквивалентирования. При уменьшении уровня эквивалентирования, т.е. большей детализации модели, относительная погрешность исходных данных увеличивается. Таким образом, стремлению более детально описать изучаемую систему противостоит увеличение погрешности используемой при этом исходной информации. Например, капитальные вложения в пиковые котельные (ПК) малой мощности могут быть существенно различными в зависимости от вида топлива и местных условий. Если заменить всю совокупность ПК данной СЦТ одной эквивалентной установкой, то относительная погрешность определения капитальных затрат в нее уменьшится. Поэтому в моделях СЦТ [17, 24] мелкие ИТ рассматриваются в совокупности, а крупные по отдельности с детализацией по элементам основного оборудования ИТ.

Третьим методом сокращения исходной информации является декомпозиция. Под декомпозицией понимается процесс расчленения задачи (исходной информации) на ряд подзадач (информационных комплексов) с последующим независимым решением подзадач (преобразованием информации) и взаимная увязка полученных решений с помощью координирующей задачи.

Известно, что при декомпозиции существенна степень связности моделируемой системы [20] и относительная сила проявления связей системы. Формально декомпозиционные методы можно математически обосновать только для слабо взаимодействующих подсистем. Поэтому эти методы часто применяются в тех ситуациях, когда интуитивно ясна слабость отдельных связей. Например, при оптимизации СЦТ естественной декомпозицией является расчленение задачи на две подзадачи: оптимизация собственно ИТ и оптимизация тепловых сетей (рис. 3.2). Основа-

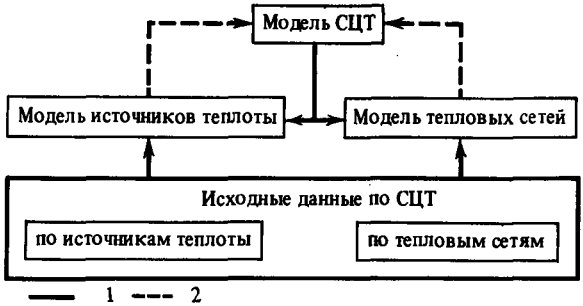


Рис. 3.2. Схема взаимодействия модели СЦТ и ее частей при решении полной задачи оптимизации СЦТ

1 **– прямые связи;** *2* **– обратные связи**

нием подобного расчленения задачи является тот факт, что для расчета потокораспределения в сети неважно, какими техническими средствами (типами ИТ) создается поток теплоносителя. Важны только виды теплоносителя и массовые расходы теплоносителя в выделенных узлах сети. Таким образом, при заданной конфигурации сети возможна декомпозиция исходной задачи [17].

Второй случай возможности применения метода декомпозиции – ситуация, в которой связи между отдельными подсистемами сильны, но декомпозиция по сильным связям приводит к уменьшению числа параметров, характеризующих систему в целом.

Приемы и способы декомпозиции энергетических задач весьма разнообразны. Обзор наиболее часто используемых методов декомпозиции в нелинейных задачах приводится в работе [20]. Отметим только, что для успешного применения этих методов (закрепления параметров связей между подсистемами – замораживание связей, групповой релаксации и множителей Лагранжа) необходимо учитывать наблюдаемую силу связей и число параметров, характеризующих эти связи в моделируемой системе; в случае высокой степени связности объем перерабатываемой информации по задаче в целом не будет уменьшаться.

Наряду с агрегированием, эквивалентированием и декомпозицией весьма важно применять методы обработки исходной информации, позволяющие выделить основные влияющие на систему факторы. Такая предварительная обработка информации позволяет сокращать число учитываемых факторов.

В работе [20] отмечается высокая эффективность методов, использующих теорию планирования экспериментов. Основным достоинством этих методов является возможность проведения активных экспериментов не с реальным объектом, например с СЦТ, а с математической моделью объекта. В этих экспериментах совокупность расчетов на ЭВМ позволяет получить дополнительную информацию о состояниях объекта при изменении параметров системы, внешних условий и т.д.

Основная задача ранжирования факторов заключается в определении степени влияния каждого из этих факторов на функцию цели, упорядочении этих факторов по степени влияния и выделении наиболее значи-

мых доминантных факторов [20]. Эту задачу можно записать следующим образом: из множества факторов $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_f\}$ выделить меньшую совокупность факторов $M = \{x_1, x_2, \ldots, x_l\}$, где $l < f$, элементы которой вносят наибольший вклад в заданную функцию цели $З(x_1, x_2, \ldots, x_f)$. В работах [20, 25] подробно описана процедура отбора доминантных факторов для случая общей квадратичной функции цели $З(x_1, x_2, \ldots, x_f) = b_0 + \sum_{i=1}^{f} b_i x_i + \sum_{j,i=1}^{f} b_{ij} x_i x_j$. Основными этапами этой процедуры являются: построение матрицы планирования, предварительное выделение факторов с помощью диаграмм рассеяния (этап визуального распознавания образов), статистический анализ.

Другой возможностью для определения значимости влияющих факторов является определение так называемых коэффициентов чувствительности. Как известно, коэффициент чувствительности функции $З(x_1, x_2, \ldots, x_f)$ равен

$$\frac{\partial З}{\partial x_i} = \lim_{\Delta x_i \to 0} \frac{\Delta З}{\Delta x_i}, \tag{3.6}$$

где $\Delta З$ – изменение функции З, вызванное отклонением i-го фактора на величину Δx_i от номинального значения x_i при неизменности действия остальных факторов $x_j, i \neq j$.

В качестве величины З может рассматриваться любой выходной показатель системы или объекта; обычно в качестве З рассматривают величину приведенных затрат в систему или объект. Простота вычисления коэффициентов чувствительности приводит к широкому распространению этого метода ранжирования факторов в инженерной практике. Однако его применение требует априорного допущения о достаточной гладкости функции З, так как в практических расчетах принимается

$$\partial З / \partial x_i = \Delta З / \Delta x_i. \tag{3.7}$$

Третьей, менее известной в энергетической литературе возможностью ранжирования факторов, не требующей гладкости функции цели, является метод, применяемый в теории распознавания образов [26]. Рассмотрим основные предпосылки и этапы этого метода. В простейшей постановке предполагается, что имеются опытные данные о фактических значениях переменных проектируемой системы или объекта. Эта совокупность числовых данных является множеством "точек" в пространстве признаков (факторов) $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_f\}$ и называется в теории распознавания образов материалом обучения. При этом неважно, являются ли переменные x_i непрерывными, дискретными или булевыми (0; 1). Важно только, что эта совокупность факторов может влиять на рассматриваемый объект. Функция цели на материале обучения считается заданной и в простейшем случае принимает значения 0 и 1. Таким образом, исследователь, используя опыт эксплуатации или экспериментов, наблюдает на материале обучения относительную силу проявления действующих факторов. Требуется определить, как и в основной задаче ранжирования факторов, какие из факторов или их совокупностей оказывают существенное влияние на функцию цели, и указать эти факторы. Для

этой цели совокупность точек пространства факторов X (материал обучения) проектируется на некоторое подпространство L пространства X. Если в этом подпространстве L можно отделить с помощью гиперплоскости П множество точек со значением функции цели 1 от множества точек со значением функции цели 0, то совокупность факторов $(x_1, \ldots, x_L)$, определяющая подпространство L, является существенно влияющей.

Кроме того, построенная гиперплоскость П (линейная комбинация существенно влияющих признаков) является новым фактором, который можно использовать для построения математической модели. Построение подпространств L_i и гиперплоскостей Π_i осуществляется алгоритмически. При этом переход к большему числу факторов осуществляется только в том случае, если во всех подпространствах меньшей размерности материал обучения не позволяет разделить признаки на существенно влияющие и несущественные.

Отметим очевидные достоинства этого метода по сравнению с другими методами ранжирования факторов. Основными объектами алгоритмизации этого метода являются гиперплоскости и подпространства пространства признаков, т.е. системы линейных уравнений и неравенств, что обусловливает простоту реализации на ЭВМ. Не требуется составления модели процесса или системы на этапе анализа значимости факторов. Результатом анализа значимости факторов может явиться не только выделение заранее определенных факторов x_i (но в меньшем количестве), но и построение "новых" агрегированных факторов $\bar{X} = a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_fx_f$.

Естественно, что эффективность применения этого метода будет зависеть от качества материала обучения, а сложность расчетов — от количества исходных элементарных признаков (факторов). Однако эти трудности являются общими и для других методов ранжирования факторов.

3.3. Построение программно-вычислительных комплексов

Принципиальные преимущества метода математического моделирования обусловили широкое использование математических моделей при разработке и проектировании энергетических систем и их оборудования. В настоящее время математические модели, реализованные на ЭВМ, являются наиболее эффективным инструментом поиска оптимальных схем и параметров энергетических систем. При этом сами математические модели непрерывно развиваются и совершенствуются, расширяется область их применения. Основой для этого является изучение процесса разработки и проектирования систем, разбиение этого процесса на этапы, исследование возможностей формализации отдельных этапов и применения на каждом из этапов ЭВМ.

Обычно процесс разработки технических систем включает: конкретизацию целей и задач, решаемых технической системой во время своего функционирования; выбор концепции технической системы; генерацию множества альтернативных вариантов системы; оценку показателей эффективности системы. Этот процесс предпроектных исследований заканчивается формированием технического задания для последующего проектирования.

Процесс проектирования систем включает конкретизацию основных технических параметров и вида схемы, которые определяют облик технической системы.

Анализ процессов разработки и проектирования технических систем показывает, что наиболее ответствен и сложен в методическом отношении процесс разработки системы. Именно на этой предпроектной стадии следует искать принципиально новые технические решения, не имеющие аналогов в практике; иными словами, на этой стадии возможно появление нового качества. А современный технический прогресс включает прежде всего технические нововведения и новые технологии. Поэтому центральной и наиболее важной частью методологии системных исследований является этап синтеза концепции технической системы, на котором закладываются основные идеи и принципы, определяющие ее облик и потенциальные возможности.

На этапе разработки системы приходится решать задачи синтеза, анализа и оптимизации системы (рис. 3.3). В определенном смысле задачи анализа и оптимизации системы на этом этапе выступают в качестве подзадач более общей задачи синтеза оптимальной концепции технической системы. Из этого следует высокая степень сложности задачи синтеза оптимальной концепции технической системы в части организации программного обеспечения. Однако основные трудности, возникающие на этапе разработки сложных технических систем, вызваны другими причинами. Основные среди них следующие:

нечеткость целей, обусловленная тем, что в процессе решения постоянно появляются либо дополнительные требования (например, экологические), либо ограничения (например, по дефицитным видам топлива), либо еще какие-то факторы, не учтенные в начале разработки;

нечеткость критериев, связанная с тем, что ряд критериев (относящихся, например, к требованиям по охране окружающей среды или к учету воз-

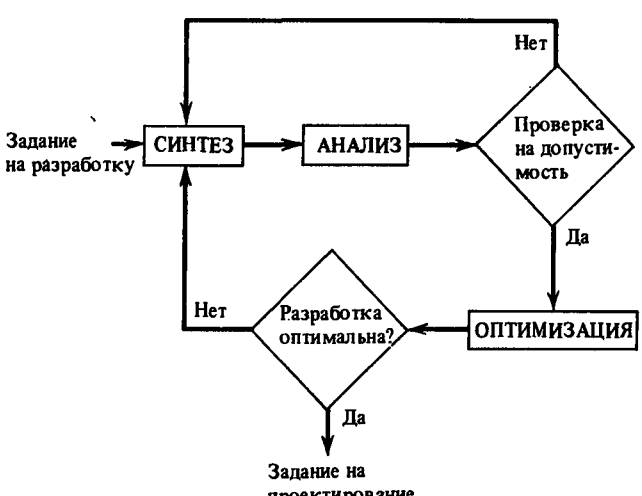


Рис. 3.3. Схема взаимосвязи синтеза, анализа и оптимизации в процессе разработки системы

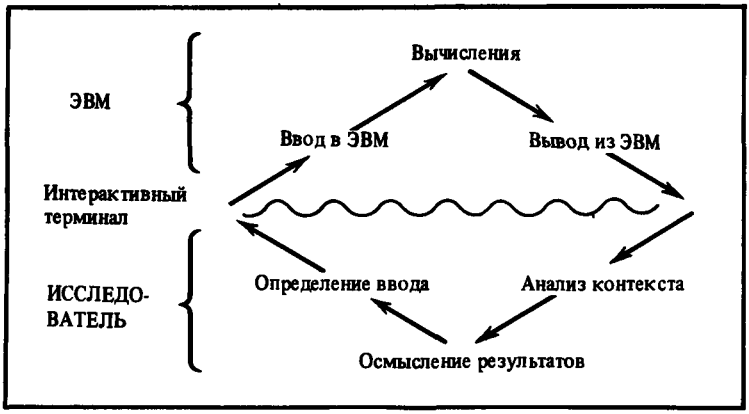


Рис. 3.4. Схема процесса общения человек–машина

можных перерывов теплоснабжения), плохо поддается формализации, что приводит к затруднениям при сравнении вариантов;

неопределенность используемой информации, неизбежная при разработках на перспективу;

большой объем перерабатываемой информации.

В целом для этапа предпроектной разработки характерно большое число неформальных и творческих операций. Это обстоятельство требует тесного взаимодействия разработчика и ЭВМ. Только человек может внести творческое содержание в процесс разработки системы, только он способен разобраться в неполной и нечеткой информации и принять правильное решение в условиях неопределенности. Для этого необходимо организовать диалог между ЭВМ и человеком, причем функции человека и ЭВМ в процессе разработки системы должны быть строго распределены (рис. 3.4). Человек, естественно, должен выполнять неформализуемые операции. В ходе решения необходимо иметь возможность оценивать промежуточные результаты моделирования и оптимизации, уточнять и варьировать исходные данные, изменять очередность рассмотрения различных процессов и т.д.

Использование отдельных математических моделей для решения проблемы разработки технических систем с учетом указанных трудностей и требований, определяемых необходимостью реализации системного подхода, малоэффективно. При таком подходе на ЭВМ возлагается выполнение только части формализуемых операций разработки системы, а остальные (анализ результатов расчета, построение нового варианта математической модели и т.д.) выполняет исследователь. Переход к созданию автоматизированных систем математических моделей технических систем обеспечил существенное повышение эффективности применения ЭВМ. Эти системы способны выполнить все основные формализуемые операции: формирование математических моделей, организацию вычислительного процесса, обработку исходной и получаемой информации, организацию обмена информацией между моделями и др.

Следующим этапом развития математического моделирования и повышения эффективности использования ЭВМ стал переход от автоматизации

использования ЭВМ к автоматизации управления разработкой технической системы. На этом этапе машинная модель (система моделей) доведена до автоматизированной системы научных исследований, реализуемой программно-вычислительным комплексом (ПВК). В ПВК устраняются слабые стороны, выявившиеся при применении автоматизированных систем математических моделей для решения задачи синтеза концепций технических систем. На этом уровне машинная модель превращается в человеко-машинную автоматизированную систему проведения эксперимента на ЭВМ.

Существуют различные определения ПВК. Состав и структура ПВК определяются требованиями к его применению. В данной работе принято, что ПВК включает систему математических моделей, базу данных и систему управления ею, набор аппаратных технических средств. Применительно к стадии проектирования технических систем ПВК перерастает в систему автоматизации проектирования (САПР).

Известен ряд подходов к построению ПВК и САПР [11, 20, 27–29]. Первый связан с разработкой универсальных ПВК, предназначенных для исследования широкого класса систем. Как правило, при таком подходе получаются очень большие и сложные комплексы, работа с которыми для пользователя затруднительна и малоэффективна. Второй подход ориентирован на создание узкоспециализированных ПВК с достаточно простыми принципами построения. Работа с такими ПВК весьма проста. Однако простота достигается за счет специализации и ограничения возможностей моделей. Всякое расширение функций таких ПВК требует разработки комплекса практически заново.

Наиболее эффективной является разработка ПВК, достаточно инвариантных к объектам исследования и направленных на создание подсистем, составляющих ядро любого прикладного ПВК. Используя базовые подсистемы, разработчики в достаточно короткий срок могут построить прикладной ПВК, предназначенный для разработки технических систем определенного класса с учетом их специфики. В этом случае программисты сосредоточивают усилия на разработке эффективных базовых средств, необходимых для любого прикладного комплекса.

Состав системы математических моделей ПВК соответствует характеру и объему решаемых в ПВК задач по разработке определенной технической системы. Программная реализация системы математических моделей базируется на модульном принципе. Здесь под модулем понимается отдельная программа или совокупность программ, которая имеет самостоятельное значение и может использоваться автономно для решения частных задач. Предусматривается иерархическая, информационная и смысловая увязка модулей друг с другом. Кроме модулей, ПВК содержит блоки. Блок – это программа для выполнения какой-либо вспомогательной процедуры (обработка информационных массивов, анализ сходимости вычислительного процесса и др.). Набор программных модулей и блоков, находящихся в ПВК, должен обеспечить возможность построения конкретных реализаций модели технической системы, необходимых по ходу выполняемого исследования. Генерация вычислительного алгоритма из программных модулей и блоков осуществляется специальной программой – монитором ПВК, которым управляет либо автоматический сборщик алгоритма,

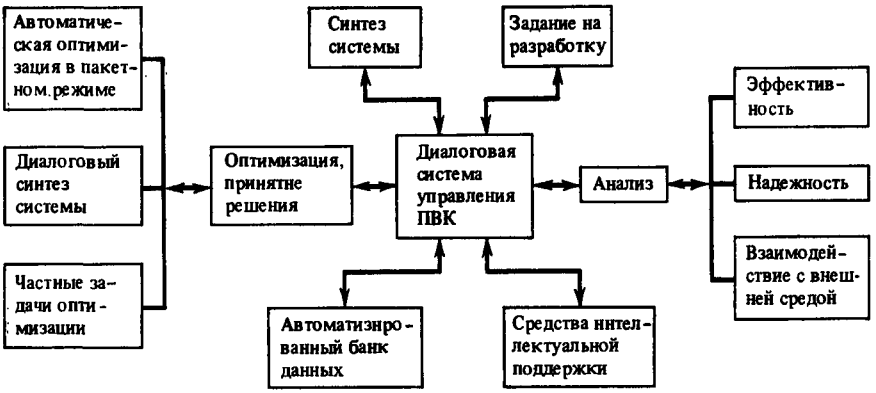


Рис. 3.5. Структура программно-информационных средств ПВК

либо непосредственно исследователь. Рассматриваемый комплекс должен быть открытым, т.е. он должен позволять достаточно просто вводить новые программные модули и блоки, выводить старые, осуществлять модернизацию модулей и т.п.

Важной составной частью ПВК является автоматизированный банк данных (АБД), состоящий из баз данных ПВК и системы управления базами данных. АБД создается как обслуживающая подсистема ПВК и предназначен для автоматизированного обеспечения необходимыми данными подсистем ПВК. Функционирование АБД обеспечивает: организацию и формирование баз данных (определение структуры данных, обеспечение защиты данных и т.д.), организацию их использования (распределение запросов во времени, восстановление баз данных при нарушении их целостности и др.), а также их реорганизацию на основе новых требований. В случае необходимости применения интерактивных методов разработки АБД должен обеспечить режим диалога. Система математических моделей ПВК и автоматизированный банк данных образуют программно-информационное обеспечение ПВК (рис. 3.5).

Всю информацию в базе данных, используемую для синтеза и анализа вариантов технической системы, в зависимости от ее изменчивости целесообразно разбить на три категории:

условно-постоянную, изменяющуюся весьма редко; к этой категории относится справочно-нормативная информация, отражающая содержание отраслевых справочников, и ретроспективная информация, составляемая по отчетным данным о состоянии систем энергетики;

прогнозная, варьирование которой является существенным элементом процесса разработки системы;

промежуточные и конечные результаты многовариантных расчетов разрабатываемой технической системы.

Выделение двух последних категорий информации создает предпосылки для реализации диалогового режима, так как при этом облегчаются вызов и варьирование исходной прогнозной информации, анализ промежуточных результатов и определение направления дальнейших исследований, выбор

окончательного решения. Следует подчеркнуть, что выходная информация, получаемая от ЭВМ, на любом этапе работы должна быть наглядной, компактной и представляться в привычных для исследователя формах и терминах.

Эффективность работы ПВК, требующей многократного осуществления взаимодействия человека (исследователя) и ЭВМ, в значительной степени зависит от того, насколько успешно происходит это взаимодействие в процессе диалога. Назначение диалога состоит в том, чтобы максимально повысить эффективность исследований или, другими словами, максимально сократить затраты времени на постановку и решение исследовательских задач. При создании диалоговой системы главное внимание должно быть уделено обеспечению удобства работы предполагаемых пользователей. Их возможности, интересы и требования должны определять основные свойства диалоговой системы.

Удобство общения пользователя и ЭВМ можно оценить тем, насколько язык обмена сообщениями соответствует требованиям пользователя и модели исследуемой системы. Средство общения – язык диалога – должно быть достаточно простым и (для сокращения количества возможных ошибок) предельно лаконичным. В настоящее время различают несколько форм символьного текстового диалога: метод "выбора меню", при котором инициатива в ведении диалога принадлежит ЭВМ, задающей вопрос и предоставляющей пользователю один (или несколько) из предложенных вариантов ответа; метод "шаблонов", когда пользователь должен просто заполнить свободные смысловые места в готовом ответе; формальный язык пользователя с естественно-языковой мнемоникой, в котором операторами языка служат слова и термины, знакомые пользователю; естественный язык с распознаванием только "ключевых" слов; полностью анализируемый подъязык естественного языка с ограниченным словарем и грамматикой, а также язык графических символов.

Метод "выбора меню" – самая простая и распространенная форма диалога, используемая во многих САПР. При использовании этого метода даже самый неподготовленный пользователь совершит очень незначительное количество ошибок. Однако данная форма организации диалога является и наименее гибкой при изменении структурной части диалога. Более совершенна и гибка форма диалога на полностью анализируемом подъязыке естественного языка, но она же и самая сложная, требующая наличия лингвистического процессора, словарей, анализаторов грамматик и т.д. В ПВК, используемых для предпроектных проработок систем достаточно подготовленным пользователем-исследователем, оправданно создание и применение гибких, хотя и более сложных, форм организации диалога.

Опыт создания и использования диалоговых систем показывает, что для каждой конкретной задачи и объекта исследования эффективную диалоговую систему можно создать только с учетом специфики исследуемого объекта и решаемой задачи. Поэтому, несмотря на бурное развитие теории диалоговых систем, такая теория, видимо, никогда не даст однозначного ответа на всю совокупность вопросов, возникающих при создании конкретной диалоговой системы. Теоретические разработки формулируют общие требования к создаваемым диалоговым системам, а также дают набор принципов и рациональных методов их построения.

Степень совершенства ПВК во многом определяется применяемыми техническими средствами. Это прежде всего сеть ЭВМ, состоящая из ЭВМ высокой производительности, на которой производится решение крупных задач имитационного моделирования и синтеза сложных систем, и мини-ЭВМ, осуществляющих обмен информацией с внешней памятью ЭВМ сети и рабочими местами разработчиков. Аппаратные средства вычислительной техники включают также устройства ввода-вывода информации, подготовки данных, общения разработчика с ЭВМ и др.

Первый опыт использования ПВК выявил новые проблемы. При создании ПВК предполагалось, что человек, общаясь с ЭВМ в процессе диалога, берет на себя наиболее сложные творческие и неформальные операции. При этом он должен выполнять их быстро и правильно благодаря своему интеллекту и профессиональным знаниям. Однако резко возросшая интенсивность умственного труда (в темпе диалога с ЭВМ), когда на обдумывание ситуации и принятие решения отводятся минуты, оказалась слишком непривычной для человека. Далее, в ходе диалога с ЭВМ человеку приходится принимать решения по самым разнообразным вопросам, которые требуют разносторонних знаний, а возможность консультации с соответствующими специалистами практически исключается. В результате решения, принимаемые разработчиком в ходе диалога с ЭВМ, могут оказаться неоптимальными или даже неверными.

Потребовалось создание интеллектуальной поддержки пользователя ПВК за счет расширения программно-информационных средств комплекса (рис. 3.5). К новым компонентам этих средств, определяющих "интеллект ПВК", относятся интеллектуальный интерфейс, интеллектуальный менеджер и набор экспертных систем. Интеллектуальный интерфейс предназначен для общения с разработчиком на естественном языке или проблемно-ориентированном его подмножестве. Интеллектуальный менеджер постоянно контролирует действия человека при работе с ПВК. Причем осуществляется синтаксический и семантический контроль запросов пользователя, проверка правильности его реакций на запросы ПВК, а также учет и классификация ошибок пользователя. В зависимости от числа и типа ошибок интеллектуальный менеджер либо настраивается на определенный уровень диалога с пользователем, либо выводит на экран дисплея соответствующие инструкции. Набор экспертных систем состоит из проблемно-ориентированных на объект разработки и проблемно-инвариантных экспертных систем, содержащих "знания" по общенаучным вопросам. Экспертная система помогает пользователю принимать решения, близкие к решениям высококвалифицированного специалиста в аналогичной ситуации. Получив от пользователя запрос о рациональных действиях в нетривиальной ситуации, экспертная система анализирует ситуацию, сформулированную в запросе, осуществляет поиск решения, имеющегося в ее базе знаний, и выдает найденное решение в форме совета.

Примеры построения ПВК приведены в гл. 4 и 6.

Глава четвертая

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СЦТ И СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ИТ

4.1. Постановка задачи

При разработке схем теплоснабжения городов или промышленных центров на перспективу 10–15 лет задача оптимизации структуры СЦТ является основной и включает выбор структуры, единичной мощности и состава основного оборудования; конфигурации и параметров транзитных и магистральных тепловых сетей; очередности ввода оборудования.

Наиболее общая постановка задачи оптимизации СЦТ предполагает рассмотрение ее как динамической, т.е. с учетом роста тепловых нагрузок по годам расчетного периода. Кроме того, для многих СЦТ, перспективы развития которых исследуются, необходим учет существующей части системы. Попытка решения такой задачи в рамках одной математической модели, которая учитывала бы сложнейший комплекс связей, реально существующих в СЦТ, привела бы к трудностям, связанным с необходимостью решения задачи исключительно большой размерности. Опыт разработки глобальных математических моделей оптимизации СЦТ в ряде организаций [6, 15, 30–33] подтверждает наличие больших трудностей при их создании, а главное, при использовании в проектной практике.

В настоящее время представляется целесообразным решать задачу оптимизации структуры СЦТ с помощью комплекса взаимосвязанных математических моделей, предназначенных для решения отдельных задач (рис. 4.1).

По способу учета тепловой нагрузки постановку задачи оптимизации структуры СЦТ можно разделить на статическую (блок I) и динамическую (блок II). При статической постановке задачи расчетная тепловая нагрузка СЦТ задается на конечный уровень развития СЦТ; при динамической – по годам расчетного периода.

Общий алгоритм поиска наилучшего решения как статической, так и динамической задачи оптимизации структуры СЦТ может быть представлен как итерационный процесс, состоящий из трех этапов: декомпозиции исходной задачи на ряд задач по числу альтернативных типов основных ИТ (блок 1), далее решения каждой задачи отдельно (блок 2) с последующим сопоставлением оптимальных решений, полученных в задачах, и выбора оптимального решения задачи оптимизации структуры СЦТ (блок 3).

Второй этап – решение отдельных задач (блок 2) – целесообразно разделить на две части: задачу оптимизации конфигурации ТС и задачу оптимизации состава оборудования ИТ и диаметров трубопроводов ТС. В результате решения первой задачи определяются оптимальные трассировки транзитной и магистральной ТС, места расположения и мощности ИТ; при этом используются укрупненные технико-экономические показатели ИТ. Результаты, полученные в первой задаче, служат исходной информацией для второй задачи, при решении которой используются технико-экономические показатели ИТ с учетом состава их оборудования, а для ТС – диаметров трубопроводов. В результате решения второй задачи определяются оптимальные составы оборудования ИТ и диаметры трубопроводов ТС.

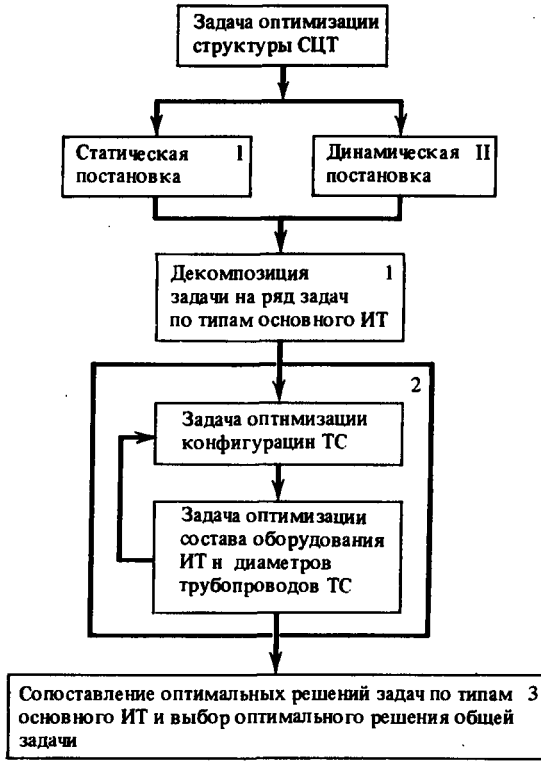


Рис. 4.1. Укрупненная схема решения задачи оптимизации структуры СЦТ

В том случае, если технико-экономические показатели ИТ, полученные при решении второй задачи, отличаются от соответствующих укрупненных показателей первой задачи более чем на заданную величину, решение итеративно уточняется при скорректированных показателях ИТ и ТС. Методы решения названных задач и соответствующие математические модели представлены для статической постановки в настоящей главе в разд. 4.2 и 4.3, для динамической постановки – в гл. 8.

На третьем этапе происходит сопоставление вариантов структур СЦТ с альтернативными типами основных ИТ и выбор оптимального варианта по критерию минимума приведенных затрат в СЦТ. При этом структура СЦТ для каждого из альтернативных типов основного ИТ является наилучшей.

Необходимость решения задачи оптимизации СЦТ не только в динамической, но и в статической постановке обусловлена рядом причин:

большая размерность динамической задачи (пропорционально числу плановых периодов) приводит к дополнительным допущениям при ее постановке;

исходная информация в динамической задаче обычно представлена в более агрегированном виде. Например, при решении статической задачи

детально учитываются внутригодовые показатели режима выработки теплоты, а в динамической задаче они представлены укрупненно и т.п.

Задача оптимизации СЦТ в динамической постановке может решаться независимо от решения задачи в статической постановке и совместно с ней. Использование оптимального и близких к нему решений статической задачи в качестве начального приближения существенно упрощает решение динамической задачи.

Таким образом, статическая и динамическая постановки задачи оптимизации структуры СЦТ взаимно дополняют друг друга и позволяют получить наиболее эффективное решение.

4.2. Оптимизация состава оборудования ИТ и диаметров трубопроводов ТС при заданной конфигурации тепловой сети

При решении задачи оптимизации состава оборудования ИТ и диаметров трубопроводов ТС в статической постановке при заданной конфигурации ТС считаются известными: типоразмеры и технико-экономические показатели генерирующего и сетевого оборудования; вид и стоимостные показатели топлива; замыкающие затраты на электроэнергию. Тепловые нагрузки рассматриваются только в виде горячей воды.

Для удобства решения задачи оптимизации структуры СЦТ, как было отмечено в разд. 4.1, была осуществлена ее декомпозиция на ряд задач по альтернативным типам основных ИТ. Таким образом, происходит решение задачи выбора состава оборудования и оптимизации диаметров трубопроводов ТС для каждого типа основного ИТ отдельно, затем сопоставление оптимальных решений, полученных в этих задачах, и выбор оптимального решения общей задачи.

При таком подходе математическая постановка задачи оптимизации состава оборудования и диаметров трубопроводов ТС будет следующей: найти минимум приведенных затрат в СЦТ

$$З = \min_{\upsilon} [З_{\upsilon} + З_{э}^{\upsilon}(\Delta Э_{\upsilon}, з_{э})], \tag{4.1}$$

$$З_{\upsilon} = \min \left\{ \sum_{i=1}^{M_{\text{осн}\upsilon}} З_{i\upsilon}^{\text{осн}}(n_{i\upsilon}) + \sum_{j=1}^{M_{\text{пк}}} З_{j}^{\text{пк}}(n_{fj}) + \sum_{l=1}^{M_{\text{тс}}} (n_l, D_{sl}) \right\} \tag{4.2}$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{осн}\upsilon}} \sum_{r=1}^{R_{\upsilon}} n_{ri\upsilon} Q_{ri\upsilon}^{\text{осн}} + \sum_{j=1}^{M_{\text{пк}}} \sum_{f=1}^{F} n_{fj} Q_{fj}^{\text{пк}} \geqslant Q_{\max}, \tag{4.3}$$

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{осн}\upsilon}} \sum_{r=1}^{R_{\upsilon}} W_{\text{год}\,ri\upsilon}^{\text{осн}}(n_{ri\upsilon}) + \sum_{j=1}^{M_{\text{пк}}} \sum_{f=1}^{F} W_{\text{год}\,fj}^{\text{пк}}(n_{fj}) = W_{\text{год}}, \tag{4.4}$$

$$M_{\text{осн}\upsilon} \leqslant M_{\text{осн}\upsilon}^{\max}, \quad M_{\text{пк}} \leqslant M_{\text{пк}}^{\max}, \tag{4.5}$$

$$0 \leqslant n_{ri\upsilon} \leqslant n_{ri\upsilon}^{\max}, \quad 0 \leqslant n_{fj} \leqslant n_{fj}^{\max}, \tag{4.6}$$

$n_{ri\upsilon}$, n_{fj}, n_l – целые ($\upsilon = \overline{1, V}$; $i = \overline{1, M_{\text{осн}\upsilon}}$; $j = \overline{1, M_{\text{пк}}}$; $l = \overline{1, M_{\text{тс}}}$;

$r = \overline{1, R_v}$; $f = \overline{1, F}$; $s = \overline{1, S}$; $D_{sl} \in D_s$), где индексы: v – тип основного ИТ, i – номер основного ИТ, j – номер пикового ИТ, l – номер участка ТС, r, f – типоразмер единичного агрегата основного и пикового ИТ в СЦТ, s – номер стандартного диаметра трубопровода ТС; $З_v$ – приведенные затраты в СЦТ; $З_э^v$ – дополнительные затраты, связанные с уравниванием вариантов по отпуску электроэнергии; $З_{iv}^{осн}$, $З_j^{пк}$, $З_l^{тс}$ – приведенные затраты в основной и пиковый ИТ и ТС; n_{riv}, n_{fj} – число единичных агрегатов основного и пикового ИТ; D_{sl} – стандартный диаметр ТС; n_l – число ниток трубопровода ТС; $\Delta Э_v$ – необходимое для уравнивания вариантов количество электроэнергии; $з_э$ – замыкающие затраты на электроэнергию; Q_{max} – расчетная тепловая нагрузка СЦТ; $Q_{iv}^{осн}$, $Q_{fj}^{пк}$ – тепловая мощность единичного агрегата основного и пикового ИТ; $W_{год}$ – годовая потребность в тепловой энергии; $W_{год\,riv}^{осн}$, $W_{год\,fj}^{пк}$ – годовой отпуск тепловой энергии от основного и пикового ИТ; $М_{осн\,v}$, $М_{пк}$, $М_{тс}$ – соответственно число основных и пиковых ИТ в СЦТ и участков ТС; $М_{осн\,v}^{max}$, $М_{пк}^{max}$ – технические ограничения на число основных и пиковых ИТ; n_{riv}^{max}, n_{fj}^{max} – максимально возможное число единичных агрегатов основного и пикового ИТ; V – число альтернативных типов основного ИТ в СЦТ; R_v, F – число типоразмеров единичных агрегатов основного и пикового ИТ; S – число стандартных диаметров трубопроводов ТС.

В ограничении (4.3) выражено требование к суммарной мощности основных и пиковых ИТ: она должна быть не меньше заданного расчетного значения тепловой нагрузки СЦТ. Ограничение (4.4) означает баланс между годовым отпуском тепловой энергии от основного и пиковых ИТ и годовой потребностью в тепловой энергии СЦТ. Выражения (4.5) и (4.6) соответствуют ограничениям на число основных и пиковых ИТ в СЦТ и количество единичных агрегатов в ИТ.

Для решения поставленной задачи создана математическая модель СЦТ, представляющая собой описание количественных и качественных взаимосвязей между основными и пиковыми ИТ и ТС. Необходимый отпуск тепловой энергии определяется по аналитическим зависимостям, описывающим график Россандера (график тепловых нагрузок по продолжительности). В качестве одного из основных параметров математической модели СЦТ принят показатель доли участия основного ИТ в покрытии расчетной тепловой нагрузки СЦТ, который определяет соотношение мощностей основного и пиковых ИТ, а в конечном итоге и выработки тепловой энергии этими ИТ. Выработка электроэнергии суммарная и на тепловом потреблении, а также расход теплоты на турбины ТЭЦ и АТЭЦ рассчитываются по упрощенным энергетическим характеристикам в зависимости от изменения давления пара в регулируемом отборе. Приведение вариантов структуры СЦТ к одинаковому энергетическому эффекту осуществляется с помощью замыкающих затрат на электроэнергию. Для расчета экономических характеристик вариантов структуры СЦТ используются укрупненные показатели (удельные капвложения, доля амортизации, замыкающие затраты на топливо и т.п.).

Ограниченное число типоразмеров оборудования основных и пиковых ИТ, а также стандартных диаметров трубопроводов ТС при заданной ее конфигурации приводит к сравнительно небольшому числу возможных вариантов состава оборудования и диаметров трубопроводов ТС, что позволяет в качестве метода решения поставленной оптимизационной задачи (4.1) – (4.6) использовать метод полного перебора вариантов.

Алгоритм решения задачи поиска оптимального варианта состава оборудования ИТ и диаметров трубопроводов ТС в статической постановке при заданной конфигурации ТС состоит из ряда шагов.

На первом шаге определяется множество допустимых вариантов состава оборудования основных ИТ, которое формируется исходя из имеющегося набора типового оборудования основного ИТ рассматриваемого типа (набор типов основного ИТ, которые могут быть рассмотрены для данной СЦТ, принимается на первом этапе решения задачи оптимизации СЦТ – см. разд. 4.1), заданного уровня расчетной тепловой нагрузки СЦТ и ряда технологических ограничений.

На втором шаге решается задача оптимизации состава оборудования пиковых ИТ для каждого допустимого варианта состава оборудования основного ИТ рассматриваемого типа.

Третий шаг заключается в решении задачи определения оптимальных показателей ТС при заданной ее конфигурации. При этом для каждого допустимого варианта состава оборудования основного ИТ рассматриваемого типа и оптимального состава оборудования пикового ИТ определяются количество ниток и диаметры трубопроводов на отдельных участках ТС при фиксированных значениях напоров.

На четвертом шаге из совокупности вариантов состава оборудования основного ИТ рассматриваемого типа (каждый вариант состава оборудования основного ИТ дополнен оптимальным составом оборудования пиковых ИТ и ТС с оптимальными диаметрами и числом ниток трубопроводов) выбирается оптимальный по критерию минимума приведенных затрат.

Набор этих шагов повторяется для всех принятых к рассмотрению типов основных ИТ. Оптимальный вариант структуры СЦТ в статической постановке при заданной конфигурации ТС выбирается из совокупности альтернативных вариантов структуры СЦТ, оптимальных для каждого из рассматриваемых типов основного ИТ, с учетом уравнивания их по отпуску электроэнергии.

Задача оптимизации состава оборудования ИТ и диаметров трубопроводов ТС при заданной ее конфигурации в статической постановке реализована в виде программно-вычислительного комплекса. Комплекс обеспечивает автоматическое формирование допустимых вариантов структуры СЦТ; определение технико-экономических показателей каждого варианта структуры СЦТ; приведение вариантов к одинаковому энергетическому эффекту и выбор оптимального варианта структуры СЦТ по минимуму суммарных приведенных затрат.

Для удобства пользования ПВК и сокращения затрат на подготовку исходных данных вся информация, необходимая для решения задачи, разделена на постоянную и переменную. Постоянная информация не зависит от условий расчета; она содержит возможные типоразмеры единичных блоков основных и пиковых ИТ, стандартный ряд диаметров и способы

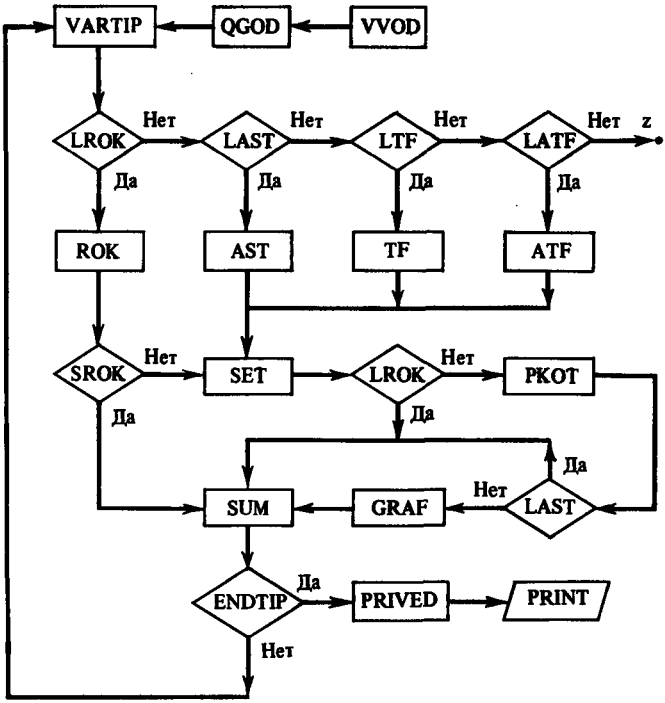


Рис. 4.2. Укрупненная блок-схема ПВК

прокладки ТС, ряд технико-экономических показателей ИТ и ТС и др. Переменная информация определяется условиями конкретного расчета; она включает тепловые и климатические характеристики района теплопотребления, замыкающие затраты на топливо и электроэнергию, коэффициенты, учитывающие изменение стоимостных показателей оборудования ИТ и ТС применительно к конкретному району теплопотребления.

ПВК состоит из блоков трех групп: блоков основных ИТ, логических блоков и вспомогательных блоков. Укрупненная блок-схема ПВК приведена на рис. 4.2.

Первая группа включает блоки следующих основных ИТ: ROK (районная отопительная котельная), AST (атомная станция теплоснабжения), TF (ТЭЦ на органическом топливе), ATF (атомная ТЭЦ). В каждом из этих блоков определяется множество допустимых составов генерирующего оборудования основных ИТ рассматриваемого типа. При этом если в качестве основного ИТ используются АСТ или ТЭЦ на органическом или ядерном топливе, то он покрывает базисную часть графика тепловых нагрузок. В соответствии с имеющимися рекомендациями доля участия основного ИТ в покрытии расчетной тепловой нагрузки СЦТ ($\alpha_{осн}$) принимается в диапазоне 0,2–0,8 [8,24]. С учетом этого требования и формируются допустимые составы генерирующего оборудования основных ИТ, отличающиеся типоразмерами и числом единичных блоков. Кроме того, для каждого конкретного типа основного ИТ существуют дополнительные технические

ограничения, связанные с характеристиками устанавливаемого на этих ИТ оборудования, учет которых позволяет сократить число допустимых вариантов состава генерирующего оборудования основных ИТ. Так, например, нецелесообразна установка на одной РК более шести однотипных котлоагрегатов. Для каждого из сформированных допустимых составов генерирующего оборудования основных ИТ определяются его технико-экономические показатели.

Вторая группа представлена логическими блоками LROK, LAST, LTF, LATF и SROK. Первые четыре из них служат для определения последовательности подключения расчетных блоков, необходимых для анализа СЦТ с данным типом основного ИТ. В блоке SROK происходит проверка расположения РК – в пределах района теплопотребления или за чертой города. Этим определяется наличие или отсутствие транзитной ТС в СЦТ с РК.

Описание блоков третьей группы (вспомогательных) осуществляется в порядке их подключения к блокам основных ИТ.

В блоке VVOD производится ввод исходной информации, необходимой для решения задачи. Предусмотрена возможность как ввода всей информации, так и обновления только переменной ее части, необходимой для выполнения конкретного расчета. В блок VVOD передаются также данные по конфигурациям транзитной ТС для каждого рассматриваемого типа основного ИТ, полученные в результате решения задачи оптимизации ТС (см. разд. 4.3).

Блок QGOD служит для определения необходимого отпуска тепловой энергии районам теплопотребления в течение отопительного и неотопительного периодов. В этом же блоке определяется коэффициент неравномерности графика тепловых нагрузок и температура наружного воздуха, соответствующая "срезке" температурного графика [8].

С помощью блока VARTIP проводится перебор всех типов основного ИТ, принятых к рассмотрению.

Блок SET служит для определения оптимальных параметров транзитной тепловой сети: количества ниток и диаметров трубопроводов. При этом конфигурация транзитной ТС считается заданной. Для каждого участка транзитной тепловой сети (от основного ИТ до пиковых, расположенных в центрах тепловых нагрузок) из ряда стандартных диаметров формируется множество допустимых диаметров при ограничениях на максимальную скорость сетевой воды и минимальное значение линейного падения давления [34]. Далее определяются: затраты на прокладку и обслуживание в зависимости от диаметра, длины трубопровода и способ его прокладки; затраты на перекачку теплоносителя. Оптимальные диаметр и число ниток для каждого участка ТС выбираются исходя из условия получения минимума приведенных затрат в рассматриваемый участок ТС.

В блоке PKOT происходит выбор оптимального состава оборудования пиковых ИТ. Формируется множество допустимых вариантов состава оборудования для каждого пикового ИТ, отличающихся числом и типоразмерами единичных котлоагрегатов. При этом выбор генерирующего оборудования пиковых ИТ производится с учетом требований СНиП [35] по надежности теплоснабжения: в аварийной ситуации обеспечивается покрытие требуемой доли расчетной тепловой нагрузки СЦТ в зависимости от категории потребителя. Для каждого допустимого варианта состава оборудова-

ния пиковых ИТ определяются капитальные, эксплуатационные и приведенные затраты; оптимальный вариант состава оборудования пиковых ИТ выбирается по критерию минимума приведенных затрат.

Блок GRAF служит для построения графика тепловых нагрузок по продолжительности, расчета температурного графика ТС, а также определения режимных показателей работы теплофикационных турбин ТЭЦ и АТЭЦ. В блоке GRAF отопительный период разбивается на ряд дискретных интервалов времени, в течение каждого из которых тепловая нагрузка СЦТ остается постоянной.Для каждого из полученных интервалов отопительного периода и для неотопительного периода в целом определяются: относительная тепловая нагрузка и соответствующая ей температура наружного воздуха; требуемая тепловая нагрузка отборов турбин; температуры прямой и обратной сетевой воды; давление пара в отборах теплофикационных турбин; полная электрическая и теплофикационная мощности турбин, которые рассчитываются по энергетическим характеристикам теплофикационных турбин ТЭЦ и АТЭЦ, выраженным аналитическими зависимостями.

В блоке SUM каждый допустимый вариант состава оборудования основного ИТ дополняется оптимальным для данного варианта составом оборудования пиковых ИТ и транзитной ТС заданной конфигурации с оптимальными параметрами. По каждому из сформированных таким образом вариантов структуры СЦТ определяются суммарные приведенные затраты, включающие приведенные затраты в основной и пиковые ИТ и транзитную ТС. Если в качестве основного ИТ в СЦТ используются ТЭЦ на органическом или ядерном топливе, то все допустимые варианты структуры СЦТ в пределах каждого из названных типов основного ИТ предварительно приводятся к сопоставимому виду по электрической мощности и отпуску электроэнергии [5]. В этом случае в суммарные приведенные затраты включаются дополнительные затраты, связанные с уравниванием вариантов по электрической мощности и отпуску электроэнергии. Для каждого типа основного ИТ из множества соответствующих ему допустимых вариантов структуры СЦТ выбирается оптимальный вариант по критерию минимума приведенных затрат. Таким образом, получаем альтернативные варианты структуры СЦТ, число которых определяется количеством рассматриваемых типов основного ИТ.

В блоке ENDTIP производится проверка окончания перебора всех рассматриваемых типов основного ИТ.

В блоке PRIVED исходя из полученных в блоке SUM альтернативных вариантов структуры СЦТ определяется оптимальный для данных условий тип основного ИТ и соответствующий ему вариант структуры СЦТ. При этом все альтернативные варианты приводятся к одинаковому энергетическому эффекту по аналогии с блоком SUM.

В блоке PRINT осуществляется печать выходных документов. При этом предусмотрена возможность вывода на печать информации как об оптимальном варианте структуры СЦТ, так и об альтернативных вариантах, отличающихся типом основного ИТ. В случае необходимости на печать выводится информация обо всех допустимых вариантах структуры СЦТ в пределах каждого из рассматриваемых типов основных ИТ.

Разработанный ПВК имеет гибкую блочную структуру, благодаря кото-

Таблица 4.1. **Состав используемых вспомогательных блоков ПВК для рассматриваемых типов основных ИТ**

Наименование блоков первой группы	Наименование вспомогательных блоков							
	VVOD	QGOD	VARTIP	SET	PKOT	SUM	GRAF	ENDTIP
ROK	+	+	+	± *)	–	+	–	+
AST	+	+	+	+	+	+	–	+
TF	+	+	+	+	+	+	+	+
ATF	+	+	+	+	+	+	+	+

*) В зависимости от размещения котельной (в центре нагрузок "–", за чертой города "+").

рой любой из блоков третьей группы может быть подключен к блокам основных ИТ по мере необходимости. В табл. 4.1 приведен состав используемых вспомогательных блоков ПВК для всех рассматриваемых типов основных ИТ. Знак "+" в графе таблицы означает, что соответствующий блок третьей группы подключается к данному блоку основного ИТ.

Блоки VVOD, QGOD, VARTIP, SUM, ENDTIP выполняются со всеми блоками основных ИТ. Блок SROK необходим только в случае, когда основным ИТ в СЦТ является РК. Блок SET используется со всеми блоками основных ИТ, за исключением случая, когда в качестве основного ИТ рассматриваются РК, расположенные в центрах тепловых нагрузок. Блок PKOT подключается ко всем блокам рассматриваемых основных ИТ, кроме блока ROK. Блок GRAF выполняется только при наличии в СЦТ ТЭЦ или АТЭЦ, т.е. с блоками TF и ATF. Заключительные блоки комплекса PRIVED и PRINT подключаются после окончания перебора всех типов основных ИТ.

Точка "z" в блок-схеме (см. рис. 4.2) – это точка возможного подключения основного ИТ какого-либо другого типа (например, маневренной ТЭЦ, АЭС в режиме АТЭЦ и др.).

Для примера рассмотрим работу ПВК при исследовании СЦТ с АСТ в качестве основного ИТ. Согласно блок-схеме рис. 4.2 последовательно выполняются блоки VVOD, QGOD и VARTIP. Затем следует логический блок LROK; из этого блока по ветке "Нет" осуществляется переход в логический блок LAST, откуда по ветке "Да" переходим в блок основного ИТ – блок AST. В этом блоке, как указывалось ранее, формируется множество допустимых составов оборудования основного ИТ, в данном случае АСТ. Далее выполняется блок SET, в котором оптимизируются параметры транзитной ТС от АСТ до пиковых ИТ при заданной конфигурации ТС. Затем проходим логический блок LROK и по ветке "Нет" входим в блок PKOT. В этом блоке оптимизируется состав оборудования пиковых ИТ, работающих совместно с АСТ. Далее выполняется логический блок LAST. По ветке "Да" обходим блок GRAF и входим в блок SUM. После выполнения блока SUM осуществляется переход в блок ENDTIP. В силу того что в качестве примера рассматривается возможность использования в СЦТ только одного типа основного ИТ – АСТ, считаем перебор типов основного ИТ законченным и по ветке "Да" переходим в блок PRIVED, далее в блок PRINT.

ПВК реализован на алгоритмическом языке ФОРТРАН для ЕС ЭВМ. Он имеет открытую структуру, что позволяет наращивать, а при необходимости изменять макроструктуру ПВК без изменения структуры входящих в его состав программных блоков.

4.3. Оптимизация конфигурации тепловой сети

При решении этой задачи считаются известными: число тепловых районов города, их тепловые нагрузки и необходимые выработки теплоты; тип, число и мощность блоков основного ИТ; суммарная мощность пиковых ИТ; возможные места расположения основного и пиковых ИТ с ограничениями на их производительности по условиям водоснабжения, экологии и т.д.; совокупность возможных трасс тепловых сетей (для каждого типа основного ИТ) с указанием длины отдельных участков и условий прокладки. Требуется для каждого типа основного ИТ определить оптимальную конфигурацию ТС, включающую: расположение основного ИТ; число пиковых ИТ и их размещение; направления и длины теплопроводов от основного ИТ до тепловых районов.

Математическая формулировка задачи выбора наилучшего (оптимального) варианта конфигурации ТС имеет следующий вид:

$$\min З(Q_{vj}^{осн};\ n_{vjk}^{пк};\ \Gamma_{\gamma vk};\ P_{\gamma vk}), \tag{4.7}$$

$$R(Q_{vj}^{осн};\ n_{vjk}^{пк}) \leqslant 0, \tag{4.8}$$

$$\Gamma_{\gamma vk} \in \Gamma. \tag{4.9}$$

Здесь З – приведенные затраты, связанные с данной конфигурацией ТС; $Q_{vj}^{осн}$ – мощность основного ИТ v-го типа, расположенного на j-й площадке; $n_{vjk}^{пк}$ – число соответствующих ему пиковых ИТ, расположенных на k-й совокупности площадок; $\Gamma_{\gamma vk}$ – γ-я конфигурация ТС, соответствующая рассматриваемым ИТ; $P_{\gamma vk}$ – совокупность технико-экономических параметров участков ТС.

Неравенства (4.8) учитывают технические ограничения на мощность основного ИТ и число пиковых ИТ. Совокупность возможных конфигураций ТС – Г формируется проектировщиком.

Для решения сформулированной задачи оптимизации конфигурации ТС имеются два метода: вариантный, в котором каждая из исследуемых конфигураций ТС полностью формируется проектировщиком, и оптимизационный, решающий некоторую экстремальную задачу на избыточной схеме, отражающей СЦТ.

Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, присущие любому количественному методу анализа технико-экономических задач. К достоинствам вариантного метода следует отнести: гибкость использования всей имеющейся и потенциально доступной проектировщику информации, учитывающей особенности площадок ИТ, рельефа местности и условий прокладки, возможности реконструкции, расширения и изменения режимов работы имеющейся части СЦТ; отсутствие фиксированного уровня детализации каждого из формируемых вариантов; возможность изменения схемы расчета с учетом получаемых промежуточных результатов – дополнитель-

ный анализ существенно влияющей информации и пренебрежение малосущественной; простота реализации на ЭВМ, которая позволяет быстро рассчитывать варианты по сложившимся в инженерной практике расчетным зависимостям. Недостатками вариантного подхода являются: полная зависимость качества и полноты анализа вариантов от интуиции и опыта проектировщика, который формирует ограниченное число конфигураций; относительно низкая скорость формирования исходного множества вариантов, связанная с учетом большого количества особенностей конкретной схемы СЦТ, и, как следствие, изучение лишь малой доли потенциально возможных вариантов конфигураций ТС в СЦТ.

Практическая реализация этого подхода приводит к повышению качества проектирования только при рациональном взаимодействии человека и ЭВМ, которое достигается за счет специальных сервисных программ, частично автоматизирующих подготовку исходных данных, контролирующих случайные ошибки человека и представляющих результаты расчетов в удобном для использования виде.

Второе направление исследования конфигураций и параметров тепловых сетей связано с использованием математических моделей тепловой сети, которые в абстрактной форме учитывают основные свойства изучаемого объекта, игнорируя менее существенные, например непрерывность потока вещества и т.д. Применительно к гидравлическим сетям большое распространение получили модели оптимизации сети в рамках развиваемого в Сибирском энергетическом институте СО АН СССР метода избыточной схемы [11, 36]. При использовании этого метода формирование исходной совокупности возможных конфигураций тепловой сети – избыточной схемы – также выполняется проектировщиком, учитывающим конкретные особенности рельефа местности и т.д. Однако в отличие от вариантного метода (в котором вместе с совокупностью участков сети фиксируется конкретный поток теплоносителя) в методе избыточной схемы задается не конкретный поток в сети, а совокупность потоков, удовлетворяющая некоторым общим условиям. Этими условиями в зависимости от цели исследования могут являться, например, соответствие потребностей и расходов в каждом узле схемы – первый закон Кирхгофа и условие потенциальности стационарного потока теплоносителя – второй закон Кирхгофа. Выражая приведенные затраты через возможные характеристики отдельных участков сети (расходы теплоносителя, длины участков, напоры), можно поставить экстремальную задачу, решение которой выделяет оптимальную конфигурацию и потоки теплоносителя. К достоинствам этого направления исследования оптимальных конфигураций ТС относится значительное расширение множества рассматриваемых конфигураций и потоков.

Рассмотрим для примера простейший случай для транзитной сети одного основного ИТ, который может быть расположен на одной из двух площадок B или D, ведущих к центрам двух тепловых районов C и E, где установлены ПК. Вариантный метод соответствует указанию последовательности возможных соединений точек (B, D, C, E) и соответствующих длин участков ТС. На рис. 4.3 показаны два варианта конфигурации сети: первый соответствует последовательности соединений (D, C, E) и длинам участков (l_{DC}; l_{CE}), второй – последовательностям (B, C; B, E) и длинам l_{BC}; l_{BE}. Та же информация об этих участках тепловой сети, если рассматривать

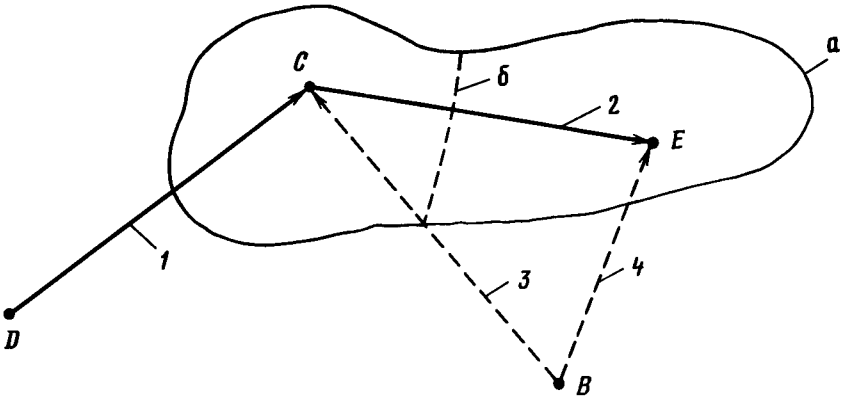


Рис. 4.3. Простейшая совокупность конфигураций тепловой сети

а – граница перспективной застройки города; *б* – условная граница между тепловыми районами; *B, D* – возможные площадки установки основного ИТ; *C, E* – площадки установки пиковых ИТ; *1, 2* – первый вариант конфигурации транзитной сети; *3, 4* – второй вариант конфигурации транзитной сети

объединение этих вариантов, при использовании метода избыточной схемы представляется в виде матрицы инциденций A и взаимных расстояний R:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \qquad R = \begin{pmatrix} l_{DC} & 0 & 0 & 0 \\ l_{DC} & l_{CE} & 0 & l_{BC} \\ 0 & l_{CE} & l_{BE} & 0 \\ 0 & 0 & l_{BE} & l_{BC} \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

Такое представление сети неявно содержит конфигурации (B, C, E) (l_{BC}, l_{CE}) и (B, E, C) (l_{BE}, l_{CE}) (которые при вариантном подходе должны были явно перечисляться), увеличивая первоначально сформированное проектировщиком множество конфигураций. При малом количестве узлов схемы теплоснабжения и участков тепловой сети различие между вариантным способом и методом избыточной схемы незначительно – для рассмотренного примера первоначальное число вариантов – 2, а возможное – 4. Однако при увеличении числа узлов и дуг схемы теплоснабжения число дополнительных конфигураций экспоненциально быстро растет. Другими достоинствами этого метода являются возможности применения универсальных алгоритмов поиска решения при автоматизации расчетов, строгая формализация задачи и единообразное описание необходимых для расчетов исходных данных.

К недостаткам метода следует отнести: сложность и громоздкость расчетов при значительном увеличении размерности задачи – числа рассматриваемых вершин и участков ТС; отсутствие замкнутых циклов в оптимальных решениях; отсутствие гарантированного получения глобального оптимума, особенно при учете дискретности параметров сети, так как фактически применяются методы случайного поиска в сочетании с локальной оптимизацией [11, 36].

Области применения вариантного и оптимизационного методов различны: для простых схем (транзитные сети от основного ИТ до ПК в центрах тепловых районов) целесообразно использовать вариантный подход, для сложных разветвленных тепловых сетей – оптимизационный.

4.4. Пример использования программно-вычислительного комплекса для исследования СЦТ

Программно-вычислительный комплекс, описанный в разд. 2.2, позволяет проводить исследование СЦТ с различными типами основного ИТ, в том числе определить оптимальные структуру СЦТ и состав оборудования основных и пиковых ИТ, исследовать влияние неоднозначности исходных данных, таких, как технико-экономические показатели ИТ и ТС, вид и замыкающие затраты на органическое топливо и т.д. [37, 38].

В качестве иллюстрации возможностей ПВК ниже представлены некоторые результаты исследований по определению сравнительной экономической эффективности ИТ различных типов. Расчеты выполнялись при следующих условиях и допущениях:

в качестве конкурирующих приняты четыре типа основных ИТ: РК, АСТ, АТЭЦ и ОТЭЦ; при этом количество основных ИТ принято равным 1 для вариантов СЦТ с АСТ, АТЭЦ и ОТЭЦ и от 3 до 10 – для СЦТ с РК в зависимости от тепловой нагрузки города;

в СЦТ с АСТ, АТЭЦ и ОТЭЦ устанавливаются пиковые ИТ;

АСТ, АТЭЦ, ОТЭЦ и РК на угле располагаются за чертой города, РК на газе – в черте города, пиковые ИТ находятся в центрах тепловых нагрузок районов города, в качестве топлива для них принят газ;

конфигурация тепловой сети от АСТ, АТЭЦ и ОТЭЦ до пиковых ИТ, а также от РК на угле до центров тепловых нагрузок задана;

расстояние от АСТ до перспективной границы города равно 7 и 15 км, от АТЭЦ – 25 и 60 км;

на АСТ устанавливаются реакторы единичной мощностью 500 МВт(т); на АТЭЦ – реакторы ВВЭР-1000 и турбины ТК-450/500-60; на ОТЭЦ – турбины четырех типов: Т-100/110-130, Т-175/210-130, Т-180/210-130, Т-250/300-240; в пиковых и районных котельных – водогрейные котлы единичной мощностью 58, 116, 209 МВт(т);

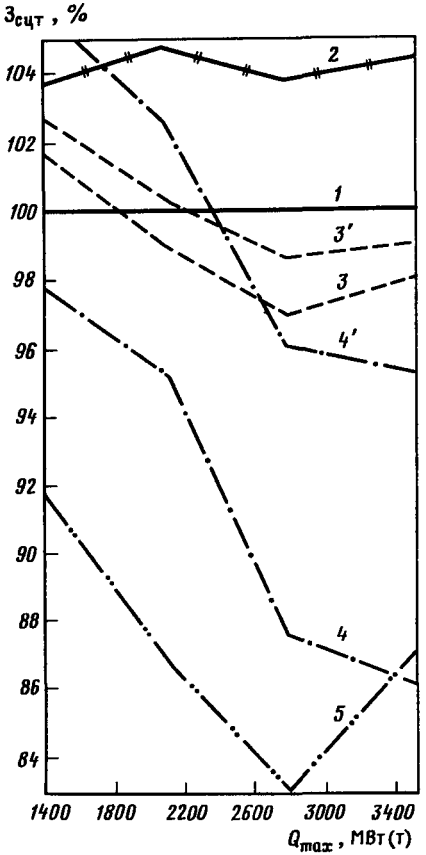
технико-экономические показатели ИТ и тепловых сетей приняты по укрупненным нормативам в ценах 1984 г.;

рассматриваемый район – Центр европейской части СССР;

принятый диапазон расчетных тепловых нагрузок – 1400–3700 МВт(т); доля нагрузки горячего водоснабжения – 0,2;

замыкающие затраты на газ – 57 руб/т у.т. и на уголь – 48 руб./т у.т.

В результате проведенных расчетов были определены зоны расчетных тепловых нагрузок СЦТ, где экономически целесообразно применение того или иного типа основного ИТ. На рис. 4.4 представлены зависимости приведенных затрат в СЦТ от расчетной тепловой нагрузки СЦТ. Приведенные затраты в СЦТ с РК на угле, ОТЭЦ, АТЭЦ и АСТ даются в процентах по отношению к приведенным затратам в СЦТ с РК на газе. Наличие точек изломов на графиках обусловлено дискретностью типоразмеров оборудования,



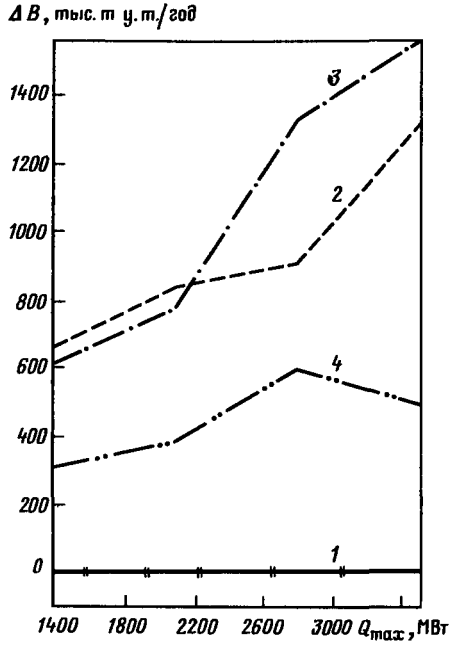


Рис. 4.4. Зависимость приведенных затрат в СЦТ от расчетной тепловой нагрузки СЦТ
1 – СЦТ с РК на газе; *2* – СЦТ с РК на угле; *3, 3'* – СЦТ с АСТ (расстояние от границы города соответственно 7 и 15 км); *4, 4'* – СЦТ с АТЭЦ (расстояние от границы города соответственно 25 и 60 км); *5* – СЦТ с ОТЭЦ

Рис. 4.5. Абсолютная экономия органического топлива в вариантах СЦТ с АТЭЦ, ОТЭЦ и АСТ по сравнению с СЦТ с РК
1 – СТЦ с РК; *2* – СЦТ с АСТ; *3* –СЦТ с АТЭЦ; *4* – СЦТ с ОТЭЦ

устанавливаемого на основных и пиковых ИТ. Расчеты показывают, что при принятых исходных данных наиболее экономичным вариантом является вариант структуры СЦТ с ТЭЦ на органическом топливе, наименее экономичным – структуры СЦТ с РК на угле. Варианты СЦТ с атомными ИТ занимают промежуточное положение. Следует отметить, что с ростом расчетных тепловых нагрузок сравнительная экономическая эффективность СЦТ с атомными ИТ повышается. В данном сопоставлении рассматривался базисный режим работы ТЭЦ на органическом топливе. При переводе ОТЭЦ в полупиковый режим их преимущества существенно уменьшатся.

На рис. 4.4 проиллюстрировано также влияние расстояния от атомных ИТ до границы города на их экономическую эффективность. Так, увеличение расстояния от АТЭЦ с 25 до 60 км и от АСТ с 7 до 15 км приводит

к росту приведенных затрат в варианте СЦТ с АТЭЦ на 8–11%, что существенно снижает его сравнительную экономичность, и СЦТ с АСТ на 2–3%.

Проведен анализ вариантов СЦТ с точки зрения расхода органического топлива. С учетом складывающегося на перспективу дефицита органического топлива, особенно качественного, анализ его расхода по вариантам СЦТ представляет особый интерес и может использоваться в качестве дополнительного критерия при выборе окончательного решения (рис. 4.5).

Как видно из рис. 4.5, наибольшую экономию органического топлива обеспечивают варианты СЦТ с атомными ИТ. В зависимости от величины расчетной тепловой нагрузки СЦТ она составляет для СЦТ с АСТ от 660 до 1300 тыс.т у.т./год, для СЦТ с АТЭЦ от 610 до 1550 тыс.т у.т./год. При этом увеличение расчетной тепловой нагрузки СЦТ приводит к росту абсолютной экономии органического топлива атомными ИТ. Следует отметить также, что расход органического топлива на производство теплоты в СЦТ с атомными ИТ в 3–10 раз меньше, чем в СЦТ с ТЭЦ на органическом топливе.

Глава пятая

МЕТОДЫ УЧЕТА ВЗАИМОСВЯЗИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С СИСТЕМАМИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

5.1. Модель развивающейся системы атомных энергетических установок

Для определения и учета эффектов, имеющих место в системе ядерной энергетики при наличии в ней СЦТ с атомными источниками теплоты, используется оптимизационная динамическая модель системы атомных энергетических установок (АЭУ), рассчитанная главным образом на применение методов линейного программирования [39]. В качестве критерия оптимальности принят минимум приведенных затрат с учетом последействия посредством включения в критерий затрат за пределами периода оптимизации [40].

Модель нацелена на оптимизацию развития основной составляющей атомной энергетики – системы атомных конденсационных электростанций. Ее основное назначение – оптимизация структуры атомных электростанций по типам реакторов. Эта задача относится к числу важнейших при планировании и прогнозировании развития атомной энергетики. Ее решение позволит установить не только количество необходимых реакторов разных типов и соответствующего оборудования, но также необходимые капиталовложения, объем добычи ядерного сырья, объемы производства по обогащению топлива, изготовлению тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), переработке отработавшего топлива и многие другие показатели, характеризующие развитие атомной энергетики.

Наряду с оптимизацией структуры в результате одного расчета по модели при однозначно заданных исходных данных определяются оптимальные вид топлива, сроки перехода с одного топлива на другое, зона графика нагрузки (база или полупик), в которой следует использовать тот или иной тип реактора. С помощью модели могут оптимизироваться также

отдельные параметры топливного цикла. Кроме того, с помощью модели путем расчетов с вариацией исходных данных может проводиться широкий круг технико-экономических исследований с целью:

получения количественной оценки экономической и энергетической эффективности различных мероприятий (например, внедрения нового типа реактора, использования нового вида ядерного горючего, освоения и внедрения химпереработки отработавшего топлива), а также ее изменения в зависимости от сроков реализации этих мероприятий;

выявления зависимости оптимальных решений и соответствующих им показателей системы АЭУ от различных факторов в условиях неопределенности, в частности, определения области устойчивости отдельных важнейших решений и выявления условий конкурентоспособности новой техники.

Математическая формулировка модели имеет следующий вид:

найти

$$\min \Big(\sum_{i=1}^{I} \sum_{w=0}^{V} \bar{з}_{iw} x^{у}_{iw} + \sum_{j \in J_н} \sum_{l=1}^{2} \sum_{v=v_{jl}}^{V} \bar{з}_{jlv} x_{jlv} +$$

$$+ \sum_{d \in D_н} \sum_{l=1}^{2} \sum_{v'=\underline{v}'}^{\bar{v}'} \sum_{v=v_{dl}}^{v'} \bar{з}_{dlv'v} x_{dlv'v} + \sum_{j \in J_д} \sum_{v=v_0}^{0} \bar{з}_{jv} x_{jv} +$$

$$+ \sum_{j \in J_д} \sum_{v'=\underline{v}'}^{\bar{v}'} \sum_{v=v_0}^{0} \bar{з}_{jv'v} x_{jv'v} \Big) \tag{5.1}$$

при выполнении ограничений:

$$x^{д}_{w} + \sum_{j \in J_н} \sum_{l=1}^{2} \sum_{v=v_{jl}} R^{п}_{jlvw} x_{jlv} +$$

$$+ \sum_{d \in D_н} \sum_{l=1}^{2} \sum_{v'=\underline{v}'}^{\bar{v}'} \sum_{v=v_{dl}}^{v'} R^{п}_{dlv'vw} x_{dlv'v} + \sum_{j \in J_д} \sum_{v=v_0}^{0} R^{п}_{jvw} x_{jv} +$$

$$+ \sum_{j \in J_д} \sum_{v'=\underline{v}'}^{\bar{v}'} \sum_{v=v_0}^{0} R^{п}_{jv'vw} x_{jv'v} = G^{п}_{w}, \quad w = \overline{0, V}; \tag{5.2}$$

$$- \sum_{i=1}^{I} x^{у}_{iw} + \sum_{j \in J_н} \sum_{l=1}^{2} \sum_{v=v_{jl}}^{V} R^{у}_{jlvw} x_{jlv} +$$

$$+ \sum_{d \in D_н} \sum_{l=1}^{2} \sum_{v'=\underline{v}'}^{\bar{v}'} \sum_{v=v_{dl}}^{v'} R^{у}_{dlv'vw} x_{dlv'v} + \sum_{j \in J_д} \sum_{v=v_0}^{0} R^{у}_{jvw} x_{jv} +$$

$$+ \sum_{j \in J_д} \sum_{v'=\underline{v}'}^{\bar{v}'} \sum_{v=v_0}^{0} R^{у}_{jv'vw} x'_{jv'v} = - G^{у}_{w}, \quad w = \overline{0, V}; \tag{5.3}$$

$$x^{д}_{l} + \sum_{w=0}^{V} x^{у}_{iw} = G_i, \quad i = \overline{1, I}; \tag{5.4}$$

$$\sum_{j \in J_н} x_{jlv} + \sum_{d \in D_н} \sum_{v'=\underline{v}'}^{\bar{v}'} x_{dlv'v} = N_{lv}, \quad l = 1, 2; \quad v = \overline{v_l, V}, \tag{5.5}$$

где $v_l = \begin{cases} 1 & \text{при } l = 1, \\ v^{\text{п}} & \text{при } l = 2, \end{cases}$

$$x_{jv} + \sum_{v'=\underline{v}'}^{\overline{v}'} x_{jv'v} = N_{jv}, \quad j \in J_{\text{д}}, \quad v = \overline{v_0, 0}; \tag{5.6}$$

$$\underline{N}_{v\mu} \leqslant \sum_{j \in J_\mu} \sum_{l=1}^{2} x_{jlv} + \sum_{d \in D_\mu} \sum_{l=1}^{2} x_{dlv'v} \leqslant \overline{N}_{v\mu}, \quad v = \overline{1, V}; \quad \mu = \overline{1, \mu'}. \tag{5.7}$$

Помимо ограничений (5.2)–(5.7), должны быть выполнены условия неотрицательности всех переменных оптимизации (обозначены буквой x), а также условия $x_{jlv} = x_{dlv'v} = 0$, если $v < v_j$.

В выражениях (5.1)–(5.7) используются следующие обозначения.

И н д е к с ы: j – тип АЭС, не меняющих вид топлива; d – тип АЭС, меняющих вид топлива; i – источник природного урана определенной стоимости; v – интервал, в котором вводятся в эксплуатацию АЭС; w – интервал, в котором сводится баланс топлива; v' – интервал, после которого АЭС переходят с урана на плутоний; l – режим работы АЭС (база, полупик); μ – признак однотипности оборудования (введение этого индекса позволяет формировать ограничения не только на ввод мощности одного типа АЭС, но также и на суммарный ввод мощности на нескольких типах АЭС, для которых необходим один и тот же вид оборудования).

О п т и м и з и р у е м ы е п е р е м е н н ы е: $x_{jlv}, x_{dlv'v}$ – вводы мощности в интервале v на новых АЭС, не меняющих и меняющих вид топлива; $x_{jv}, x_{jv'v}$ – то же для действующих АЭС; $x_w^{\text{д}}$ – неиспользованный плутоний в ступени w (остаток на складе); $x_{iw}^{\text{у}}$ – объем добычи (потребления) природного урана из источника i в ступени w; $x_i^{\text{д}}$ – неиспользованные ресурсы природного урана в источнике i.

З а д а н н ы е в е л и ч и н ы: I – число источников урана; V – число интервалов в оптимизационном периоде; v_0 – начальный интервал предоптимизационного периода ($v_0 \leqslant 0$); $v^{\text{п}}$ – интервал, с которого начинается ввод полупиковых АЭС; v_j – интервал, начиная с которого становится возможным ввод АЭС типа j; v_l – интервал, с которого начинается ввод АЭС, работающих в режиме l; v_{jl} – наименьшее из v_j и v_l; $\underline{v}'$, $\overline{v}'$ – минимальное и максимальное значения v'; $J_{\text{н}}$ – множество типов новых (вводимых в течение оптимизационного периода) АЭС, не меняющих вид топлива; $J_{\text{д}}$ – множество типов действующих (вводимых до оптимизационного периода) АЭС, не меняющих вид топлива; $D_{\text{н}}$ – множество типов новых АЭС, меняющих вид топлива; $D_{\text{д}}$ – то же для действующих АЭС; J_μ – множество типов новых АЭС, не меняющих вид топлива и характеризующихся признаком μ; D_μ – то же для АЭС, меняющих вид топлива; N_{lv} – прирост мощности новых АЭС, работающих в режиме l, в течение интервала v; N_{jv} – прирост мощности действующих АЭС типа j в интервале v предоптимизационного периода; $\underline{N}_{v\mu}$, $\overline{N}_{v\mu}$ – минимально и максимально допустимые значения суммарного прироста мощности АЭС, характеризующихся признаком μ, в интервале v; G_i – ресурсы природного урана в источнике i; $\overline{з}_{jlv}$, $\overline{з}_{dlv'v}$ – приведенные к единому для всей системы году τ

удельные приведенные затраты в новые АЭС, не меняющие и меняющие вид топлива (без учета стоимости природного урана и плутония в пределах оптимизационного периода); $\bar{з}_{jv}$, $\bar{з}_{jv'v}$ – то же для действующих АЭС; $R^{п}_{jlvw}$, $R^{п}_{dlv'vw}$ – удельный расход плутония за время от начальной загрузки реактора на новых АЭС, вводимых в интервале v, до конца интервала w (для АЭС, не меняющих и меняющих вид топлива); $R^{п}_{jvw}$, $R^{п}_{jv'vw}$ – то же для действующих АЭС; $R^{у}_{jlvw}$, $R^{у}_{dlv'vw}$ – удельный расход природного урана в течение интервала w на новых АЭС, вводимых в интервале v; $R^{у}_{jvw}$, $R^{у}_{jv'vw}$ – то же для действующих АЭС; $G^{п}_{w}$ – количество плутония, нарабатываемого АТЭЦ и АИТ от начала оптимизационного периода до конца интервала w плюс запас плутония до начала расчетного периода; $G^{у}_{w}$ – количество природного урана, потребляемого АТЭЦ и АИТ в течение интервала w; $\bar{з}_{iw}$ – приведенные к году τ удельные приведенные затраты на производство природного урана в ступени w в источнике i.

В описанной модификации модели оптимизация осуществляется при заданных вводах мощности и выработке электроэнергии и теплоты на АЭС, АТЭЦ, АСПТ, а также заданных типах реакторов на АТЭЦ, АСТ и АСПТ. Другая модификация модели расширяет возможности оптимизации за счет включения в модель АТЭЦ, АСТ и АСПТ с соответствующими дополнительными ограничениями (балансовыми уравнениями) по выработке теплоты. Основной особенностью этой модификации является учет местных условий в отдельных промышленно-жилых агломерациях, снабжаемых теплотой от атомных источников [41]. Такой учет осуществляется для ближайшей части расчетного периода (порядка 10–15 лет), а для более отдаленной перспективы учитывается суммарная потребность в теплоте без выделения отдельных промышленно-жилых агломераций.

На указанную ближайшую перспективу для каждой промышленно-жилой агломерации задается набор вариантов развития системы теплоснабжения, среди которых в процессе расчета по модели выбирается оптимальный по критерию минимума приведенных затрат в моделируемую систему в целом. Таким образом, эта модификация дает возможность оптимально решать ряд дополнительных вопросов, связанных с развитием атомных источников теплоты.

Важнейшие связи рассматриваемой системы со смежными системами могут быть представлены в виде схемы, приведенной на рис. 5.1. На этой схеме под предприятиями внешнего топливного цикла (ВТЦ) имеется в виду вся система топливоснабжения АЭС, включающая предприятия по добыче, обогащению, переработке и изготовлению топлива.

Связь системы АЭУ с системой теплоснабжения определяется участием этих двух систем в производстве общей продукции – теплоты. Учет взаимного влияния решений по развитию этих систем возможен с помощью следующего итерационного процесса. Осуществляется оптимизационный расчет на модели системы АЭУ при заданных (по предварительным данным) суммарной мощности и выработке тепловой энергии на АИТ. В результате получаются удельные затраты на тепловую энергию. С использованием полученного значения затрат для производства тепловой энергии на АИТ

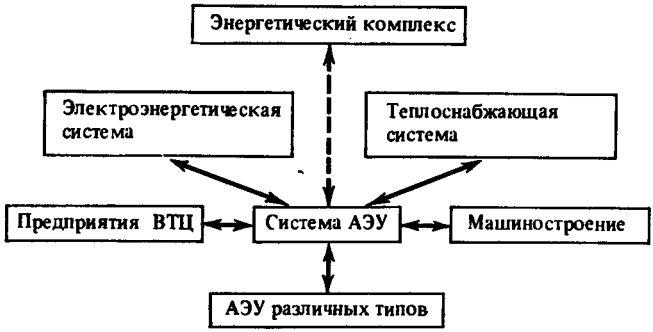


Рис. 5.1. Схема связей системы АЭУ

производится расчет на модели системы теплоснабжения, в результате которого получаются оптимальные суммарные мощность и выработка тепловой энергии на АИТ. На втором шаге итерации повторно делается расчет на модели системы АЭУ с откорректированными масштабами развития АИТ (в соответствии с результатами расчета на модели системы теплоснабжения). Получаются уточненные значения удельных затрат на тепловую энергию в системе АЭУ. Расчет повторяется до тех пор, пока дальнейшие итерации не перестанут давать сколько-нибудь существенные уточнения.

Связь системы АЭУ с электроэнергетической системой по своему характеру близка к связи системы АЭУ с системой теплоснабжения. В данном случае обе системы также производят общую продукцию – электроэнергию. Поэтому при изучении связи с электроэнергетической системой целесообразно использовать тот же методический подход, что и при учете связи с системой теплоснабжения.

Показанная на рис. 5.1 связь с ЭК отражает случай связи, учитываемой не через модели систем теплоснабжения и электроэнергетики, а непосредственным (прямым) способом, например, когда задача оптимизации масштабов развития АИТ решается не на модели системы теплоснабжения, а на модели ЭК.

Связь с предприятиями ВТЦ определяется объемом поставок различных видов ТВЭЛов в систему АЭУ, а также обратными потоками отработавшего ядерного горючего. Некоторые элементы этой связи учтены путем включения топливодобывающих предприятий ВТЦ в модель системы АЭУ. Такие объекты представлены в модели в упрощенном виде как источники ядерного сырья с заданными удельными затратами на их работу. Это позволяет учесть зависимость затрат на добычу ядерного сырья от объема его потребления (извлечения).

Специализированные модели системы топливоснабжения ядерной энергетики позволяют оптимизировать сроки ввода предприятий ВТЦ, их мощность и загрузку, а также определить замыкающие затраты на ядерное топливо в виде ТВЭЛов [42]. Может быть организован итерационный процесс последовательного уточнения (согласования) оптимальных решений, получаемых с помощью моделей системы АЭУ и предприятий ВТЦ. Основой такого процесса служит обмен информацией по экономическим и энергетическим показателям, характеризующим указанные выше потоки продук-

ции по связи с предприятиями ВТЦ (замыкающие затраты и величины потоков продукции).

Связь с машиностроением, в первую очередь с атомным, представляется существенной вследствие большой доли стоимости оборудования в приведенных затратах на сооружение и эксплуатацию АЭУ и соответственно большого потока продукции из системы машиностроения. Взаимоувязка оптимальных планов развития системы АЭУ и машиностроения позволит уточнить стоимость различных видов оборудования для АЭУ, учитываемую в модели системы АЭУ, а также оптимизировать производственные мощности и сроки вводов основных машиностроительных заводов, сроки и масштабы их реконструкции. Второй (упрощенный) вариант учета связи с машиностроением предусматривает ввод в модель системы АЭУ ограничений, обусловленных располагаемыми производственными мощностями в машиностроении и нежелательностью резких изменений выпуска основных видов оборудования, таких, например, как корпуса для ВВЭР.

Связи с моделями отдельных типов АЭУ так же, как и в рассмотренных выше случаях, могут учитываться на основе последовательного уточнения стоимостных показателей и вводимых ограничений при поочередной оптимизации по связываемым моделям. При этом, как показывают проведенные в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского исследования, полезным и эффективным является построение характеристик, отражающих влияние основных обобщающих (комплексных) показателей (параметров) АЭУ на суммарные затраты в систему АЭУ и, таким образом, позволяющих оценить соответствующий системный эффект. Указанные характеристики были построены применительно к АЭС с быстрыми реакторами (БР), работающими на плутониевом топливе, для различных возможных значений основных неопределенных факторов, влияющих на эффективность БР и оптимизацию их параметров [43].

При использовании упомянутого выше способа оптимизации параметров топливного цикла АЭУ с помощью модели системы АЭУ осуществляется прямой (безытерационный) учет связи между системой АЭУ и рассматриваемым типом АЭУ. Этот способ может применяться для оптимизации параметров АЭУ, если в используемой модели предусматривается оптимизация данного типа АЭУ. Если же рассматриваемый тип АЭУ в модели не оптимизируется, то оптимизация параметров может осуществляться путем вариантных расчетов.

Рассмотрим этот случай более подробно на примере АСТ. Поставим задачу найти оптимальное из n возможных значений вектора топливных параметров АСТ по критерию минимума приведенных затрат в развивающуюся (в течение заданного расчетного периода) систему АЭУ. В качестве топливных параметров могут выступать глубина выгорания, обогащение, длительность кампании, частота перегрузок и другие топливные показатели, взаимосвязь которых учитывается с помощью соответствующих физико-технических расчетов реактора АСТ. Масштабы развития АСТ в течение расчетного периода будем считать заданными.

Один из возможных способов решения поставленной задачи с использованием описанной выше математической модели (5.1)–(5.7) заключается в следующем. Рассчитываются приведенные затраты в систему АЭУ для n вариантов ее развития. Указанные варианты отличаются друг от друга

только значениями вектора топливных параметров АСТ. При этом принимается, что все вводимые в течение расчетного периода АСТ имеют одинаковые показатели, соответствующие одному из рассматриваемых значений вектора топливных параметров.

Приведенные затраты в систему АЭУ для варианта i представляются в виде суммы двух составляющих:

$$З_i^{АЭУ} = З_i^{АСТ} + З_i^{С} \qquad (i = \overline{1, n}), \qquad (5.8)$$

где $З_i^{АСТ}$ – приведенные затраты в систему АСТ без учета стоимости природного урана и плутония; $З_i^{С}$ – приведенные затраты в систему АЭУ без АСТ, но с учетом расхода природного урана для АСТ. Первое слагаемое может определяться на основе известной методики расчета приведенных затрат. Второе слагаемое определяется с помощью приведенной выше системы АЭУ в процессе оптимизации развития АЭС по типам реакторов и видам топлива. В соответствии с принятым критерием оптимальный вариант определяется из условия $\min\limits_i З_i^{АЭУ}$.

По указанному способу в ЭНИНе было проведено экономическое сравнение ряда значений вектора топливных показателей АСТ, характеризующихся длительностью кампании от 3 до 12 лет и числом перегрузок за кампанию от 1 до 3. При сравнении использовались результаты нейтронно-физических расчетов реактора АСТ-500, полученные во ВНИИ атомного энергетического машиностроения. По предварительным результатам сравнения наиболее экономичным оказался вариант с трехлетней кампанией и ежегодной перегрузкой топлива.

Изложенный выше способ реализует системный подход (имеется в виду система АЭУ как система более высокого уровня иерархии по сравнению с АСТ) непосредственно к расчету каждого из сравниваемых вариантов. Однако вышолненные расчеты показали, что замыкающие затраты на производство природного урана и плутония в системе ядерной энергетики практически не меняются при изменении топливных показателей АСТ в рассматриваемых пределах. Это указывает на возможность и целесообразность использования другого способа решения поставленной задачи, основанного на разделении задач верхнего и нижнего уровней иерархии. При таком способе на первом этапе решается задача оптимизации системы АЭУ при фиксированных значениях топливных показателей АСТ. По результатам ее решения определяются замыкающие затраты на производство природного урана и плутония по годам (интервалам) расчетного периода. На рис. 5.2 показана динамика изменения указанных затрат относительно исходного уровня (1990 г.). Полученные замыкающие затраты используются на втором этапе решения в качестве цен при расчете приведенных затрат в систему АСТ с учетом стоимости расходуемого природного урана и нарабатываемого плутония по рассматриваемым вариантам – $\hat{З}_i^{АСТ}$ $(i = \overline{1, n})$. Выбор оптимального варианта осуществляется по критерию $\min\limits_i \hat{З}_i^{АСТ}$, который в данном случае эквивалентен критерию $\min\limits_i З_i^{АЭУ}$.

Следует отметить, что эквивалентность критериев (совпадение резуль-

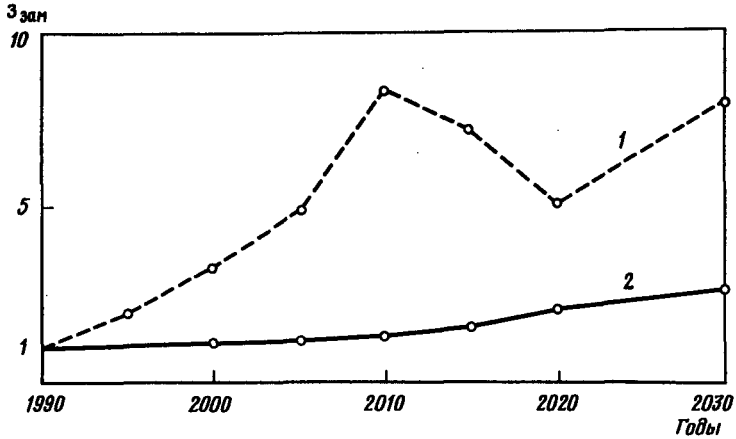


Рис. 5.2. Иллюстрация изменения во времени замыкающих затрат $з_{зам}$ на природный уран и плутоний относительно уровня 1990 г.
1 – плутоний; *2* – уран

татов оптимизации) обеспечивается лишь при расчете приведенных затрат $\hat{З}_i^{АСТ}$ с учетом динамики развития системы АСТ. В случае расчета этих затрат без учета указанной динамики, т.е. при "статической" постановке задачи оптимизации параметров АСТ, результаты оптимизации могут оказаться различными. Это объясняется весьма существенными изменениями замыкающих затрат на производство урана и плутония во времени (рис. 5.2). Отсюда следует важность динамической постановки задачи оптимизации топливных показателей АСТ и других типов АЭУ.

Рассмотренный выше пример показывает, что использование математической модели развивающейся системы АЭУ в задаче экономического сравнения ряда значений вектора топливных параметров АСТ позволяет решать эту задачу с учетом эффектов в оптимально развивающейся системе АЭУ.

5.2. Модели электроэнергетических систем

ТЭЦ, являясь комплексным объектом, должна рассматриваться не просто как элемент системы централизованного теплоснабжения, но и как объект электроэнергетической системы. ТЭЦ как элемент двух систем естественно требует совместной оптимизации развития этих двух систем. При этом возможны два принципиальных подхода к решению данной задачи: 1) создание единой модели, охватывающей развитие тепло- и электроснабжающих систем; 2) раздельная оптимизация систем с итеративной увязкой результатов решения.

В настоящее время использование первого подхода возможно только на уровне развития отдельного энергоузла, поскольку на этом уровне реально имеются системы электро- и теплоснабжения. На более высоких иерархических уровнях (район, страна) системы теплоснабжения отсутствуют (см. рис. 2.2). Попытка реализации первого подхода, например, на уровне района приводит к необходимости одновременного решения

совокупности локальных задач (оптимизация систем тепло- и электроснабжения отдельных узлов) и более общей задачи (оптимизация систем электроснабжения района). Размерность задачи, особенно при ее динамической постановке, становится очень большой, что затрудняет ее решение. Поэтому в настоящее время практически используется итеративное решение двух изолированных задач развития тепло- и электроснабжения.

Развитие электроэнергетики в отличие от других отраслей промышленности и народного хозяйства имеет ряд особенностей, предопределяющих решение круга задач, необходимых для нахождения рациональных путей ее развития. К числу этих особенностей, в первую очередь необходимо отнести:

тесную взаимосвязь отдельных электропредприятий друг с другом при удовлетворении потребителей народного хозяйства в электрической энергии. Эта взаимосвязь предопределяет необходимость одновременного создания энергопредприятий различного типа: базисных и пиковых, а также полупиковых электростанций;

неразрывность процессов производства и потребления электроэнергии, предопределяющая необходимость создания резервных мощностей;

большой срок от начала проектирования и строительства энергообъектов до момента вывода их из эксплуатации, что приводит к необходимости предусматривать изменение в динамике роли и режимов работы создаваемых энергообъектов;

чрезвычайно большая капиталоемкость электроэнергетики и большая доля эксплуатационных расходов на станциях с органическим и ядерным топливом, приводящая к необходимости рассмотрения их взаимоотношения в динамике.

Определение рациональных путей развития электроэнергетики в силу ее тесной взаимосвязи с другими отраслями промышленности и народного хозяйства, а также из-за целого комплекса внутренних изменяющихся во времени параметров, которые подчас характеризуются нелинейными взаимосвязями, является весьма сложной динамической задачей. Особую сложность в ее решении придает и то, что целый ряд параметров, такие, например, как режим электропотребления и показатели работы ГЭС, являются вероятностными. Выбор оптимальной структуры генерирующих мощностей ЭЭС — одна из основных задач перспективного развития электроэнергетики. В общем виде под структурой генерирующих мощностей ЭЭС понимаются пропорции в развитии типов электростанций (КЭС и ТЭЦ на различных видах органического топлива, ГЭС, АЭС и АТЭЦ, специализированных пиковых и полупиковых электростанций) и режима их работы.

Правильное решение задачи выбора структуры генерирующих мощностей может быть получено только на основе комплексного анализа ЭЭС в целом с учетом их как внутренних, так и внешних взаимосвязей. В Советском Союзе накоплен опыт разработки и применения для этих целей экономико-математических моделей (см. например, [44—46]). Наиболее разработанными являются модели, в которых нелинейные зависимости представлены в форме их линейно-кусочной аппроксимации. В ЭНИН им. Г.М. Кржижановского разработана модель оптимизации перспектив-

ной структуры ЭЭС, по которой производится выбор оптимального варианта размещения, последовательности сооружения и развития электростанций и межсистемных передач, а также режим их использования за расчетный период. Модель построена по блочной схеме. Каждый блок соответствует определенному временному этапу развития системы. Отдельные блоки соединены связующими уравнениями, позволяющими учитывать в динамике любые колебания рабочих мощностей электростанций и потоков по межсистемным связям. ЭЭС представляются в модели в виде отдельных узлов нагрузки, соединенных между собой электрическими связями. К каждому энергоузлу привязывается потребность в электрической мощности и энергии, существующие генерирующие мощности и возможные в будущем. Как существующие, так и вновь сооружаемые электростанции группируются по типам и мощности оборудования и по видам используемого топлива. Для более полного учета режима электропотребления и выявления соотношений в мощности различных типов электростанций график нагрузки энергоузлов может разбиваться на зоны. В качестве критерия оптимальности принят минимум суммарных приведенных затрат по электростанциям и межсистемным связям за расчетный период.

При разработке экономико-математической модели выбора оптимальной структуры генерирующих мощностей в условиях раздельной оптимизации систем электро- и теплоснабжения были приняты следующие допущения:

мощность и выработка электроэнергии на ТЭЦ принимаются заданными, затраты на их сооружение, расход и стоимость топлива, а также другие эксплуатационные затраты не учитываются, так как масштабы развития и режимы работы ТЭЦ определяются в задаче оптимизации развития теплоснабжения потребителей;

соотношения мощностей АЭС с различными типами реакторов определяются в задаче оптимизации структуры развивающейся системы АЭС (см. разд. 5.1). Здесь определяются общие масштабы развития АЭС и требования к режиму их использования с учетом их стоимостных показателей;

величина и размещение резерва мощности и энергии определяются в самостоятельной задаче [47]. Взаимное влияние определения структуры мощности и надежности работы ЭЭС предлагается учитывать в ходе итерационного процесса решения двух задач;

сроки и объемы демонтажа и реконструкции устаревшего оборудования в настоящей задаче не оптимизируются и принимаются заданными по интервалам времени.

Формулировка задачи выбора структуры генерирующих мощностей электроэнергетических систем: по критерию минимума приведенных затрат определить мощности различных типов электростанций (гидроэлектростанций, конденсационных и теплофикационных на органическом и ядерном топливах) и режимы их использования, величины и направления перетоков мощности и энергии, потребность в различных видах топлива за расчетный период развития энергосистем.

Экономико-математическая модель, созданная для решения этой задачи, включает:

целевую функцию

$$\min \sum_t A_t \Bigg[\sum_{jfdlh} c_{jd}(x_{jfdlht} + \alpha_{jfdt}) + \sum_{ulh} c_u(z_{lhut} + q_{lhut} + \beta_{ut}) +$$

$$+ \sum_{jfdlh} \mathrm{E_н}\, k_{jd}\, x_{jfdlht_1} + \sum_{ulh} \mathrm{E_н}\, k_u\, q_{lhut_1} + \sum_{jfd} \mathrm{E_н}\, k_{jd}\, \gamma_{jfdt} +$$

$$+ \sum_U \mathrm{E_н}\, k_u\, \rho_{ut} + \sum_{jfdlh} c^{\mathrm{т}}_d\, b_{jdh}\, \tau_{jl}(x_{jfdlht} + x^{\mathrm{н}}_{jfdlht}) \Bigg] + C^{\mathrm{н}}_j + C^{\mathrm{н}}_u; \qquad (5.9)$$

условия (ограничения) модели

1) покрытие нагрузки соответствующей зоны графика в период годового максимума:

$$\sum_{dh} \Bigg\{ \sum_j (x_{jfdlht} + x^{\mathrm{н}}_{jfdlht}) + \sum_{f'u} [(1 - r_{f'fu})(z_{f'flhut} + q_{f'flhut}) -$$

$$- z_{ff'lhut} - q_{ff'lhut}] \Bigg\} \geqslant P_{flt}; \qquad (5.10)$$

2) покрытие годовой потребности в электроэнергии соответствующей зоны графика нагрузки

$$\sum_{dh} \Bigg\{ \sum_j \tau_{jdlh}(x_{jfdlht} + x^{\mathrm{н}}_{jfdlht}) + \sum_{f'u} \tau_{lhu} [(1 - r_{f'fu})(z_{f'flhut} +$$

$$+ q_{f'flhut}) - z_{ff'lhut} - q_{ff'lhut}] \Bigg\} = W_{flt}; \qquad (5.11)$$

3) согласование потребностей в объемах и видах топлива, используемых на электростанциях и выделяемых электроэнергетике по условиям развития топливных отраслей:

$$\sum_{jflh} b_{jdh}\, \tau_{jdl}\, x_{jfdlht} \leqslant B_d; \qquad (5.12)$$

4) использование мощности существующей электростанции:

$$\sum_{lh} x_{jfdlht} \leqslant N_{jfdt}; \qquad (5.13)$$

5) согласование потребности энергосистемы в энергетическом оборудовании с возможностями его производства энергетическим машиностроением:

$$\sum_{flh} x^{\mathrm{н}}_{jfdlht} \leqslant N^{\mathrm{об}}_{jdt}; \qquad (5.14)$$

6) согласование мощности электростанции, участвующей в покрытии базисной зоны графика нагрузки, с мощностью минимально допустимой по возможности разгрузки станции:

$$\sum_h x_{jfdl_1ht} \geqslant S_{jfdl_1t}, \qquad (5.15)$$

$$\sum_h x^{\mathrm{н}}_{jfdl_1ht} \geqslant S_{jfdl_1t}; \qquad (5.16)$$

7) выработка на существующей ГЭС равна заданной, а для новых — меньше или равна заданной:

$$\sum_{lh} \tau_{jl}\, x_{jflht} = \Э^{\mathrm{с}}_{jft}, \qquad (5.17)$$

$$\sum_{lh} \tau_{jl}\, x^{\mathrm{н}}_{jflht} \leqslant \Э^{\mathrm{н}}_{jft}; \qquad (5.18)$$

8) выработка ГЭС на обязательном попуске воды в нижний бьеф:

$$\tau_{l_1} x_{jfl_1 ht} \geqslant \Э^{\text{п}}_{jft} \qquad (5.19)$$

(это условие учитывается в модели только для существующих ГЭС);

9) использование пропускной способности существующих ЛЭП:

$$\sum_{lh} z_{ff'lhut} \leqslant N_{ff'ut}; \qquad (5.20)$$

10) ограничение по вводу новых ЛЭП:

$$\sum_{lh} q_{ff'lhut} \leqslant N_{ff'ut}; \qquad (5.21)$$

11) обеспечение обязательного учета капитальных вложений для объектов, вводимых в интервале $t > 1$, и постоянной части эксплуатационных издержек для временно недоиспользуемых их мощностей в данном интервале:

а) для вновь сооружаемых электростанций

$$\sum_{lh} (x^{\text{н}}_{jfdlht} - x^{\text{н}}_{jfdlh,\,t+1}) + \gamma_{jfd,\,t+1} - \alpha_{jfd,\,t+1} = 0, \qquad (5.22)$$

б) для вновь сооружаемых ЛЭП

$$\sum_{lh} (q_{ff'lhut} - q_{ff'lhu,\,t+1}) + \rho_{ff'u,\,t+1} - \beta_{ff'u,\,t+1} = 0. \qquad (5.23)$$

В выражениях (5.9)—(5.23) приняты следующие обозначения:

И н д е к с ы: $f = \overline{1, F}$ — узел нагрузки (f' — смежный с узлом f); $j = \overline{1, J}$ — электростанция (или группа станций); $l = \overline{1, L}$ — зона графика нагрузки (l_1 — базисная зона); $h = \overline{1, H}$ — верхняя или нижняя граница числа часов использования нагрузки в соответствующей зоне графика по ее продолжительности: $d = \overline{1, D}$ — вид топлива; $u = \overline{1, U}$ — напряжение ЛЭП; $t = \overline{1, T}$ — временной интервал периода прогнозирования T.

О п т и м и з и р у е м ы е п е р е м е н н ы е: $x, x^{\text{н}}$ — мощность, участвующая в покрытии максимума графика нагрузки существующей и вновь сооружаемой электростанции; z, q — поток мощности по существующей и вновь сооружаемой ЛЭП; γ, ρ — вводы мощности соответственно на вновь сооружаемых электростанциях и новых ЛЭП; α, β — недоиспользование мощности и пропускной способности ЛЭП, введенных ранее;

З а д а н н ы е в е л и ч и н ы: b — удельный расход топлива на электростанции; B — объем топлива, выделяемый электроэнергетике, по условиям развития топливных отраслей; τ — число часов использования располагаемой мощности станции и потока мощности по ЛЭП; r — коэффициент потерь мощности в ЛЭП; P — годовой максимум нагрузки; W — годовое электропотребление; N — располагаемая мощность существующей электростанции (пропускная способность межсистемной связи); $\Э^{\text{с}}, \Э^{\text{н}}$ — выработка существующей и сооружаемой ГЭС; $\Э^{\text{п}}$ — выработка ГЭС на обязательном попуске воды в нижний бьеф; $N^{\text{об}}$ — возможный объем ввода энергетического оборудования на новых электростанциях; S — минимально допустимая рабочая мощность электростанции по условиям ее маневренности; c — удельная постоянная часть эксплуатационных издержек на электростанции и ЛЭП; $c^{\text{т}}$ — удельная стоимость топлива, используемого

на электростанции; K – удельные капиталовложения в электростанцию и ЛЭП; $C^{н}$ – издержки нормальной эксплуатации на электростанции и ЛЭП; A_t – коэффициент, учитывающий разновременность приведенных затрат в динамике развития ЭЭС.

В результате решения задачи по каждому энергоузлу определяются: использование мощности существующих электростанций, участвующих в покрытии годового максимума нагрузки; вводы на новых электростанциях; режимы работы существующих и новых электростанций; величины и направления потоков мощности и энергии по межсистемным связям; расходы используемых видов топлива; потребность в энергетическом оборудовании.

Анализ перспектив развития электроэнергетики позволяет сделать выводы об обострении проблемы покрытия пиковой части суточного графика нагрузки и прохождения ночных его провалов, особенно в графиках нагрузки воскресных дней. Одним из способов преодоления этих трудностей является придание маневренных свойств ТЭЦ, работающих на органическом топливе. Последнее, естественно, может повысить конкурентоспособность ТЭЦ на органических видах топлива по сравнению с источниками теплоты на ядерном топливе, в том числе и по сравнению с АТЭЦ.

В принципе возможны два режима работы ОТЭЦ при их участии в регулировании графика нагрузки: 1) снижение нагрузки в часы минимума при оставлении неизменной нагрузки в максимальные часы и 2) снижение нагрузки в часы минимума при одновременном ее повышении в часы максимума. В развивающихся ЭЭС удельный вес ОТЭЦ в суммарных вводах мощностей достаточно велик (15–20%), поэтому при обосновании эффективности сооружения маневренных ОТЭЦ необходимо более полно учитывать структурные и режимные изменения в ЭЭС.

В связи с переходом работы ОТЭЦ в режим регулирования графика нагрузки изменяется выработка электроэнергии на других электростанциях ЭЭС, режим работы оборудования, структура ввода мощностей. На маневренных ОТЭЦ по сравнению с ОТЭЦ, работающими по тепловому графику, также изменится расход условного топлива и затраты.

Представляется важным исследование зависимости приведенных затрат в ЭЭС от масштабов регулирования мощности на ОТЭЦ. В ЭНИН им. Г.М. Кржижановского проведена оценка разгрузки ОТЭЦ для объединения, состоящего из ЭЭС, которые по масштабам, режимам электропотребления и составу генерирующих мощностей близки к отдельным ЭЭС европейской части СССР. Эффект от повышения маневренных свойств ОТЭЦ заданной электрической мощности определялся сопоставлением приведенных затрат в сравниваемых вариантах. В качестве альтернативных рассматривались базисный и маневренные режимы использования ОТЭЦ в объединении для покрытия графиков электрической и тепловой нагрузки.

Расчетные условия этих вариантов приняты следующие: базисный вариант – работа ОТЭЦ в ЭЭС по графику тепловых нагрузок с естественной разгрузкой ночью на 15% турбин типа ПТ и Т; вариант маневренного режима: принудительная разгрузка ОТЭЦ с турбинами типа Т мощностью 100 МВт и более в диапазоне от 20 до 80% в выходные дни отопительного периода и в часы провала графика электрических нагрузок в рабочие дни.

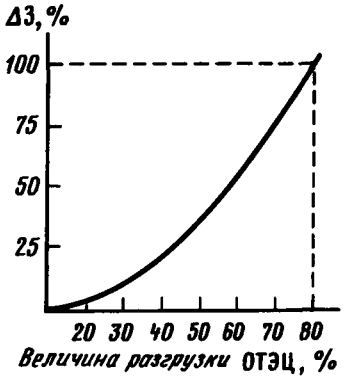


Рис. 5.3. Изменение прироста приведенных затрат в электроэнергетической системе ΔЗ от глубины принудительной разгрузки ОТЭЦ

При таком режиме разгрузки продолжительность ее составляет примерно 2000 ч в год.

При решении данной задачи использовалась описанная выше экономико-математическая модель. ОТЭЦ рассматривались в модели как источник заданной электрической мощности; изменение расхода топлива и затрат на ней при изменении режима работы не учитывалось, так как изменение этих характеристик ОТЭЦ учтено в модели СЦТ. График электрической нагрузки по продолжительности разбивался на три зоны: пиковую, полупиковую и базовую.

Как показали расчеты, разгрузка ОТЭЦ приводит к изменению их участия в покрытии отдельных зон графика электрической нагрузки и сокращению суммарной выработки на них, что влечет за собой изменение структуры вводов новых генерирующих мощностей энергосистемы, режимов использования действующего оборудования, расхода и структуры потребляемого топлива. Расчеты, проведенные для разной глубины разгрузки ОТЭЦ, показалн, что при принятых допущениях и технико-экономических показателях разгрузка ОТЭЦ вызывает дополнительные приведенные затраты в объединении (рис. 5.3).

Следует подчеркнуть, что данный результат характеризует влияние принудительной разгрузки ОТЭЦ на величину приведенных затрат по всем типам электростанций ЭЭС, кроме изменений, происходящих при этом на самой ОТЭЦ.

Глава шестая

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АСТ И АСПТ

6.1. Постановка задачи

Достижение максимального экономического эффекта при массовом строительстве АСТ и АСПТ требует выполнения технико-экономических исследований для выбора значений параметров, профиля оборудования и технологической схемы АСТ и АСПТ. Сложность решения этой задачи

определяется тем, что АСТ или АСПТ как объект технико-экономических оптимизационных исследований должна рассматриваться, с одной стороны, как сложная техническая система, состоящая из конструктивно сложного основного оборудования и многочисленного вспомогательного оборудования, объединенных технологической схемой. Для этой системы характерна весьма тесная взаимосвязь процессов преобразования, передачи и распределения разных видов энергии, изменения параметров состояния и расходов рабочих тел, теплоносителей, ядерного горючего. С другой стороны АСТ или АСПТ выступает в качестве элемента систем теплоснабжения и ядерной энергетики, а при более широком рассмотрении – элемента энергетического комплекса страны (см. разд. 2.3).

Условия развития систем теплоснабжения городов, промышленных центров и отдельных крупных производств оказывают определяющее влияние на основные решения по АСТ и АСПТ. Именно на этом уровне формируются требования к АСТ и АСПТ в части величины отбора теплоты, вида и параметров теплоносителя, режимов теплопотребления. Условия развития системы ядерной энергетики существенно влияют на основные решения по АСТ и АСПТ в части их нейтронно-физических характеристик. Наконец, решения по энергетическому комплексу страны обусловливают долгосрочную стратегию использования ядерного горючего, долю АСТ и АСПТ в общей выработке тепловой энергии. Это, в свою очередь, влияет на выбор энергетических и нейтронно-физических характеристик АСТ и АСПТ.

С учетом этих принципиальных положений рассмотрим объекты исследования, методы их математического моделирования и оптимизации.

АСТ предназначена для выработки тепловой энергии только для нужд отопления и горячего водоснабжения. Для АСТ предусматривается применение водо-водяного корпусного кипящего реактора с естественной циркуляцией и интегральной компоновкой оборудования. Такой реактор позволяет создать теплоснабжающую установку, размещаемую в непосредственной близости от потребителей теплоты. На первых АСТ в СССР будет применен реактор типа АСТ-500 тепловой мощностью 500 МВт с отпуском теплоты до 1800 ГДж/ч. Реактор АСТ-500 предназначен для работы в двухконтурной схеме АСТ (см. рис. 1.6, *а*) с выдачей теплоты горячей водой (до 150 °С) в третьем сетевом контуре. Первый контур радиоактивный, второй нерадиоактивный. При давлении в первом контуре 1,6 МПа, во втором принимается давление 1,2 МПа, а в третьем – 1,6 МПа. Теплоноситель во всех трех контурах – вода [13,16, 48].

АСПТ вырабатывает тепловую энергию в виде пара и горячей воды, т.е. этот тип АИТ способен покрывать как отопительную (в горячей воде), так и промышленную (паровую) тепловые нагрузки. На АСПТ также будет устанавливаться корпусной водо-водяной реактор. Однако ввиду необходимости производства на АСПТ кроме горячей воды также технологического пара давлением 2 МПа реактор для АСПТ должен иметь более высокое, чем для АСТ, давление, равное примерно 5 МПа. Предварительные расчеты показывают, что для АСПТ с указанными параметрами возможно и целесообразно создание транспортабельного реактора тепловой мощностью 500 МВт с суммарным отпуском теплоты в горячей воде и паре до 1800 ГДж/ч. На рис. 1.6, *б* приведена одна из возможных схем выдачи теплоты от АСПТ. Пар промышленной нагрузки выдается в третьем

контуре после парогенераторов с давлением 2 МПа. Для выдачи горячей воды имеется четвертый контур [16].

Из рис. 1.6 легко видеть, что технологическая схема АСПТ содержит все элементы технологической схемы АСТ. В этом смысле технологическую схему АСТ можно представить как частный случай технологической схемы АСПТ, в которой отсутствует промышленная паровая нагрузка.

Указанное соотношение технологических схем АСТ и АСПТ использовано при построении математических моделей атомных станций теплоснабжения. Все разработки ведутся для наиболее полной технологической схемы, т.е. для схемы АСПТ. Математическая модель АСТ может быть получена путем исключения из математической модели АСПТ лишних элементов и технологических связей. Аналогично задача оптимизации формируется применительно к наиболее сложному объекту – АСПТ.

В наиболее полной постановке задача комплексной оптимизации АИТ включает оптимизацию параметров вида технологической схемы, термодинамических и расходных параметров технологической схемы, физических параметров реактора, а также конструктивно-компоновочных параметров оборудования при учете внешних и внутренних связей.

Под видом (структурой) технологической схемы АСПТ понимается состав элементов и их взаимосвязей, реализующих процессы получения пара и горячей воды нужных параметров. К термодинамическим параметрам АСПТ относятся: параметры теплоносителя на выходе из активной зоны, параметры греющего теплоносителя на входе и выходе парогенераторов и теплообменников, параметры нагреваемого теплоносителя по тракту нагрева (кроме выходных значений, которые заданы). Совокупность расходных параметров задает значения расходов пара и воды по всем элементам оборудования и технологическим связям установки.

В реакторе оптимизируются начальное обогащение горючего, теплонапряженность активной зоны, уплощение, скорость теплоносителя, глубина выгорания, подогрев теплоносителя в реакторе и т.д. Конструктивные параметры включают формы, материалы и параметры конструкций отдельных элементов оборудования. Совокупность компоновочных параметров определяет взаимное пространственное расположение элементов оборудования и агрегатов относительно друг друга.

При оптимизации АСПТ приходится иметь дело с системой ограничений в форме равенств и неравенств. Важность технических ограничений в процессе оптимизации следует особо подчеркнуть, так как только в этом случае возможно получение наилучшего экономического решения, в полной мере учитывающего специфику технического выполнения и использования энергетической установки. Система ограничений, которую необходимо учитывать, складывается из ряда подсистем. Многие параметры АСПТ имеют заданный диапазон возможного их изменения. Ограничения могут быть наложены на характеристики отдельных элементов оборудования установки в соответствии с требованием возможности их изготовления и длительной надежности в процессе эксплуатации. Наконец, имеется система балансовых уравнений для всех элементов установки, которая связывает между собой термодинамические и расходные параметры, а также технологические характеристики процессов.

Как отмечалось, задача оптимизации технологической схемы и пара-

метров АСПТ в математическом отношении является статической, так как оптимизируемые номинальные параметры и характеристики проектируемой установки не меняются во времени. Вместе с тем при оценке экономического эффекта от ввода и использования оптимизируемой энергетической установки за многолетний период ее эксплуатации необходимо учитывать возможные изменения условий работы установки. При этом, естественно, чем более отдаленный период рассматривается, тем больше неоднозначность условий эксплуатации. В ряде случаев существенные изменения условий развития системы ядерной энергетики могут потребовать модернизации активной зоны реактора с изменением таких ее характеристик, как вид ядерного горючего, степень обогащения, конструкция ТВЭЛов и сборок и т.п.

Важным этапом постановки любой задачи оптимизации является определение конечной цели ее решения. Применительно к АСПТ главная цель решения таких задач – минимизация приведенных затрат на получение заданных объемов тепловой энергии от АСПТ при выполнении всех внешних и внутренних ограничительных условий ее сооружения и функционирования.

Проведенный анализ АСПТ показывает нелинейность зависимостей выражения критерия эффективности и ограничений как функций оптимизируемых параметров. Некоторые из оптимизируемых параметров изменяются дискретно. Из этого следует, что решаемая задача относится к классу весьма сложных задач нелинейного дискретного программирования. С учетом этого обстоятельства было бы неправильным разрабатывать для АСПТ единую математическую модель и пытаться в этой одной модели учитывать и одновременно исследовать весь сложнейший комплекс связей, реально существующих в данной установке. Такой подход привел бы к трудностям, связанным с необходимостью решения очень сложной задачи большой размерности.

К числу плодотворных методов в теории математического моделирования относятся методы декомпозиции, предусматривающие расчленение задачи на ряд подзадач, решение каждой подзадачи независимо и последующую координацию полученных решений (см. разд. 3.2). В рассматриваемой задаче целесообразно расчленить АСПТ по функциональному признаку на две части: реакторную (РЧ) и теплотехническую (ТТЧ) (см. рис. 1.6, *б*). К реакторной части АСПТ относится реактор и связанные с ним устройства, к теплотехнической части – теплообменники, парогенераторы, насосы второго контура и т.п.

При указанном разделении АСПТ на две части оказалась разрезанной весьма сильная связь между активной зоной реактора и теплообменником I–II контуров. Однако эта связь характеризуется малым числом параметров – всего четырьмя (например, мощностью активной зоны, расходом теплоносителя I контура, температурой и давлением теплоносителя на входе в активную зону). Соответственно задача координации двух частных решений достаточно проста.

Оптимизация параметров АСПТ в такой постановке производится итерационно. Модель верхнего уровня координирует решение задач на нижних уровнях для получения оптимального решения полной задачи (рис. 6.1): на нижний уровень выдаются значения параметров связи, а на верхний

уровень поступают результаты решения задач нижнего уровня. При этом может быть до минимума сокращено количество информации, передаваемой между уровнями, поскольку на верхний уровень может передаваться не вся информация о состоянии всех элементов нижнего уровня, а лишь приведенные затраты по частям АСПТ. Соответственно математическая модель верхнего уровня – модель АСПТ – получается очень простой.

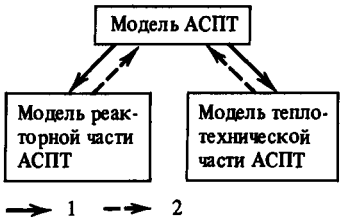


Рис. 6.1. Схема взаимодействия моделей АСПТ и ее частей при решении полной задачи оптимизации АСПТ
1 – прямые связи; *2* – обратные связи

В указанной постановке задача оптимизации АСПТ формулируется следующим образом:

необходимо минимизировать нелинейную функцию цели

$$З = \sum_{i=1}^{n} З_i[X_i, W, Y_i(X_i, W)]_{A_0} \tag{6.1}$$

при ограничениях

$$\Phi_i[X_i, W, Y_i(X_i, W)]_{A_0} = 0, \tag{6.2}$$

$$F_i^* \leqslant F_i[X_i, W, Y_i(X_i, W)]_{A_0} \leqslant F_i^{**}, \tag{6.3}$$

$$Y_i^* \leqslant Y_i[X_i, W, Y_i(X_i, W)]_{A_0} \leqslant Y_i^{**}, \tag{6.4}$$

$$X_i^* \leqslant X_i \leqslant X_i^{**}, \tag{6.5}$$

$$W^* \leqslant W \leqslant W^{**}. \tag{6.6}$$

Здесь З – функция цели (в нашем случае – приведенные затраты); X_i – независимые параметры i-й подзадачи; Y_i – зависимые параметры i-й подзадачи; W – параметры связи выделенных подзадач; Φ_i – совокупность балансовых уравнений i-й подзадачи; F_i – технологические характеристики для элементов i-й части АСПТ, по которым задаются ограничивающие условия; одна и две звездочки в индексах отмечают соответственно минимально и максимально допустимые значения; A_0 – совокупность заданных характеристик внешних условий; i и n – номер и число частей АИТ, в нашем случае $n = 2$.

При фиксированном значении вектора параметров связи W частей АСПТ подзадачи оптимизации внутренних параметров отдельных частей АСПТ могут решаться независимо и для каждой из них задача оптимизации может быть записана в виде: минимизировать

$$V_i(W) = З_i[X_i, W, Y_i(X_i, W)]_{A_0} \tag{6.7}$$

при ограничениях вида (6.2) – (6.5).

Значение функции $V_i(W)$ представляет собой приведенные затраты по каждой i-й части АИТ и может выступать в качестве характеристики i-й части.

Для решения задачи комплексной оптимизации АСПТ в целом необходимо решить координирующую задачу:

найти

$$\min V(W) = \sum_{i=1}^{n} V_i(W)_{A_0}. \qquad (6.8)$$

Задача (6.8) эквивалентна ранее сформулированной задаче (6.1) при ограничениях вида (6.2)–(6.6), а значение функции $V(W)$ представляет суммарные затраты по всей АСПТ.

Описание математических моделей реакторной и теплотехнической частей АСПТ, метода и алгоритма оптимизации параметров АСПТ приведено в разд. 6.2–6.4.

При разработке методики технико-экономического анализа и комплексной оптимизации АСПТ исключительно большое значение имеет учет надежности объекта и неполноты исходной информации. Указанные вопросы рассмотрены в разд. 9.3 и 10.2 соответственно.

6.2. Математическая модель реакторной части

В основу формирования математической модели реакторной части АСПТ положен принцип модульного программирования. Формирование программных модулей (блоков) происходит по функциональному признаку, при котором каждый отдельный блок решает свою отдельную задачу, а все вместе решают задачу комплексной оптимизации РЧ АСПТ. Математическая модель РЧ АСПТ состоит из нескольких блоков, связанных между собой строгой последовательностью расчета (рис. 6.2).

Совокупность независимых оптимизируемых параметров формируется по результатам всестороннего анализа АСПТ как объекта исследования. Выбраны следующие независимые оптимизируемые параметры: $d_{\text{твэл}}$ – наружный диаметр ТВЭЛов; h – относительный шаг расположения ТВЭЛов в треугольной решетке; β – отношение диаметра активной зоны (АЗ) к высоте АЗ (уплощение); $L_{\text{твэл}}$ – количество ТВЭЛов в тепловыделяющей сборке (ТВС); $L_{\text{ТВС}}$ – количество ТВС в АЗ реактора; $t_{\text{вх}}$ – температура воды на входе в АЗ реактора; G_R – расход теплоносителя в I контуре АСПТ; $P_{\text{вх}}$ – давление воды на входе в АЗ реактора; Q_R – тепловая мощность АЗ реактора; n_a – количество перегрузок за кампанию ядерного топлива; x^5 – начальное обогащение ядерного топлива изотопом ^{235}U.

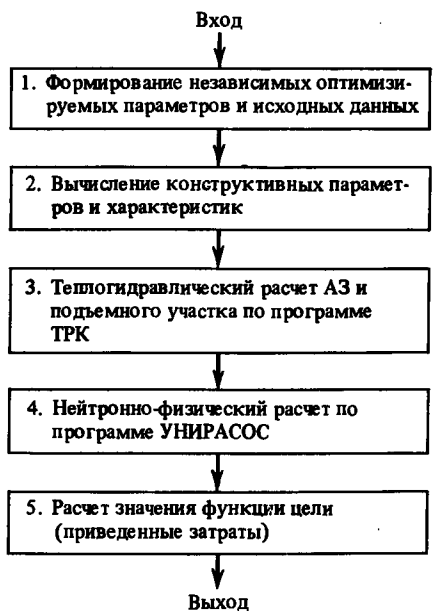


Рис. 6.2. Блок-схема расчета РЧ АСПТ

Из перечисленных независимых оптимизируемых параметров параметры G_R, Q_R, $t_{вх}$, $P_{вх}$ обеспечивают связь с теплотехнической частью АСПТ. Параметр Q_R также является параметром связи с системой теплоснабжения. Взаимосвязь РЧ АСПТ с системой ядерной энергетики обеспечивается параметрами $L_{ТВЭЛ}, L_{ТВС}, h, \beta, Q_R, n_a, x^5$.

Исходные данные, которые в процессе оптимизации не меняются, условно можно разделить на две группы: экономические и конструктивно-технологические. К экономическим исходным данным отнесены стоимостные показатели ядерного топлива и конструкционных материалов, стоимости изготовления элементов РЧ и т.п. Конструктивно-технологические исходные данные включают параметры конструктивно-компоновочных решений, характерных для данного типа установки, нейтронно-физические константы АЗ и т.п.

В блоке вычисления конструктивных параметров и характеристик выполняется конструктивно-прочностной расчет основного корпуса реактора, определяются геометрические и весовые характеристики активной зоны, внутрикорпусных элементов строительной части реакторного отделения и других элементов.

Теплогидравлический расчет АЗ реактора проводится для определенного отдельного тепловыделяющего канала. Расчет выполняется при следующих допущениях: течение теплоносителя в канале одномерное, т.е. все его параметры рассчитываются только как функции координаты z, где z – координата вдоль оси канала в направлении движения теплоносителя; перенос тепла в осевом направлении по горючему и оболочке ТВЭЛа считается малым по сравнению с радиальным переносом. Теплогидравлический расчет канала делается при заданных геометрии канала, его тепловой мощности, температуре и давлении теплоносителя на входе в канал и синусоидальном законе распределения тепловыделения по высоте канала.

Для расчетов РЧ и ТТЧ создана программа определения свойств воды и водяного пара по уравнениям. В зависимости от заданных параметров p и t, p и i, p и v, p и s, p и x могут быть определены величины v, s, x и t в любом сочетании. Здесь v – удельный объем, s – энтропия, x – относительная энтальпия. Величины коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности определяются по уравнениям как функции t и v.

Теплогидравлический расчет активной (тепловыделяющей) части канала сводится к решению следующей совокупности балансовых уравнений, которые характеризуют условия сохранения энергии, количества движения и вещества при тепловых процессах, происходящих в активной зоне реактора [49, 50]:

$$\frac{dx}{dz} = \frac{q(z)\Pi_{об}}{rG_к},$$

$$\frac{d\Delta p}{dz} = \frac{1}{2\rho_т}\left(\frac{G_к}{S_{пр}}\right)^2\left\{\frac{\lambda_{тр}}{d_г} + 2\rho_т\frac{dA(z)}{dz} + f_{тр}\right\} + \rho_т g, \qquad (6.9)$$

$$\kappa = \frac{i - i' + (i + i' - 2i_в)\exp[-2(i - i_в)/(i' - i_в)]}{r + (i + i' - 2i_в)\exp[-2(i - i_в)/(i' - i_в)]},$$

где x – относительная энтальпия теплоносителя в сечении канала с координ-

натой z; r – теплота парообразования; $q(z)$ – плотность теплового потока с боковой поверхности ТВЭЛов в сечении z; $П_{об}$ – обогреваемый периметр канала; $G_к$ – массовый расход теплоносителя через канал; Δp – перепад давления между входом в активную часть канала и рассматриваемым сечением канала z; $S_{пр}$ – проходное сечение канала; $\rho_т$ – средняя плотность теплоносителя в сечении z; $\lambda_{тр}$ – коэффициент трения в сечении z; $d_г$ – гидравлический диаметр канала; g – ускорение свободного падения; i – средняя энтальпия потока в рассматриваемом сечении z; i' и i'' – энтальпии потока на линии насыщения водяной и паровой фаз; $f_{тр}$ – функция, учитывающая местные сопротивления дистанционирующих устройств; κ – массовое расходное паросодержание; $i_в$ – энтальпия потока в точке начала интенсивного роста истинного объемного паросодержания теплоносителя; $A(z)$ – функция, характеризующая изменение давления из-за ускорения потока. Функция $A(z)$ представлена в следующем виде:

$$A(z) = \frac{\kappa^2}{\rho_п \varphi} + \frac{(1-\kappa)^2}{\rho_в (1-\varphi)}, \qquad (6.10)$$

где $\rho_п$ и $\rho_в$ – плотность пара и воды в сечении z; φ – истинное объемное паросодержание теплоносителя.

Энтальпия потока в точке начала интенсивного роста φ определяется по эмпирической зависимости из [49, 50]:

$$\frac{i - i_в}{q(z)} \rho_т w_т = 7{,}5 \left(\frac{q(z) d_{эф}}{r \rho_п \nu'} \right)^{0{,}08} \left(\frac{w_0 d_{эф}}{\nu'} \right)^{0{,}2}, \qquad (6.11)$$

где $d_{эф}$ – эффективный диаметр канала; ν' – кинематическая вязкость на линии насыщения; w_0 – скорость циркуляции теплоносителя, $w_т$ – локальная скорость жидкости.

Интегрирование дифференциальных уравнений, входящих в систему (6.9), производится при следующих граничных условиях на входе в активную зону реактора: $x(0) = x_{вх}$; $\kappa(0) = 0$; $\Delta p(0) = 0$.

Поскольку для необогреваемого тягового участка (тяговый участок над активной зоной) скорость пароводяной смеси обычно мала, то двухфазный поток можно считать квазиравновесным, т.е. $\kappa = x$. Поэтому совокупность балансовых уравнений, которые описывают законы сохранения энергии, вещества и количества движения, для данного участка записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dz} &= \frac{1}{r} \left(\frac{di'}{dp} \right) g[\rho'(1-\varphi) + \rho''\varphi], \\ \kappa &= x, \\ \frac{dp}{dz} &= -g[\rho'(1-\varphi) + \rho''\varphi], \end{aligned} \qquad (6.12)$$

где ρ' и ρ'' – плотность теплоносителя на линии насыщения водяной и паровой фаз тягового участка в сечении z.

Интегрирование дифференциальных уравнений, входящих в систему (6.12), производится при следующих граничных условиях на входе в тяго-

вый участок:

$$x(0) = x_{\text{вых}}^{\text{АЗ}};\ \kappa(0) = \kappa_{\text{вых}}^{\text{АЗ}};\ p(0) = p_{\text{вых}}^{\text{АЗ}},$$

где $x_{\text{вых}}^{\text{АЗ}}$, $\kappa_{\text{вых}}^{\text{АЗ}}$ и $p_{\text{вых}}^{\text{АЗ}}$ – относительная энтальпия, массовое расходное паросодержание и давление на выходе из активной зоны реактора.

Итогом теплогидравлического расчета активной зоны и подъемного участка является:

вычисление основных теплотехнических параметров, которые определяют теплотехническую надежность активной зоны – среднего истинного объемного паросодержания активной зоны $\bar{\varphi}$, истинного объемного паросодержания на выходе из активной зоны $\varphi_{\text{вых}}^{\text{АЗ}}$, значения теплового потока $q(z)$ и его критического значения $q_{\text{кр}}(z)$;

вычисление функции распределения основных теплофизических параметров теплоносителя в активной зоне – $\kappa(z)$, $x(z)$, $t(z)$, $p(z)$;

вычисление средних теплофизических параметров теплоносителя в активной зоне – $\bar{t}$, $\bar{\rho}_{\text{т}}$;

определение возможности осуществления естественной циркуляции в I контуре; для этого вычисляют суммарный перепад давления в активной зоне и подъемном участке – $\Delta p_{\text{общ}}$

Экономичность работы ядерной установки в значительной степени обусловливается эффективностью использования ядерного топлива, характеризуемой достигаемой глубиной выгорания. Загрузку реактора для АСПТ предполагается осуществлять слабообогащенным урановым топливом (до 5% по ^{235}U). Поэтому для расчета глубины выгорания используем методику нейтронно-физического расчета, применяемую для реакторов типа ВВЭР. Расчет совокупности балансовых уравнений, которые характеризуют зависимость нейтронно-физических параметров от средних значений теплофизических параметров в АЗ реактора, ведется по программе УНИРАСОС (универсальный расчет состояний). Данная программа позволяет рассчитывать нейтронно-физические характеристики и их изменения в процессе выгорания ядерного топлива для однородной топливной решетки, составленной из одинаковых кассет, ячеек и ТВЭЛов, т.е. для гомогенизированной решетки данного состава и геометрии [51, 52].

Для оценки эффективности различных режимов перегрузки ядерного топлива вводится понятие идеального режима, при котором выгоревшее топливо постоянно заменяется свежим при непрерывном перемешивании по объему активной зоны с тем, чтобы глубина выгорания была одинаковой для всех выгружаемых кассет [52]. Конструкция реактора для АСПТ, так же как и для ВВЭР, не позволяет осуществить идеальный режим перегрузки, однако с помощью коэффициента проигрыша в глубине выгорания $K_{\text{п}}$ можно сравнивать идеальный и реальный режимы перегрузок топлива

$$K_{\text{п}} = b^{\max}/b^{\text{к}}, \qquad (6.13)$$

где $b^{\max}$ – максимальная глубина выгорания, при которой в идеальном режиме топливо выгружается из реактора; $b^{\text{к}}$ – конечная глубина выгорания выгружаемого топлива в режиме, отличном от идеального.

Для определения глубины выгорания в идеальном режиме b^{max} необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\overline{K_\infty(b)} = \int_0^{b^{max}} K_\infty(b)db \Big/ \int_0^{b^{max}} db, \tag{6.14}$$

$$\frac{K_\infty^н - 1}{M^2} = \left(\frac{3{,}14}{H_э}\right)^2 + \left(\frac{2{,}405}{R_э}\right)^2, \tag{6.15}$$

$$\overline{K_\infty(b)} = K_\infty^н, \tag{6.16}$$

где $\overline{K_\infty(b)}$ – средний коэффициент размножения нейтронов в активной зоне бесконечного реактора; $K_\infty(b)$ – текущее значение коэффициента размножения нейтронов для бесконечного реактора при глубине выгорания b, который с достаточной степенью точности рассчитывается по программе УНИРАСОС; $K_\infty^н$ – коэффициент размножения нейтронов для реактора конечного размера; $H_э$, $R_э$ – эффективные высота и радиус активной зоны критического цилиндрического реактора; M^2 – квадрат длины миграции нейтронов.

Затем рассчитываем $K_п$ по выражению

$$K_п = \theta_z(1 + \theta_r/n_a), \tag{6.17}$$

где $\theta_z = (K_z + 1)/2$; $\theta_r = (K_r + 1)/2$; K_z – коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте АЗ; K_r – коэффициент неравномерности по радиусу АЗ; n_a – количество перегрузок за кампанию ядерного топлива. Для данной методики определения $K_п$ периодическая перегрузка осуществляется пропорционально радиальной составляющей поля энерговыделения. Кассеты в АЗ не переставляются [52].

Затем, зная $K_п$, находим $b^к$. Кампанию ядерного топлива T_a определяем следующим образом:

$$T_a = b^к G_{UO_2}^{мет}, \tag{6.18}$$

где $G_{UO_2}^{мет}$ – количество загружаемого топлива в реактор, пересчитанного для урана металлического.

Итогом нейтронно-физического расчета является вычисление параметров, которые характеризуют размножающие свойства активной зоны за период T_a. К таким параметрам относятся: коэффициент K_∞, характеризующий размножающие свойства активной зоны реактора в начале кампании; мощностной коэффициент реактивности $\partial\left(\frac{K_\infty - 1}{K_\infty}\right)\Big/\partial Q$.

Величины T_a, K_∞ и мощностной коэффициент реактивности в задаче оптимизации РЧ относятся к группе зависимых параметров и для них вводятся ограничения вида (6.4)

$$0 \leqslant T_a \leqslant T^{max}, \tag{6.19}$$

$$K_\infty \geqslant 1, \tag{6.20}$$

$$\partial\left(\frac{K_\infty - 1}{K_\infty}\right)\Big/\partial Q \leqslant 0, \tag{6.21}$$

где T^{max} – максимальная длительность кампании для данных типа ТВЭЛа

и вида топлива, определяемая максимально допустимой глубиной выгорания.

Ограничения (6.20) и (6.21) характеризуют соответственно наличие цепной реакции и саморегулирование мощности в ядерном реакторе.

Завершающим расчетом в математической модели РЧ АСПТ является расчет приведенных затрат по РЧ АСПТ. При этом рассматриваются только те составляющие издержек и капиталовложений, величины которых меняются при изменении параметров реактора. Для сопоставления вариантов выполняется условие неизменности мощности реакторной установки. Изменение внешних системных связей с ТТЧ, с системой теплоснабжения и системой ядерной энергетики происходит: по тепловой энергии – за счет изменения параметров отпускаемой РЧ тепловой энергии; по первичному топливу – за счет величины обогащения и потребления ядерного топлива; по вторичному топливу – за счет изменения количества и качества воспроизведенного топлива.

Таким образом, при варьировании совокупности параметров реактора изменяются следующие показатели РЧ АСПТ:

параметры тепловой энергии, отпускаемой РЧ;

количество и качество первичного и вторичного топлива;

переменная часть приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию РЧ АСПТ.

Переменная часть приведенных затрат включает составляющие капиталовложений и ежегодных издержек эксплуатации. Составляющие капиталовложений включают: стоимость изготовления ТВЭЛов и регулирующих стержней, стоимость используемых в них материалов; стоимость основного корпуса реактора, крышки корпуса реактора, страховочного корпуса реактора; стоимость строительной части реакторного отделения, которая рассчитывается по удельным стоимостям единицы объема строительного сооружения реакторного отделения. Составляющие ежегодных издержек эксплуатации включают: затраты на изготовление ТВЭЛов и регулирующих стержней и затраты на материалы, используемые в них в течение года; затраты на амортизацию и текущий ремонт перечисленного выше оборудования и сооружений РЧ АСПТ.

6.3. Математическая модель теплотехнической части

Технико-экономическая оптимизация ТТЧ АСПТ предполагает оптимизацию структуры технологической схемы, значений термодинамических и расходных ее параметров, а также конструктивно-компоновочных параметров оборудования при заданных внешних условиях и при заданных значениях параметров связи между ТТЧ и РЧ. Соответственно математическая модель ТТЧ имеет два уровня: уровень технологической схемы ТТЧ и уровень элементов оборудования технологической схемы.

Математическая модель технологической схемы ТТЧ, используемая для технико-экономических исследований и оптимизации, включает [20]:

описание схемы соединений отдельных элементов оборудования между собой и внешних связей ТТЧ;

систему балансовых уравнений;

характеристики элементов оборудования;

систему ограничений;

выражение критерия эффективности.

АСПТ, как любая энергетическая установка, характеризуется наличием в ней некоторого числа элементов определенного типа, определенным числом технологических связей между элементами и внешних связей, присутствием замкнутых контуров, образованных обратными связями между элементами. Для АСПТ характерны относительная простота технологических связей и сравнительно небольшое число элементов установки и замкнутых контуров. Основными элементами схемы АСПТ (см. рис. 1.6, *б*) являются: встроенный реакторный теплообменник (ВРТ), парогенератор (ПГ), промежуточный теплообменник (ПТ), сетевой теплообменник вода–вода (СТВ). Для АСТ (см. рис. 1.6, *а*) основные элементы – ВРТ и СТВ. Для приведенных на рис. 1.6 схем основными элементами могут являться и насосы II и III контуров; в случае необходимости можно рассматривать в качестве элементов схемы и вспомогательное оборудование. Однако, как показывает практика оптимизационных исследований, нет необходимости рассматривать в качестве элементов те части технологической схемы, которые либо не меняют своих качеств при различных сочетаниях параметров, тем самым не влияя на положение оптимума, либо влияют очень слабо.

Систему элементов и связей, моделирующих АСПТ, можно представить в виде графа, в котором каждому элементу оборудования соответствует вершина графа, а связям между элементами или с внешними системами – дуги графа. На рис. 6.3 приведены упрощенные технологические схемы двух вариантов ТТЧ АСПТ и соответствующие им графы. Вариант *а* аналогичен приведенному на рис. 1.6 варианту ТТЧ; варнант *б* предусматривает дополнительный по отношению к варианту *а* отпуск пара низких параметров. Для варианта *б* основными элементами схемы являются ВРТ, ПГ, парогенератор низкого давления (ПГН) и сетевой теплообменник с обогревом паром (СТП). Можно видеть, что графы отличаются простотой и наличием всего лишь двух замкнутых контуров и соответственно двух расчетных циклов.

К внешним связям ТТЧ относится связь с РЧ по параметрам двух энергоносителей: влажного пара на выходе из активной зоны и воды на входе в активную зону. При оптимизации ТТЧ эти параметры принимают некое фиксированное значение, соответствующее значению их для одного из вариантов РЧ АСПТ; при оптимизации АСПТ в целом производится по этим параметрам итерационное уточнение результатов оптимизации РЧ и ТТЧ, т.е. эти параметры также принимают оптимальное значение.

Связи с потребителями пара и горячей воды характеризуются термодинамическими и расходными характеристиками энергоносителей отпускаемой АСПТ теплоты; значения их диктуются режимами потребителей отпускаемой теплоты и для выбранного варианта схемы АСПТ принимаются заданными.

Зависимость между параметрами связей ТТЧ можно описать уравнениями баланса энергии для каждого элемента установки, уравнениями баланса расходов, гидравлического баланса и баланса изменения энтальпии для каждого теплоносителя в элементах установки. Система уравнений балансов в элементах ТТЧ устанавливает такое соотношение между термодина-

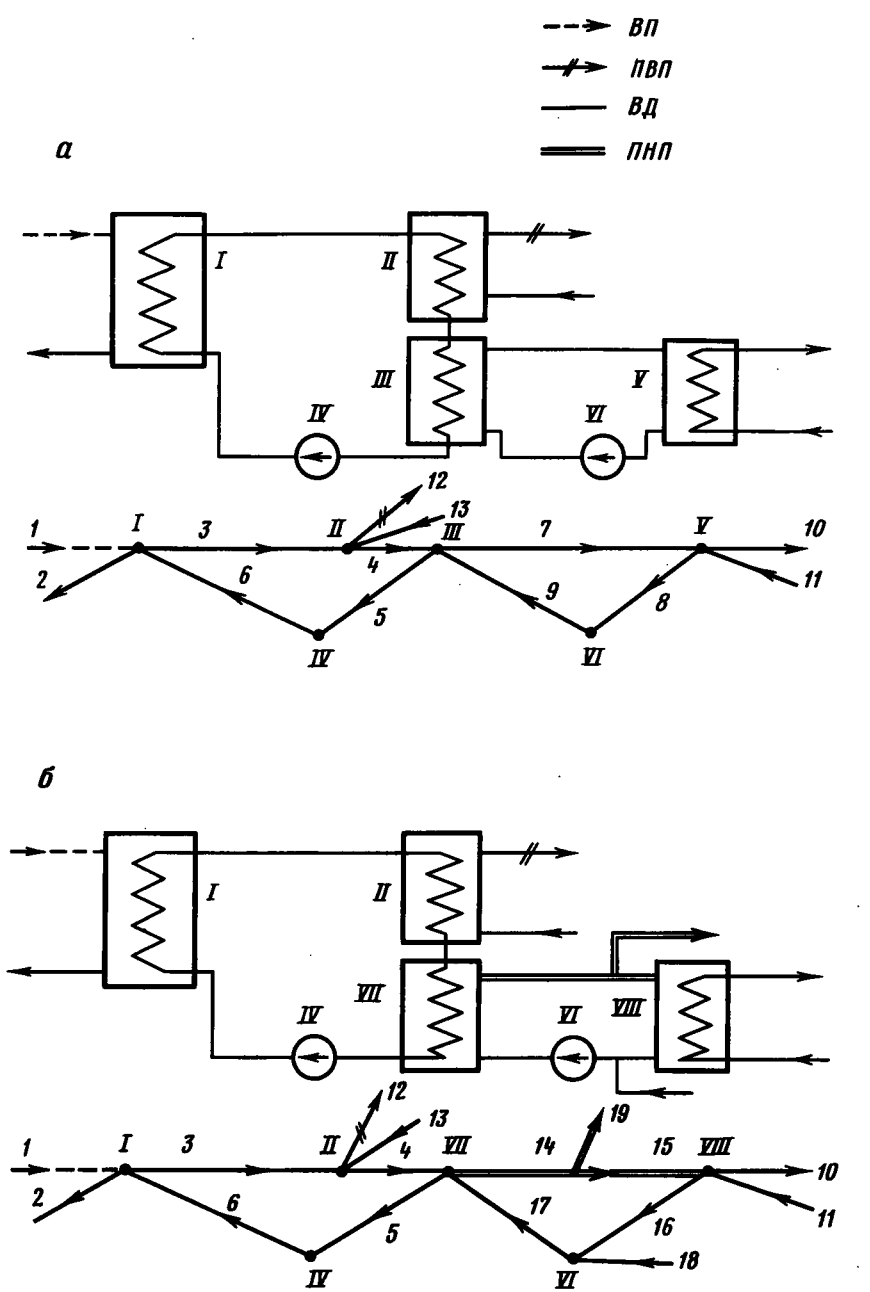


Рис. 6.3. Два варианта технологической схемы АСПТ и соответствующие им графы
а: *I* – ВРТ; *II* – ПГ; *III* – ПТ; *IV* – насос II контура; *V* – СТ; *VI* – насос III контура; *1–13* – связи между элементами схемы и внешние связи;
б: *I* – ВРТ; *II* – ПГ; *IV* – насос II контура; *VI* – насос III контура; *VII* – ПГН; *VIII* – СТП; *1–6, 10–19* – связи между элементами схемы и внешние связи.
Энергоносители: ВП – влажный пар; ВД – вода под давлением; ПНП – пар низких параметров; ПВП – пар высоких параметров

мическими и расходными параметрами связей, которое обеспечивает получение определенной стационариой нагрузки при определенных конструктивно-компоновочных характеристиках элементов схемы.

При оптимизации ТТЧ АСПТ рассматриваются только стационарные режимы работы (к ним же можно отнести и работу при частичных нагрузках); при составлении математической модели ТТЧ в большинстве элементов описание процессов без заметного ущерба для точности расчетов может производиться по сосредоточенным параметрам.

Система балансовых уравнений для моделирования ТТЧ включает:

1) уравнения баланса энергии для каждого k-го элемента оборудования, имеющего l энергоносителей и s электрических связей,

$$\sum_{j=1}^{J_{kl}} (\gamma Gi)_j + \sum_{s=1}^{S_k} (\gamma N)_s = 0; \qquad (6.22)$$

2) уравнения баланса расходов для каждого l-го энергоносителя в k-м элементе оборудования

$$\sum_{\alpha=1}^{A_{kl}} G_\alpha = 0; \qquad (6.23)$$

3) уравнения гидравлического баланса для каждого l-го энергоносителя в k-м элементе

$$(p' \pm \Delta p - p'')_{kl} = 0; \qquad (6.24)$$

4) уравнения изменения энтальпии l-го энергоносителя в k-м элементе оборудования

$$(i' \pm \Delta i - i'')_{kl} = 0 \qquad (6.25)$$

($k = \overline{1,K}$; $l = \overline{1,L}$; $j = \overline{1,J_{kl}}$; $s = \overline{1,S_k}$; $\alpha = \overline{1,A_{kl}}$).

Здесь G – расход энергоносителя в единицу времени; N – мощность электрической связи; p и i – давление и энтальпия (исходящая и входящая связи элемента оборудования отмечены одним и двумя штрихами соответственно), Δp и Δi – характеристики изменения давления и энтальпии процессов в элементах оборудования; γ – коэффициент потери энергии в окружающую среду.

Все характеристики процессов и конструкций различных типов оборудования выражаются через совокупность параметров связей Z и конструктивных параметров $Z^{\text{К}}$. В качестве основных характеристик элементов оборудования могут быть приняты следующие:

изменение давления каждого l-го энергоносителя в k-м элементе (для теплообменников, трубопроводов)

$$\Delta p_{kl} = \Delta p_{kl}[Z_k, Z_k^{\text{К}}]; \qquad (6.26)$$

изменение энтальпии каждого l-го энергоносителя в каждом k-м элементе

$$\Delta i_{kl} = \Delta i_{kl}[Z_k, Z_k^{\text{К}}]; \qquad (6.27)$$

средняя скорость потока l-го энергоносителя в k-м элементе

$$w_{kl} = w_{kl}[Z_k, Z_{\text{к}}^{\text{К}}]; \qquad (6.28)$$

наибольшая температура стенки для каждой q-й конструктивной части k-го элемента из материала m

$$t_{qmk} = t_{qmk}[Z_k, Z_k^{\mathrm{K}}]; \tag{6.29}$$

толщина стенки q-й конструктивной части k-го элемента из материала m

$$\delta_{qmk} = \delta_{qmk}[Z_k, Z_k^{\mathrm{K}}]; \tag{6.30}$$

расход металлов и других m-х материалов для каждого элемента оборудования k

$$G_{mk} = G_{mk}[Z_k, Z_k^{\mathrm{K}}]. \tag{6.31}$$

Эти характеристики должны учитывать работу АСПТ как при номинальной, так и при частичной нагрузках. В зависимости от специфики решаемой задачи перечисленные характеристики могут быть использованы не полностью или, напротив, дополнены другими характеристиками, отражающими эту специфику.

Термодинамические, расходные и конструктивные параметры Z и Z^{K} изменяются лишь в пределах возможных и технически осуществимых состояний энергоносителей и конструкций, а также в пределах технически допустимых начальных и эксплуатационных состояний материалов в элементах оборудования. Эти ограничения могут быть отражены в виде неравенств совокупностей параметров

$$Z^{*} \leqslant Z \leqslant Z^{**}, \tag{6.32}$$

$$Z^{\mathrm{K}*} \leqslant Z^{\mathrm{K}} \leqslant Z^{\mathrm{K}**} \tag{6.33}$$

(одной и двумя звездочками в индексе отмечены минимальное и максимальное значения параметров соответственно).

На характеристики вида w_{kl}, t_{qmk}, δ_{qmk} могут быть наложены ограничения, отражающие требования технологичности изготовления и надежной эксплуатации установки. Эти ограничения можно записать в следующем виде для каждого k-го элемента:

$$w_{kl}^{*} \leqslant w_{kl}[Z_k, Z_k^{\mathrm{K}}] \leqslant w_{kl}^{**}, \tag{6.34}$$

$$t_{qmk}^{*} \leqslant t_{qmk}[Z_k, Z_k^{\mathrm{K}}] \leqslant t_{qmk}^{**}, \tag{6.35}$$

$$\delta_{qmk}^{*} \leqslant \delta_{qmk}[Z_k, Z_k^{\mathrm{K}}] \leqslant \delta_{qmk}^{**}. \tag{6.36}$$

Перечень ограничений может быть расширен путем введения некоторых других ограничений. Например, часто вводятся ограничения на габаритные размеры теплообменников, что связано с условиями их перевозки на железнодорожном транспорте. Вообще состав ограничений определяется в каждом конкретном случае применительно к цели оптимизационной задачи.

В качестве итогового показателя эффективности АСПТ принимаются приведенные затраты по всем основным элементам оборудования с учетом особенностей конструктивно-компоновочных решений и с учетом характеристик внешних условий и связей. Расчет приведенных затрат производится по методике, изложенной в [20]. Требованием этой методики является приведение сравниваемых вариантов к одинаковой мощности источника теплоты (ядерного реактора), а изменения мощности механизмов

собственных нужд и расхода отпускаемой на них электроэнергии, приводящие к нарушению неизменности мощности нетто, компенсируются соответствующей замыкающей электростанцией.

Срок сооружения ТТЧ невелик, АСПТ будет работать в неизменном режиме в течение всего периода эксплуатации; с учетом этого может быть исключен фактор динамики и выражение для приведенных затрат по ТТЧ АСПТ приобретает простейший вид

$$З = Е_н К_{ТТЧ} + И_а + И_р + И_т + И_{зп} + И_{об} + И_э, \qquad (6.37)$$

где $К_{ТТЧ}$ – капитальные затраты в ТТЧ; $И_а$ – амортизационные отчисления; $И_р$ – издержки на текущий ремонт; $И_т$ – годовые затраты на топливо; $И_{зп}$ – издержки на заработную плату; $И_{об}$ – общестанционные расходы; $И_э$ – затраты на электроэнергию собственных нужд. Величины $И_{зп}$ и $И_т$ постоянны для данной мощности установки.

В свою очередь, отдельные составляющие приведенных затрат, входящие в выражение (6.37), могут быть представлены следующим образом:

$$И_а = \varphi_а К_{ТТЧ}, \qquad (6.38)$$

$$И_р = \varphi_р К_{ТТЧ}, \qquad (6.39)$$

$$И_{об} = \varphi_{об} (И_а + И_р), \qquad (6.40)$$

$$И_э = ц_э \sum_{r=1}^{R} \Delta N_r^н T_r, \qquad (6.41)$$

где $\varphi_а$, $\varphi_р$, $\varphi_{об}$ – коэффициенты, учитывающие доли амортизационных отчислений, издержек на ремонт и общестанционных расходов от капитальных затрат в ТТЧ; $ц_э$ – замыкающие затраты на электроэнергию; $\Delta N_r^н$ – изменение электрической мощности приводов насосов относительно исходного варианта; T_r – время работы насоса в году; R – количество насосов.

Окончательно переменная часть величины З записывается как

$$З = [Е_н + (\varphi_а + \varphi_р)(1 + \varphi_{об})] K_{ТТЧ} + ц_э \sum_{r=1}^{R} \Delta N_r^н T_r. \qquad (6.42)$$

Капитальные вложения в ТТЧ АСПТ складываются из капитальных затрат на изменяющиеся элементы: теплообменники, насосы, задвижки, здания и т.д.

Капитальные затраты на теплообменное оборудование рассчитываются по зависимости

$$К_{ТО} = ц_{тр} L_{тр} + ц_{корп} G_{корп}, \qquad (6.43)$$

где $ц_{тр}$, $ц_{корп}$ – стоимости материалов труб и корпуса с учетом затрат на изготовление и монтаж; $L_{тр}$ – длина труб теплопередающей поверхности; $G_{корп}$ – масса корпуса, включая трубные доски, патрубки. Аналогичным образом могут быть вычислены стоимости фундаментов теплообменников, каркаса, арматуры.

Математическая модель ТТЧ АСПТ, предназначенная для оптимизационных исследований, построена с учетом перечисленных составляющих. Алгоритмическая и программная реализации модели проведены для вариан-

та схемы, представленного на рис. 6.3, *а*, рекомендованного к техническому проектированию. Далее рассматриваются некоторые особенности реализации отдельных составляющих математической модели ТТЧ АСПТ.

Принципиальная тепловая схема ТТЧ отличается небольшим количеством элементов, связей и двумя технологическими контурами; при расчете тепловой схемы в контурах итерационно уточняются ряд параметров. Для каждого из элементов схемы могут быть записаны уравнения балансов; ниже в качестве примера приводятся уравнения балансов для элемента схемы под номером I (см. рис. 6.3, *а*) – встроенного реакторного теплообменника (для него отсутствуют потери в окружающую среду). Индексы в приведенных уравнениях соответствуют номерам связей; знак "+" соответствует исходящим связям, знак "–" входящим:

$$\begin{aligned} &G_2 i_2 - G_1 i_1 + G_3 i_3 - G_6 i_6 = 0, \\ &G_2 - G_1 = 0, \qquad p_3 + \Delta p_{36} - p_6 = 0, \\ &-G_6 + G_3 = 0, \qquad i_2 - \Delta i_{12} - i_1 = 0, \\ &p_2 - \Delta p_{12} - p_1 = 0, \quad i_3 - \Delta i_{36} - i_6 = 0. \end{aligned} \tag{6.44}$$

Аналогично (6.44) могут быть записаны уравнения для остальных теплообменников и насосов II и III контуров. Суммарное количество балансовых уравнений для изображенных на рис. 6.3 схем ТТЧ АСПТ составляет 35–40 (количество уравнений несколько меняется в зависимости от вида схемы и режима работы установки – при номинальной нагрузке или при частичных).

К числу итерационно вычисляемых величин относятся величины Δp – перепадов давлений в теплообменниках по греющим и нагреваемым веществам. Для их определения следует выполнить теплогидравлический расчет теплообменников, а для этого нужно знать значения параметров на входе и выходе из теплообменников, которые, в свою очередь, зависят от Δp; этим и определяется необходимость итерационного счета.

При создании математической модели ТТЧ АСПТ большое значение придается точности представления каждого элемента ТТЧ соответствующей математической моделью, так как точное математическое описание этих элементов обеспечивает достаточную степень детализации математической модели ТТЧ. В данной задаче основное внимание уделяется созданию математических моделей теплообменников, составляющих второй (нижний) уровень математической модели ТТЧ.

Применительно к рассматриваемым вариантам ТТЧ АСПТ (см. рис. 6.3) необходимо обеспечить расчет теплообменников: ВРТ, ПГ, ПГН, СТП, СТВ и ПТ. Некоторые из этих теплообменников имеют общие математические модели. При появлении новых вариантов схем (что вероятно при дальнейшей разработке вопроса о применении АСПТ) с теплообменниками, отличными от упомянутых, необходимы будут другие модели элементов схемы.

В элементах ПТ и СТВ и греющее, и нагреваемое вещество – вода под давлением; как показывает опыт тепловых расчетов, возможно проводить теплогидравлический расчет этих теплообменников по средним параметрам. В элементах ВРТ, ПГ, ПГН и СТП происходит изменение фазового состояния одного из энергоносителей; это усложняет теплогидравлический

расчет, так как при изменении фазового состояния изменяются термодинамические свойства вещества в широком диапазоне, что делает невозможным расчет теплообменников по средним параметрам. Для упрощения расчетов такие теплообменники разбивают на ряд участков (зон), где свойства вещества меняются слабо, и тогда возможен расчет каждого из этих участков по средним параметрам; если же свойства энергоносителей на каком-либо участке (зоне) меняются значительно, то должен быть известен достаточно простой способ расчета участка.

На рис. 6.4 представлены t–Q-диаграммы различных типов теплообменников схемы АСПТ и дана разбивка их на зоны, различающиеся либо процессом (нагрев или охлаждение однофазного вещества, конденсация, кипение), либо агрегатным состоянием вещества (вода под давлением, перегретый пар, влажный пар). Могут быть выделены следующие зоны: ОК – охлаждения конденсата; ЭК – экономайзерная с кипением; Э – экономайзерная; КП – конденсации пара; И – испарения; УТ – ухудшенного теплообмена; ПП – перегрева пара; ОП – охлаждения пара; ВВ – водо-водяная. Количество зон меняется от одной в модели СТВ (общей для ПТ и СТВ) до пяти в модели ПГ (общей для ПГ и ПГН).

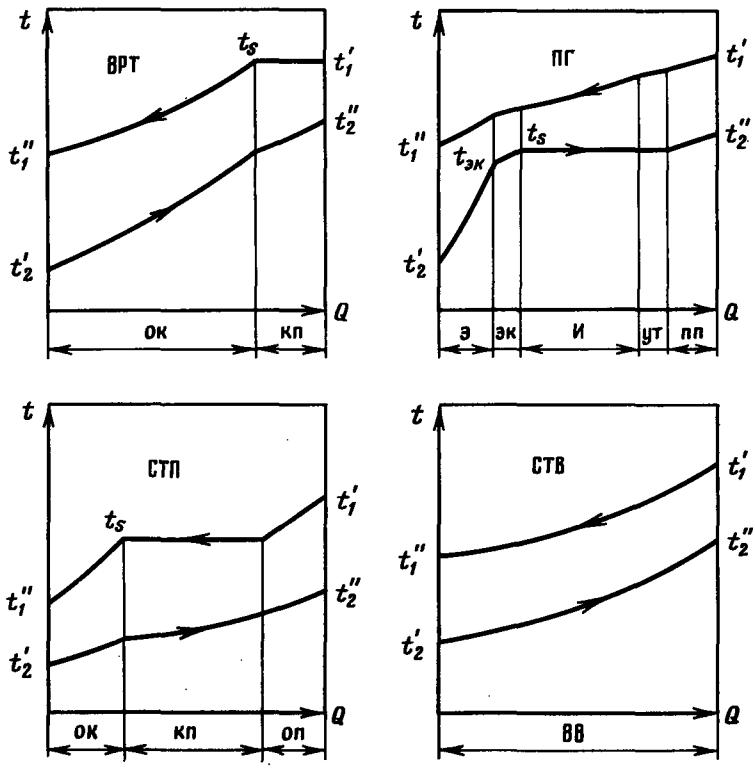


Рис. 6.4. t–Q-диаграммы теплообменников АСПТ

t_1' и t_1'' – температуры входа и выхода греющего вещества; t_2' и t_2'' – температуры входа и выхода нагреваемого вещества; $t_{эк}$ – температура начала кипения воды на экономайзерном участке парогенератора; t_s – температура насыщения

Нетрудно заметить, что отдельные типы зон присутствуют в ряде теплообменников и соответственно из некоторого небольшого количества зон может быть "собран" любой из представленных теплообменников. Для каждой из этих зон сделано достаточно подробное математическое описание процессов теплообмена, причем зоны ОК, ВВ, Э и ПП описываются одними и теми же критериальными зависимостями. В итоге количество необходимых для описания элементов схемы ТТЧ зон уменьшается до пяти: Э, ЭК, УТ, И, КП.

С учетом изложенного для ТТЧ АСПТ принята "обобщенная" модель теплообменника, позволяющая проводить расчеты любого теплообменника из представленных ранее. Модель располагает достаточно подробным математическим описанием зон и процессов, происходящих в них, а алгоритм расчета теплообменника построен так, что в зависимости от типа аппарата формируется необходимый набор зон и последовательно осуществляется теплогидравлический расчет всех зон согласно принятой методике [53]. Такой подход к созданию математической модели теплообменника ТТЧ АСПТ позволяет при появлении необходимости расчета нового варианта схемы ТТЧ с теплообменником, отличающимся набором зон от рассмотренных, легко расширить модель введением нового блока, формирующего необходимый набор из имеющихся; если же математическое описание какой-либо зоны отсутствует, то его можно ввести в модель в виде отдельного модуля.

На основе обобщенной модели теплообменника АСПТ создана программа прямого (конструктивного) теплового расчета, совмещенного с гидравлическим и прочностным расчетами; результатом расчета по этой программе являются величины длины трубной системы теплообменника, площади теплопередающей поверхности, гидравлические сопротивления энергоносителей и ряд других характеристик.

С применением обобщенной математической модели теплообменника ТТЧ АСПТ для оптимизационных исследований ТТЧ АСПТ и решения частных задач созданы программы прямого и поверочного расчетов тепловой схемы ТТЧ АСПТ.

Результатом прямого расчета тепловой схемы ТТЧ АСПТ являются величины параметров связей схемы и характеристики теплообменников вида (6.26) – (6.28); вычисляются также длины трубных систем теплообменников, весовые характеристики корпусов, суммарные перепады давления по контурам и мощности насосов на перекачку энергоносителей; по зависимости (6.43) определяются стоимости теплообменников, а затем капитальные вложения в установку; определяются приведенные затраты в установку по (6.42).

Исследования режимов работы ТТЧ АСПТ, отличных от номинального, проводятся с помощью программы поверочного расчета схемы ТТЧ; при этом определяются термодинамические и расходные параметры тепловой схемы при заданных конструктивных параметрах теплообменников и фиксированных значениях параметров пара и воды, отпускаемых потребителям. Системы балансовых уравнений, составляемые для поверочных расчетов схемы, будут несколько различаться в зависимости от сочетания определяемых параметров. Сохраняется необходимость итерационного уточнения характеристик вида Δp_{kl}.

Эти характеристики определяются с помощью программ поверочных расчетов отдельных теплообменников, причем в зависимости от места теплообменника в схеме и цели поверочного расчета (сочетания определяемых параметров) необходимы различные модификации программ поверочных расчетов элементов схемы. К ним относятся следующие варианты: определение конечных температур энергоносителей при заданных расходах и начальных температурах; определение расходов энергоносителей при известных их начальных и конечных температурах; определение расхода и конечной температуры нагреваемого вещества при заданных параметрах греющего вещества и начальной температуре нагреваемого вещества; определение расхода и конечной температуры греющего вещества при известных начальной его температуре и параметрах нагреваемого вещества и т.д.

В основу программ поверочных расчетов многозонных теплообменников положена программа прямого расчета, которая в данном случае используется в итерационном режиме.

Математическая модель ТТЧ АСПТ реализована в виде комплекса программ на языке ФОРТРАН. Этот комплекс включает программы прямого и поверочного расчетов схемы ТТЧ, программы прямого теплового расчета многозонного теплообменника и ряд вариантов программы его поверочного расчета, программы вычисления ограничений, программы вычисления капиталовложений в отдельные теплообменники и в ТТЧ в целом, приведенных затрат в ТТЧ. Комплекс включает также библиотеку вспомогательных программ для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлических сопротивлений воды и водяного пара в различных зонах, программы определения теплофизических свойств воды и водяного пара, ряд программ управления порядком расчета, контроля и печати промежуточных параметров.

С помощью этого комплекса были проведены оптимизационные расчеты ТТЧ АСПТ; расчеты по оценке влияния отдельных параметров на величину приведенных затрат в ТТЧ АСПТ; исследования ТТЧ АСПТ при режимах, отличных от номинального.

6.4. Методика и алгоритм оптимизации

Задачи оптимизации внутренних параметров отдельных частей АСПТ (6.7) при фиксированных значениях параметров связи решаются независимо (см. разд. 6.1). В математическом отношении эти задачи относятся к классу задач нелинейного программирования. Процесс оптимизации ведется только по независимым переменным X, а соответствующие значения переменных Y определяются из решения системы балансовых уравнений. Без учета дискретного характера части независимых переменных и в предположении дифференцируемости функций цели $З(X)$ и учитываемых ограничений $g_i(X)$ каждый блок модели можно представить в стандартном виде задачи математического программирования:

$$\min З(X), \tag{6.45}$$

$$g_i(X) \leqslant 0; \qquad i = 1, 2, \ldots, I, \tag{6.46}$$

где $X \in R^m$, т.е. X — m-мерный вектор.

Если первоначально указанные блоки модели формируются в ином виде, например как задачи с двусторонними ограничениями, то путем формальных преобразований их сводят к стандартному виду.

Для поиска локального минимума в задачах нелинейного программирования имеется ряд методов, универсальных или учитывающих ту или иную математическую специфику входящих в описание задачи функций (выпуклость $З(X)$, вогнутость $g_i(X)$ и т.д.). Здесь использован метод, который можно отнести к классу алгоритмов проектирования градиента с восстановлением связей. Эти алгоритмы реализуют следующую схему вычислений.

1. В качестве начальной точки X_0 выбирается произвольная точка допустимой области, выделяемой в пространстве системой неравенств (6.45). Если начальная точка внутренняя, т.е. ни одно из неравенств не обращается в тождественный нуль, то делается шаг в направлении убывания функции $З(X)$.

2. На границе области допустимости среди направлений, гарантирующих убывание функции цели, определяется направление вдоль границы области и делается шаг определенной длины в этом направлении.

3. В случае выхода по направлению спуска из граничной точки за пределы допустимой области решается задача возврата на границу области допустимых решений.

Все алгоритмы данного класса по существу различаются лишь способами реализации шагов 2 и 3 описанной схемы вычислений. Спуск в направлении убывания функции цели (шаг 1) может быть реализован любым из градиентных методов. Общим свойством рассматриваемых градиентных методов при определении направления спуска в граничной точке X^k является проектирование градиента функции цели (точнее, обратного вектора – антиградиента) не на саму границу области допустимости, а на ее линейное приближение в этой точке. Это приближение получают линеаризацией тех ограничений в точке (их называют активными), которые выполняются как строгие равенства. Такой подход значительно упрощает реализацию второго шага схемы вычислений, заменяя поиск допустимого направления в линейной задаче более простой задачей поиска близкого к допустимому направления спуска.

Возврат в допустимую область также является важной вспомогательной задачей, так как поиск направления убывания целевой функции и возврат в допустимую область неоднократно повторяются в итерационном процессе поиска минимума и поэтому их алгоритмическая реализация должна быть достаточно простой. Ниже приводится математическое описание программной реализации этих вычислительных шагов.

Первая вспомогательная задача – поиск направления спуска. Для внутренних точек области допустимости применялась модификация градиентного метода, позволяющая не пересчитывать градиент на каждой итерации, если целевая функция убывает, а увеличивать вдвое шаг спуска, пока на некотором шаге значение функции не увеличится. Процедура спуска продолжается до выхода на границу области допустимости. На границе области допустимости возможны две ситуации: либо в некоторой точке существует касательная гиперплоскость к области допустимости, либо граничная

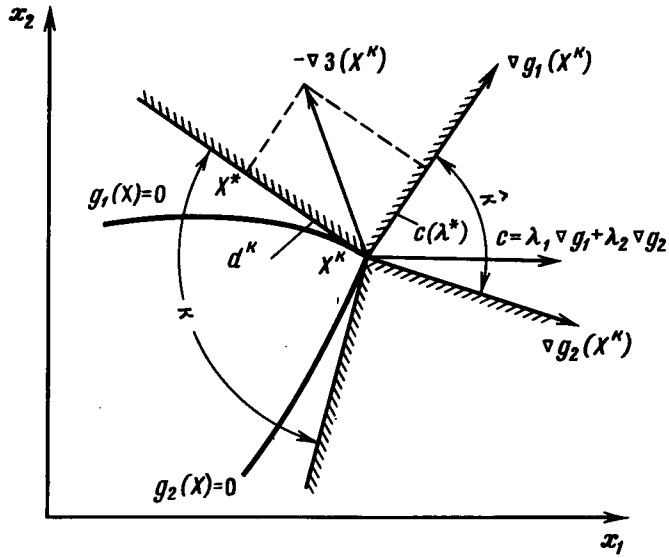


Рис. 6.5. Иллюстрация определения проекции антиградиента для двумерного случая

точка является угловой. Если касательная гиперплоскость существует, линеаризация ограничений строится естественно. В угловых точках строится касательный конус K (рис. 6.5), образованный множеством векторов X, удовлетворяющих условию

$$(\nabla g_j(X, X^k), X - X^k) \leqslant 0, \qquad j \in J_k. \tag{6.47}$$

Здесь ∇g_j — градиент совокупности активных ограничений в точке X^k; J_k — множество индексов, соответствующих активным ограничениям в этой точке.

Фактически условие (6.47) выделяет множество направлений внутрь допустимой области, не выходящих за касательные гиперплоскости к каждому активному ограничению. Совокупность этих гиперповерхностей описывается уравнениями

$$(\nabla g_j(X^k), X - X^k) = 0, \qquad j \in J_k. \tag{6.48}$$

Известно, что необходимым условием минимума целевой функции в угловой точке является неотрицательность скалярного произведения градиента целевой функции и любого направления из касательного конуса [54 – 56]. Это может быть записано для задачи (6.45), (6.46) в виде

$$(\nabla 3(X^k), X - X^k) \geqslant 0. \tag{6.49}$$

Геометрически неотрицательность скалярного произведения (6.49) означает, что вектор $\nabla 3(X^k)$ образует острый угол с вектором $(X - X^k)$ для любого вектора X из касательного конуса K.

Если граничная угловая точка не является точкой минимума, то среди векторов касательного конуса найдется такое направление, вдоль которого целевая функция убывает. Можно показать [54 – 56], что поиск наивыгод-

нейшего направления убывания целевой функции в окрестности точки X^k эквивалентен следующей задаче оптимизации:

$$\min F_k(X) = (\nabla \mathfrak{Z}(X^k), X - X^k) + \tfrac{1}{2}\,(X - X^k, X - X^k) \tag{6.50}$$

при ограничениях

$$(\nabla g_j(X^k), X - X^k) \leqslant 0, \qquad j \in J_k. \tag{6.51}$$

Здесь функция $F_k(X)$ характеризует уклонение искомого вектора X от направления убывания целевой функции $\mathfrak{Z}(X)$ в точке X^k, а ограничения (6.51) выделяют множество возможных направлений убывания целевой функции – касательный конус K.

Задача (6.50), (6.51) является математической формализацией второго шага схемы вычислений поиска минимума в исходной задаче (6.45), (6.46). С целью уменьшения размерности в задаче квадратичного программирования (6.50), (6.51) (так как число активных ограничений меньше числа переменных X) и упрощения вида ограничений целесообразно перейти к эквивалентной двойственной задаче. Для этого строится функция Лагранжа $L(X, \lambda)$:

$$L(X, \lambda) = F_k(X) + (G^{\mathrm{T}}\lambda, X - X^k), \tag{6.52}$$

где G^{T} – транспонированная матрица производных $\partial g_j(X^k)/\partial X_i$ (i – индекс переменной, j – индекс активных ограничений).

По теореме Куна–Таккера [55], устанавливающей необходимые и достаточные условия экстремума в задачах с ограничениями, следует: множители Лагранжа λ^*, минимизирующие функцию $L(X, \lambda)$, являются решением двойственной задачи:

$$\max_{\lambda \geqslant 0} \varphi(\lambda) = (\nabla \mathfrak{Z}(X^k) + G^{\mathrm{T}}\lambda,\ \nabla \mathfrak{Z}(X^k) + G^{\mathrm{T}}\lambda). \tag{6.53}$$

Известно, что решение двойственной задачи λ^* позволяет найти решение прямой задачи (6.50), (6.51) X^*; эти решения связаны соотношением

$$X^* - X^k = -\nabla \mathfrak{Z}(X^k) - G^{\mathrm{T}}\lambda^*, \tag{6.54}$$

или в координатной форме

$$d^k = X^* - X^k = -\nabla \mathfrak{Z}(X^k) - \sum_{j \in J_k} \lambda_j^* \nabla g_j(X^k). \tag{6.55}$$

Геометрический смысл выражения (6.55) и перехода к двойственной задаче проясняется на рис. 6.5: проекция d^k равна минимальному расстоянию от конца вектора $-\nabla \mathfrak{Z}(X^k)$ до конуса $\hat{K}$, порожденного градиентами активных ограничений и двойственного к касательному конусу K.

Задачу (6.53) легко преобразовать к минимизации квадратичной формы на неотрицательном ортанте, так как

$$\max_{\lambda \geqslant 0} \varphi(\lambda) = \min_{\lambda \geqslant 0} (-\varphi(\lambda)). \tag{6.56}$$

Таким образом, задачу поиска направления уменьшения целевой функции удалось свести к задаче минимизации квадратичной формы с простыми

ограничениями. Это позволяет при заданной точности вычислений вести поиск минимума одним из конечных методов, например методом сопряженных градиентов, который и был реализован в программе.

Вторая вспомогательная задача — возврат в допустимую область. Шаг по направлению, принадлежащему касательному конусу, может уменьшить значение целевой функции, но вывести из области допустимых решений. Известно [55], что, выбрав длину шага достаточно малой, можно остаться на границе допустимой области. Для этого после каждого шага по проекции d^k антиградиента $-\nabla З(X^k)$ (6.55) вычисляются значения активных и неактивных ограничений. Если нарушаются неактивные ограничения, шаг уменьшается вдвое. Если нарушаются ограничения, которые на предыдущем шаге оставались активными, то осуществляется возврат на эти ограничения в точке X^k.

Формально процедуру возврата в допустимую область можно представить следующим образом. Для k-й итерации алгоритма, на которой произошел выход из допустимой области, т.е. в точке $\widetilde{X}^{k+1} = X^k + \alpha_k d^k$ некоторое ограничение $g_j(\widetilde{X}^{k+1})$ стало больше нуля, рассмотрим совокупность активных ограничений в точке X^k:

$$\begin{aligned} &g_1(X^k) = 0, \\ &\cdots\cdots\cdots \\ &g_j(X^k) = 0, \\ &\cdots\cdots\cdots \\ &g_{n_a}(X^k) = 0, \qquad j = \overline{1, n_a}, \end{aligned} \tag{6.57}$$

где n_a — число активных ограничений.

Система (6.57) является невырожденной и недоопределенной, так как число активных ограничений меньше числа переменных m. Положим свободные $(m - n_a)$ переменных в системе (6.57) равными соответствующим значениям вектора X^{k+1} и будем искать остальные значения переменных $(X_1, ..., X_{n_a})$, удовлетворяющие системе нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} &g_1(X_1, ..., X_{n_a}, \widetilde{X}^{k+1}_{n_a+1}, ..., \widetilde{X}^{k+1}_m) = 0, \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ &g_{n_a}(X_1, ..., X_{n_a}, \widetilde{X}^{k+1}_{n_a+1}, ..., \widetilde{X}^{k+1}_m) = 0. \end{aligned} \tag{6.58}$$

Для решения системы нелинейных уравнений (6.58) возможно использование метода Ньютона, который при хорошем начальном приближении имеет квадратичную скорость сходимости. В качестве начального приближения значения первых n_a компонент вектора $\widetilde{X}^{k+1}$ можно принять равными соответствующим искомым неизвестным $(X_1 = \widetilde{X}^{k+1}_1, ..., X_{n_a} = \widetilde{X}^{k+1}_{n_a})$. Решение системы (6.58) дает новую точку X^{k+1}, принадлежащую активным ограничениям и уменьшающую значение целевой функции по отношению к значению ее в точке X^k.

Другой возможностью решения системы (6.58) является построение итерационного процесса, решающего задачу безусловной минимизации некоторой специально построенной функции. Для этого система (6.58) линеаризуется в окрестности точки $\widetilde{X}^{k+1}$, т.е., пренебрегая членами выше первого порядка, можно считать

$$\bar{g}(\widetilde{X}^{k+1}) + I(\widetilde{X}^{k+1})\xi = 0. \tag{6.59}$$

Здесь $\bar{g}(\widetilde{X}^{k+1})$ – вектор-функция, соответствующая системе (6.59); $I(\widetilde{X}^{k+1})$ – матрица Якоби системы (6.58), вычисленная в точке $\widetilde{X}^{k+1}$; ξ – вектор из окрестности точки $\widetilde{X}^{k+1}$.

Напомним, что по определению матрицы Якоби

$$I(\widetilde{X}^{k+1}) = |\partial g_i(X)/\partial X_j|_{X = X^{k+1}}. \tag{6.60}$$

Будем искать такой вектор ξ из окрестности точки X^{k+1}, чтобы квадрат его длины был минимален и выполнялось условие (6.59). Эта задача эквивалентна следующей задаче оптимизации:

найти

$$\min \tfrac{1}{2}(\xi, \xi) \tag{6.61}$$

при ограничениях

$$\bar{g}(\widetilde{X}^{k+1}) + I(\widetilde{X}^{k+1})\xi = 0. \tag{6.62}$$

Здесь (ξ, ξ) – скалярное произведение.

Аналогично процедуре, описанной в первой вспомогательной задаче, с помощью функции Лагранжа для задачи (6.61), (6.62) можно перейти к двойственной задаче и решать следующую задачу безусловной минимизации:

$$\min\{\tfrac{1}{2}(II^*\bar{\lambda}, \bar{\lambda}) - (\bar{\lambda}, \bar{g})\}. \tag{6.63}$$

Здесь $\bar{\lambda}$ – вектор множителей Лагранжа для системы (6.63); I^* – матрица, сопряженная к матрице Якоби в точке X^{k+1}. Задача (6.63) решалась методом сопряженных градиентов. Затем определялось следующее приближение к решению по формуле

$$X^{k+1} = \widetilde{X}^{k+1} + \xi. \tag{6.64}$$

Такой подход к решению второй вспомогательной задачи позволяет применять на всех внутренних итерациях процесса поиска решения общей задачи (6.45), (6.46) одну и ту же процедуру – метод сопряженных градиентов. Это приводит к экономии времени счета и упрощает алгоритм решения общей задачи. Поэтому при программной реализации был использован именно этот подход.

Приведенная выше методика решения оптимизационной задачи АСПТ реализована на языке ФОРТРАН в виде основной программы (собственно

программы оптимизации) и ряда вспомогательных программ. К ним относятся программы вычисления градиента целевой функции численным методом, вычисления ограничений и производных ограничений, контроля за границами допустимой области, решения нелинейного уравнения с одним неизвестным методом секущих и ряд программ, с помощью которых решаются вспомогательные математические задачи.

Глава седьмая

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЭЦ

Источниками теплоты и электроэнергии в системах централизованного теплоснабжения, базирующихся на теплофикации, являются ТЭЦ, работающие на органическом и ядерном топливе. Они характеризуются весьма сложными технологическими схемами, разнообразием графиков отпуска теплоты и электроэнергии. Это обусловливает значительную сложность задач, решаемых при проектировании ТЭЦ и конструировании теплофикационного оборудования. Качественное их решение практически возможно лишь при широком использовании методов математического моделирования и оптимизации.

Основные оптимизационные задачи, связанные с ТЭЦ и АТЭЦ, следующие: а) выбор состава основного оборудования станции при ее проектировании; б) оптимизация технологической схемы и параметров новой серийной теплоэнергетической установки.

Эти две задачи и рассмотрены в данной главе в разд. 7.2 и 7.3. Их изложению предшествует описание весьма важной методической задачи по автоматизации моделирования ТЭЦ, т.е. по созданию инструмента для исследования ТЭЦ.

7.1. Автоматизация моделирования ТЭЦ

Широкое внедрение методов математического моделирования в практику инженерных расчетов выявило узкое место этого процесса – большие затраты труда высококвалифицированных инженеров и программистов на разработку программ расчета. В большинстве случаев эти затраты связаны с тем, что незначительные изменения в математических описаниях моделируемых объектов требуют перепрограммирования по сути дела одних и тех же алгоритмов. Кроме того, в алгоритмах, разработанных "ручным" способом, последовательность расчета определяется на основании субъективных соображений инженеров и программистов, без достаточно глубокого топологического анализа схемы рассматриваемой установки. В результате разработка адекватной математической модели недопустимо затягивается.

Решение этой очень важной и сложной задачи по автоматизации высококвалифицированного инженерного и программистского труда многие авторы видят в разработке автоматизированных систем построения математических моделей исследуемых объектов. В данном разделе дается

описание одной из таких систем — системы машинного построения программ (СМПП) инженерных расчетов энергетических установок [25, 57]. СМПП является весьма универсальной и может использоваться для построения математических моделей различных энергетических объектов. Наибольшее практическое применение СМПП нашла при построении математических моделей ТЭЦ. Объясняется это тем, что ТЭЦ имеет наиболее сложные среди энергетических установок технологические тепловые схемы и применение СМПП дает в этом случае наибольший эффект.

Описание СМПП. При создании СМПП стремились удовлетворить следующим требованиям: 1) система применима для моделирования любых энергоустановок; 2) при рассмотрении различных вариантов энергоустановки не должно требоваться программистской работы по изменению отдельных блоков системы; 3) исходная информация об энергоустановке должна быть лаконичной и должна задаваться на языке, легко усваиваемом инженерами; 4) продукцией системы должны быть программы на одном из языков высокого уровня, таких, как АЛГОЛ, ФОРТРАН; 5) программы расчета энергоустановок, полученные при помощи системы, должны легко сочленяться с другими программами, в частности с программами оптимизации параметров моделируемых установок.

В основе автоматизированного построения при помощи СМПП математических моделей и программ расчета энергетических установок лежат следующие общие соображения.

Задавая описания элементов энергоустановок в виде совокупностей отношений (например, уравнений), не обязательно ориентированных на вычисление каких-либо переменных, можно поставить задачу: на основании информации об элементном составе и связях схемы установки автоматически получить ее математическую модель в виде системы отношения; используя такую модель, построить ряд программ расчета с различными целями. Информация о цели расчета при этом может быть задана, вообще говоря, двумя способами: либо указанием того, какие переменные должны быть вычислены, либо заданием списка переменных-исходных данных. Далее встает вопрос о решении полученной системы уравнений. Специфика систем отношений, описывающих энергетические установки, в большинстве случаев позволяет использовать для этой цели различные модификации метода последовательных приближений [25]. Для его реализации каждое уравнение должно быть ориентировано на вычисление одной переменной. Следовательно, нужно иметь некоторую процедуру, которая на основании информации о цели расчета автоматически производила бы ориентацию всех отношений, т.е. разрешение их относительно некоторых переменных. Таким образом будет получен неупорядоченный набор операторов, из которых должна состоять программа расчета. Для получения этой программы операторы при помощи специальной процедуры должны быть автоматически расположены в некоторой последовательности, которая, вообще говоря, не однозначна. При построении последовательности расчета по возможности нужно учитывать факторы, влияющие на эффективность получаемой программы, в частности число итерационных циклов. Принципы, положенные в основу указанных процедур, должны быть достаточно общими, т.е. ни в коей мере не зависеть от вида установки и не требо-

вать каких-либо указаний от исследователя по организации вычислительного процесса. В данной постановке на ЭВМ должны быть возложены сложные функции по преобразованию лаконичной входной информации в программу расчета. В соответствии с этими соображениями СМПП имеет три следующих основных входа:

1. Вход уровня описания математических моделей типовых элементов энергоустановки (базовых моделей), на котором вводится набор наименований типовых элементов и соответствующие каждому элементу наборы отношений между переменными.

2. Вход уровня описания схемы моделируемого объекта. Здесь задается информация об элементном составе и связях между элементами конкретной схемы. При этом конкретизируются отдельные экземпляры типовых элементов.

3. Вход уровня постановки задачи расчета конкретной энергоустановки, определяющий состав задаваемых и вычисляемых переменных.

Такое разделение входов системы позволяет: а) в зависимости от поставленных целей исследования и рассматриваемых объектов варьировать как составом типовых элементов, так и смыслом, вкладываемым в них; б) при фиксированном составе типовых элементов варьировать схемами; в) при фиксированном составе типовых элементов и фиксированной схеме варьировать решаемыми задачами.

Основным выходом системы является текст программы решения поставленной задачи на языке ФОРТРАН или АЛГОЛ.

Базовые модели представляют собой совокупности отношений между интересующими исследователя переменными трех видов: уравнения, операторы присваивания и операторы процедур. Уравнения могут быть алгебраическими и трансцендентными. Каждое из них записывается в виде, разрешенном относительно какой-либо одной переменной. Описание базовых моделей делается в алголоподобном виде, однако важно подчеркнуть, что оно не является упорядоченной последовательностью операторов (программой), а представляет собой источник для построения различных программ, которые могут быть получены на основании описания модели энергоустановки и поставленной на ней задачи.

Для задания топологии схемы используются связующие отношения двух типов. Первый из них записывается в виде тождеств между переменными, характеризующими потоки энергоносителей на входах и выходах связываемых элементов. Второй тип — многопараметрические связи, при записи которых указываются обозначения связываемых элементов схемы, признаковые обозначения потоков на входе и выходе элементов и обозначение параметров, характеризующих данный поток (например, расход, энтальпия, температура).

Постановка задачи осуществляется заданием списка переменных исходных и (или) списка вычисляемых переменных. Эти списки могут быть неполными. В этом случае СМПП имеет свободу при планировании вычислительного процесса. Полные списки вычисляемых и задаваемых переменных сообщаются пользователю в процессе работы СМПП. По завершении работы СМПП вместе с программой расчета выдается также список итерационно уточняемых переменных, для которых нужно при расчете энергоустановки задавать начальные значения.

На основании описанной входной информации СМПП решает следующие основные задачи: а) по закодированной схеме и на основании информации, содержащейся в базовых моделях, строит в некотором виде модель общей системы отношений, описывающей энергоустановку; б) на модели энергоустановки планирует решение системы отношений и по полученному плану строит программу расчета энергоустановки.

При выполнении большинства операций, связанных с решением указанных задач, совсем не обязательно знание смысла переменных и связывающих их отношений. Гораздо удобнее использовать лаконичные абстрактные модели отношений и их систем в виде двудольных графов. Двудольные графы представляются в ЭВМ в виде компактных списков кодов вершин.

Каждой базовой модели СМПП ставит в соответствие графовую модель (Г-образ). При построении Г-образа системы отношений, соответствующей моделируемой энергоустановке, СМПП производит следующие действия: размножает Г-образы базовых моделей, экземпляры которых входят в данную энергоустановку; отождествляет образы переменных (вершины графа) в соответствии с информацией о связях установки; выделяет на полученном графе вершины, соответствующие переменным, заданным пользователем в качестве вычисляемых переменных и исходных данных. На полученном Г-образе системы отношений планируется решение задачи расчета энергоустановки. При этом с использованием алгоритмов построения совершенного паросочетания производится ориентация Г-образа и далее находится порядок расположения вершин графа-прообразов операторов программы расчета схемы в последовательности, обеспечивающей решение поставленной задачи. В результате получается схема вычислительного процесса. На всех этапах описанного процесса путем рационального использования параллельных цепных списков и других структур, а также специальной системы ссылок сохраняется возможность вернуться к конкретному смыслу вершин графов. После построения схемы вычислительного процесса алгоритм конкретизации, используя заготовки стандартных текстов, преобразует эту схему в вычислительную программу на АЛГОЛе или ФОРТРАНе в зависимости от желания пользователя. Укрупненная схема функционирования СМПП приведена на рис. 7.1.

Входной язык СМПП. Большое внимание при разработке СМПП уделено созданию входного языка. Этот язык состоит из четырех частей: язык описания моделей, язык описания задач на моделях, язык заданий на генерацию программ, язык управления сервисом СМПП.

Особенность языка описания моделей состоит в том, что в СМПП математической моделью типового элемента энергоустановки является не вычислительный блок (процедура), в котором операторы выступают в роли аналогов реальных процессов преобразований информации в соответствующем аппарате, а совокупность отношений между параметрами, характеризующими состояние типового элемента. Математическая модель энергоустановки в целом составляется из математических моделей ее элементов и также представляет собой систему отношений, а не вычислительную программу.

В СМПП модель является иерархической структурой, в которой имеются элементарные компоненты (константы, переменные, массивы), структур-

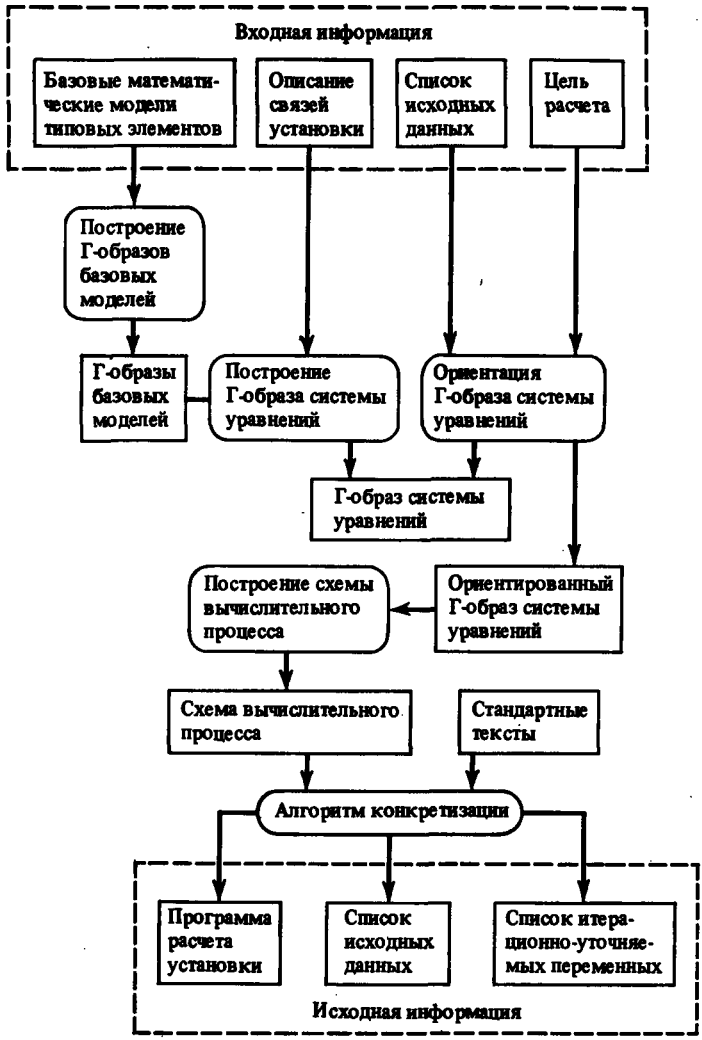


Рис. 7.1. Схема построения программы расчета при помощи СМПП

ные компоненты (подмодели) и отношения (явные и неявные зависимости) между компонентами. Переменные делятся на собственные и несобственные. Собственные компоненты обладают значениями, зависящими от экземпляра той модели, к которой они отнесены, и не зависящими от значений других компонентов. Значения несобственных компонентов зависят (в общем случае) от значений других элементарных компонентов. Отношение может быть функциональным, определяющим компоненты-результаты в зависимости от компонентов-аргументов; неявными, в котором не указано, какой из входящих в него компонентов является результатом; связующим, предназначенным для отождествления компонентов из разных моделей.

Представление функциональных отношений может быть программным (с помощью заранее написанных подпрограмм) или операторным (в виде оператора присваивания или условного оператора). Неявные отношения представляются уравнениями.

Описание модели состоит из наименования модели и тела модели, разделенных символом ":". Тело модели в общем случае включает перечень подмоделей, входящих в состав данной модели, совокупность описаний элементарных компонентов, входящих в состав модели, совокупность отношений между компонентами.

Описание подмоделей включает информацию о том, какие модели из имеющихся в архиве СМПП входят в состав данной модели. Для каждой подмодели указываются наименования ее экземпляров. Например, если модель M содержит экземпляры $m1$ и $m2$ модели m, а также экземпляры $t1$, $t2$, $t3$ модели t, то в теле M описание подмоделей выглядит следующим образом:

МОДЕЛЬ $m(m1, m2),\ t(t1, t2, t3)$

Заметим, что при описании подмоделей можно указывать наименования тех предметных архивов, в которых хранятся подмодели. Например, описание

МОДЕЛЬ (A) $m(m1, m2)$

МОДЕЛЬ (B) $t(t1, t2, t3)$

означает, что модель m хранится в предметном архиве A, а модель t – в B.

Строгие определения основных конструкций языка описания моделей в виде синтаксических правил приведены в [57].

Описание моделей на входном языке СМПП является той базой, на основе которой СМПП может генерировать различные программы расчета стационарных состояний тех объектов, модели которых хранятся в архивах системы. Информацию о целях расчета СМПП получает на языке описания задач на моделях.

Язык описания задач в СМПП предусматривает следующие возможности: 1) описать несколько задач в одном задании (каждая задача при этом имеет свое имя); 2) перечислить элементарные компоненты, значения которых требуется найти в результате решения задачи; 3) перечислить элементарные компоненты, значения которых предполагаются известными при решении задачи; 4) указать список компонентов, которые могут выступать в роли итерационно уточняемых величин; 5) придать начальные значения как задаваемым, так и итерационно уточняемым компонентам; 6) описать действия над компонентами модели, которые являются специфическими для данной задачи и которые не включены в совокупность отношений рассматриваемой задачи.

Сама по себе постановка задачи на модели не вызывает генерацию программы решения задачи, для этого необходимо на языке заданий на генерацию программ сформулировать задание. Задание на генерацию содержит перечень наименований тех задач, программы решения которых должны быть сгенерированы. Кроме того, задание на генерацию содержит название языка программирования, на котором будет представлен алгоритм решения задачи, а также вид внешнего носителя информации, предназначенно-

го для хранения сгенерированных текстов алгоритмов. Возможно представление программ либо на языке ФОРТРАН, либо на языке АЛГОЛ. Тексты сгенерированных программ в СМПП можно выдать на печать, перфорацию или записать на магнитную ленту.

При работе с СМПП возникает необходимость вносить разного рода исправления на отдельных этапах работы. Для этой цели используется язык управления сервисом системы. Сервис, предоставляемый пользователю СМПП, включает набор программ, позволяющих производить некоторые операции редактирования: создавать и уничтожать предметные архивы, исключать описания модулей из архива СМПП, а также распечатывать каталоги и содержимое предметных архивов системы.

Как видно из изложенного, входной язык СМПП весьма прост, лаконичен, нагляден и не требует от инженера-пользователя знаний в области программирования (умения организовывать вычислительные процессы и т.п.).

Кроме рассмотренных языков, для СМПП разработан еще язык управления работой СМПП. Его назначение – инициировать работу СМПП. Этот язык включает описание ряда заданий для системы. Так, например, одно из заданий может заключаться в формировании архива моделей, другое – в обработке описания задачи на модели из архива, третье – в формировании нового архива моделей и т.д. Каждому заданию предшествует своя системная команда, которая характеризует вид задания и одновременно является командой, настраивающей СМПП на работу того или иного блока системы.

В СМПП возможны следующие системные команды: АРХИВ, ЗАДАЧА, ГЕНЕРИРОВАТЬ, РЕДАКТИРОВАТЬ, ФИНИШ. Команда АРХИВ задает режим обработки описаний моделей и размещения моделей, в которых нет синтаксических ошибок, в архиве СМПП. Команда ЗАДАЧА определяет режим обработки описаний задач на моделях. По системной команде ГЕНЕРИРОВАТЬ производится генерация программ решения задач на моделях. Команда РЕДАКТИРОВАТЬ настраивает СМПП на обработку совокупности заданий на редактирование. По системной команде ФИНИШ работа СМПП заканчивается.

Текст на языке управления работой СМПП, который будем называть системным пакетом, всегда начинается одной из системных команд и заканчивается командой ФИНИШ, указывающей на завершение работы системы. Между этими командами размещаются сами задания. Структура системного пакета определяется синтаксисом языка управления работой СМПП [57].

Реализация СМПП. Система машинного построения программ инженерных расчетов состоит из пяти программных блоков, управляющей программы и архива моделей. Взаимодействие компонентов СМПП показано на рис. 7.2.

Информация, определяющая функционирование системы, задается в виде системного пакета, который содержит одно или несколько заданий для СМПП. Задания выполняются в том порядке, в котором входят в системный пакет, и каждое из них может использовать в качестве входной информацию, полученную при выполнении другого пакета или других заданий этого же пакета.

Перед каждым заданием указывается соответствующая ему систем-

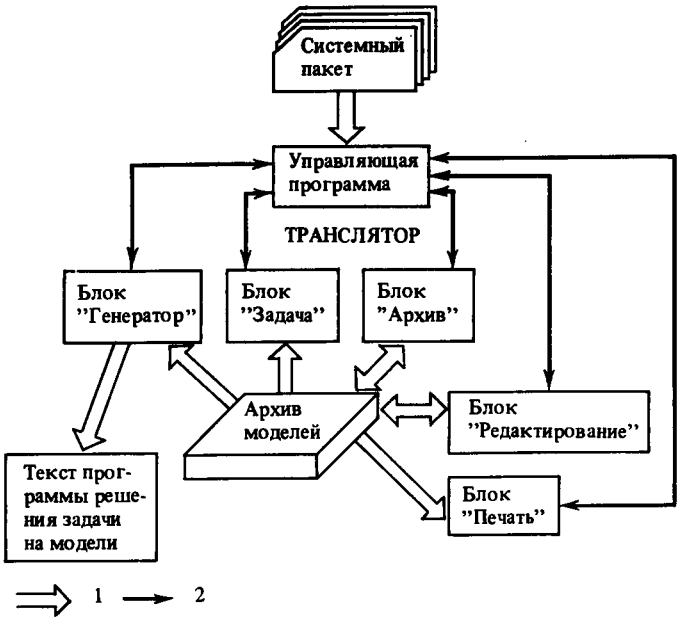


Рис. 7.2. Общая структурная схема СМПП

1 – информационные потоки, *2* – связи между программными компонентами системы

ная команда. Обработку очередного задания начинает управляющая программа, которая анализирует системную команду и в зависимости от результатов анализа передает управление соответствующему блоку системы.

Как видно из рис. 7.2, каждый блок СМПП взаимодействует с архивом системы. В архиве хранятся как модели, разработанные для описания типовых элементов, входящих в состав некоторого класса энергоустановок, так и модели, разработанные для определения расчетных задач.

Архив СМПП может состоять из нескольких предметных архивов, в которых хранятся модели из разных прикладных областей. В СМПП имеется каталог предметных архивов, содержащий наименования предметных архивов и адреса этих архивов во внешней памяти. У каждого предметного архива имеется свой каталог моделей, который содержит наименования моделей, входящих в архив, и адреса моделей в архиве. Общая структура архива СМПП приведена на рис. 7.3.

Рассмотрим в общих чертах назначение программных компонентов СМПП. Блок "Архив" обрабатывает описания моделей и заносит в предметный архив те модели, которые не содержат ошибок. Блок "Задача" обрабатывает описание задачи на модели, фиксирует возможные ошибки и (в случае отсутствия ошибок) определяет, значения каких компонентов при помощи каких отношений вычисляются. Блок "Генератор" по описанию задачи на модели и на основе сведений о конкретных отношениях, хранящихся в предметном архиве СМПП, синтезирует процедуру решения задачи. Эта процедура представляется на языке высокого уровня (АЛГОЛ,

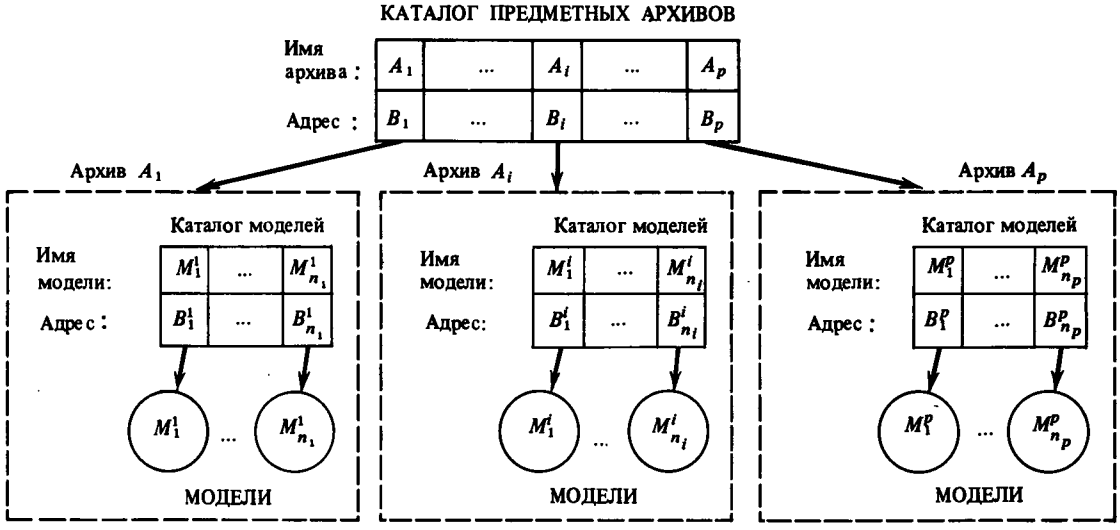


Рис. 7.3. Организация архива СМПП

M_j^i – j-я модель i-го предметного архива, $i = \overline{1, p}$; $j = \overline{1, n_i}$

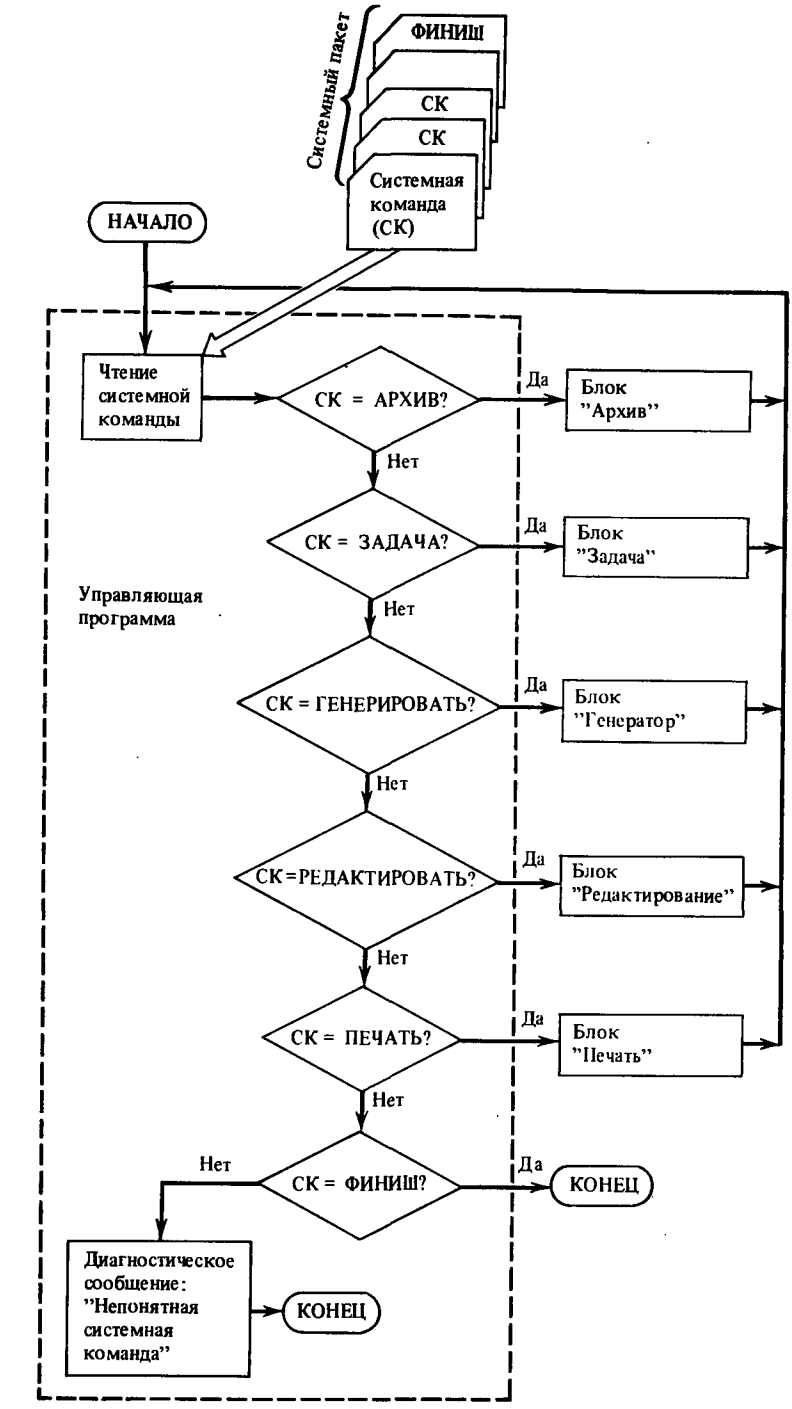


Рис. 7.4. Общая схема функционирования СМПП

ФОРТРАН) и в дальнейшем может использоваться для расчета и оптимизации параметров энергетической установки, модель которой включена в архив СМПП. Блок "Редактирование" предназначен для создания предметных архивов и проведения работ с ними. С его помощью можно завести предметный архив, уничтожить предметный архив, исключить модель из архива. Блок "Печать" предназначен для вывода на АЦПУ содержимого каталогов и предметных архивов системы.

На рис. 7.4 приведена общая схема функционирования СМПП, согласно которой обработка системного пакета производится следующим образом. На вход управляющей программы поступает системная команда. Управляющая программа распечатывает команду на АЦПУ и проверяет ее корректность. Если системная команда корректна, т.е. является одной из команд АРХИВ, ЗАДАЧА, ГЕНЕРИРОВАТЬ, РЕДАКТИРОВАТЬ, ПЕЧАТЬ, то управляющая программа передает управление соответствующему блоку СМПП ("Архив", "Задача", "Генератор", "Редактирование", "Печать"). В этом случае дальнейшую обработку системного пакета продолжает тот блок, которому было передано управление. После того как обработка задания будет завершена, управление передается управляющей программе, которая вновь читает системную команду из системного пакета, и процесс повторяется. Так продолжается до тех пор, пока на вход управляющей программы не поступает команда ФИНИШ, в этом случае работа системы завершается.

Многолетний опыт использования СМПП научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями для построения математических моделей ТЭЦ дал положительные результаты [57].

7.2. Выбор состава основного оборудования ТЭЦ

При выполнении технического проекта ТЭЦ, проводимого после разработки схемы теплоснабжения города или промышленного узла, ТЭЦ рассматривается как сложная техническая система, для которой заданы: внешние потребители горячей воды и пара, их расчетные нагрузки и графики теплопотребления, параметры отпуска теплоты, режимы использования в электроэнергетической системе, удельные замыкающие затраты на топливо и электроэнергию, допустимые к установке типы турбин, энергетических и пиковых котлов, вспомогательного оборудования, капиталовложения в основное оборудование и т.д. На данной стадии проектирования первоочередной задачей является выбор основного оборудования и выбор принципиальной тепловой схемы, которая определяет наиболее существенные технологические связи тепломеханического оборудования ТЭЦ.

В данном разделе указанная задача рассмотрена для случая установки пиковых котлов на ТЭЦ. Задача выбора оптимальной структуры оборудования ТЭЦ при установке ПК в центрах теплопотребления приведена в разд. 4.2.

Выбор основного оборудования и выбор схемы тесно связаны между собой, поскольку состав основного оборудования определяет допустимые виды схем, и в то же время экономическая эффективность того или иного состава оборудования во многих случаях существенно зависит от тепловой схемы. От принятых здесь решений сильно зависят технико-

экономические показатели ТЭЦ, а информация, полученная в процессе этих решений, служит основой для таких последующих этапов технического проектирования, как разработка развернутой тепловой схемы, выбор типоразмеров вспомогательного тепломеханического оборудования и т.д. Поэтому в данном случае оправдано применение достаточно сложных математических моделей, эффективным инструментом построения которых является СМПП.

Следует подчеркнуть, что применение методов математического моделирования и оптимизации не исключает необходимости привлечения опыта и интуиции проектировщиков при принятии решений, поскольку квалифицированный инженер по результатам оптимизации схемы теплоснабжения, на основе своего опыта, с учетом специфики задачи в состоянии указать относительно небольшое число конкурентоспособных вариантов оборудования и тепловых схем, дальнейшее исследование которых должно вестись с применением математических методов.

После назначения конкурентоспособных наборов турбин и принципиальных тепловых схем задача состоит в нахождении для каждого набора приведенных затрат критерия эффективности, на основании которого производится сопоставление проектных решений. Для этого необходимо определить число энергетических и пиковых котлов, устанавливаемых на ТЭЦ, годовой расход топлива, отпуск электроэнергии и ряд других показателей.

Выбор энергетических и пиковых котлов для каждого варианта состава турбин производится на основании расчета тепловой схемы ТЭЦ в двух режимах: максимально зимнем (I) и аварийном (II), причем результаты выбора зависят от принятых значений независимых режимных параметров. В вариантных расчетах эти параметры задает проектировщик на основании неформальных, эвристических соображений, что может привести к принятию далеко не оптимальных решений. Ниже приводится более строгий подход, состоящий в назначении состава котлов на основе оптимизационных расчетов тепловых схем.

При проектировании крупных отопительных ТЭЦ количество энергетических котлов (при заданном типе) однозначно определяется составом турбин. Задача состоит лишь в выборе пиковых котлов. Для обеспечения минимума приведенных затрат число ПК $R_{\text{пк}}$ должно быть выбрано минимально необходимым по условию обеспечения работы ТЭЦ в I и II режимах.

Для определения $R_{\text{пк}}$ нужно решить две задачи по минимизации суммарной тепловой нагрузки ПК ($Q^{\Sigma}_{\text{пк}}$) соответственно в I и II режимах. Эти задачи формулируются следующим образом:

найти

$$Q^{\Sigma\,\text{I}}_{\text{пк}} = \min_{X_{\text{э}} \in \bar{\Omega}(C^{\text{I}})} Q^{\Sigma}_{\text{пк}}(X_{\text{э}}, C^{\text{I}}), \tag{7.1}$$

$$Q^{\Sigma\,\text{II}}_{\text{пк}} = \min_{X_{\text{э}} \in \bar{\Omega}(C^{\text{II}})} Q^{\Sigma}_{\text{пк}}(X_{\text{э}}, C^{\text{II}}), \tag{7.2}$$

где C^{I} и C^{II} – векторы исходных данных в I и II режимах; $X_{\text{э}}$ – вектор оптимизируемых независимых режимных параметров тепловой схемы при

работе ТЭЦ по электрическому графику; $\bar{\Omega}(C^{\mathrm{I}})$ и $\bar{\Omega}(C^{\mathrm{II}})$ – множества допустимых значений вектора $X_э$ соответственно в I и II режимах.

Векторы C^{I} и C^{II} задают внешние условия работы ТЭЦ в I и II режимах, термодинамические параметры в ряде узлов схемы, конструктивные характеристики оборудования. В соответствии с требованиями "Норм технологического проектирования тепловых электростанций" [58] в I режиме задаются: расчетные расходы пара к внешним потребителям; параметры сетевой воды, соответствующие расчетной температуре наружного воздуха; суммарная электрическая мощность ТЭЦ, равная ее номинальной мощности (для данного набора турбин). Во II режиме задаются: расчетные расходы пара; параметры сетевой воды, соответствующие отопительной нагрузке, равной 70% от расчетной; суммарная электрическая мощность ТЭЦ, уменьшенная по сравнению с I режимом на мощность самой крупной для данного набора турбины ТЭЦ.

Компонентами вектора $X_э$ являются расходы теплоты или пара из регулируемых отборов турбин, электрическая мощность турбин типа Т и ПТ, температуры сетевой воды на выходе из основных подогревателей и т.д.

Вектор $X_э$ принадлежит множеству $\bar{\Omega}(C^{\mathrm{I}})$ в том случае, если для функций $g_j(X_э, C^{\mathrm{I}})$, $j = \overline{1, M}$, учитывающих технические ограничения на оптимизируемые параметры, выполняется условие $g_j(X_э, C^{\mathrm{I}}) \geqslant 0$. Аналогично определяется принадлежность $X_э$ множеству $\bar{\Omega}(C^{\mathrm{II}})$. Ограничения вводятся на следующие параметры: расходы острого пара на турбины, расходы пара или теплоты из регулируемых отборов, электрические мощности турбин, температура сетевой воды на выходе из основных и пиковых подогревателей, расход пара через редукционно-охладительные установки, суммарная производительность энергетических котлов и некоторые другие режимные параметры тепловой схемы.

Поскольку при решении задач (7.1) и (7.2) $R_{\mathrm{пк}}$ неизвестно, ограничение на суммарную теплопроизводительность ПК не учитывается. Так как в I режиме работают все энергетические котлы, а во II один котел не работает, ограничение на суммарную паропроизводительность энергетических котлов в I режиме имеет вид

$$R_{\mathrm{эк}} D^{\mathrm{н}}_{\mathrm{эк}} - D^{\Sigma}_0 \geqslant 0, \tag{7.3}$$

а во II режиме соответственно

$$(R_{\mathrm{эк}} - 1) D^{\mathrm{н}}_{\mathrm{эк}} - D^{\Sigma}_0 \geqslant 0. \tag{7.4}$$

Здесь $R_{\mathrm{эк}}$ – число энергетических котлов, устанавливаемых на ТЭЦ; $D^{\mathrm{н}}_{\mathrm{эк}}$ – номинальная паропроизводительность одного котла; D^{Σ}_0 – суммарный расход острого пара по ТЭЦ.

Число ПК, принимаемых к установке на ТЭЦ, определяется как наименьшее целое число, удовлетворяющее условию

$$R_{\mathrm{пк}} Q^{\mathrm{н}}_{\mathrm{пк}} \geqslant \max(Q^{\Sigma \mathrm{I}}_{\mathrm{пк}}, Q^{\Sigma \mathrm{II}}_{\mathrm{пк}}), \tag{7.5}$$

где $Q^{\mathrm{н}}_{\mathrm{пк}}$ – номинальная теплопроизводительность пикового котла.

Очевидно, что определенное таким образом число ПК будет обеспечивать минимум приведенных затрат (для заданного набора турбин и числа энергетических котлов), поскольку уменьшение числа ПК недопустимо,

а увеличение приведет к росту капиталовложений без повышения тепловой экономичности ТЭЦ.

Наибольшие вычислительные трудности при определении приведенных затрат связаны с нахождением годовых расходов топлива на энергетические и пиковые котлы и годового отпуска электроэнергии, поскольку при этом необходимы оптимизационные расчеты тепловых схем. Существенным недостатком действующей методики [59] является определение данных величин на основе расчета схемы лишь в двух режимах: средне-зимнем и средне-летнем. Это вносит значительную погрешность и не позволяет учесть влияние таких факторов, как неравномерность суточного и годового графиков отпуска теплоты внешним потребителям и графика работы ТЭЦ в электроэнергетической системе, что может привести к принятию неоптимальных решений по основному оборудованию и структуре тепловой схемы.

Поэтому в рассматриваемой методике для определения технико-экономических показателей ТЭЦ учитывается большое число режимов, хорошо представляющих все множество режимов работы станции. Как правило, рассматривается от 5 до 12 таких представительных режимов (число режимов зависит от степени неравномерности графиков нагрузок ТЭЦ). Представительные режимы разбиты на группы таким образом, что все режимы каждой группы характеризуют работу станции при одном значении температуры наружного воздуха. Между собой режимы группы различаются расходами пара к внешним потребителям и характером использования ТЭЦ в энергосистеме. В этом случае годовые расходы топлива на энергетические и пиковые котлы и годовой отпуск электроэнергии от ТЭЦ определяются следующими выражениями:

$$B_{эк}^{год} = \sum_{j=1}^{V} \sum_{i=1}^{r} [B_{эк\,ij}^{час} - N_{ij}(1 - k_{рj}) b_{ij}] \tau_{ij}, \tag{7.6}$$

$$B_{пк}^{год} = \sum_{j=1}^{V} \sum_{i=1}^{r} B_{пк\,ij}^{час} \tau_{ij}, \tag{7.7}$$

$$Э_{отп}^{год} = \sum_{j=1}^{V} \sum_{i=1}^{r} N_{ij} k_{рj} \tau_{ij}, \tag{7.8}$$

где индексы: i — номер режима работы ТЭЦ, j — номер группы режимов работы ТЭЦ; $B_{эк}^{год}$, $B_{пк}^{год}$ — годовой расход условного топлива на энергетические и пиковые котлы; $B_{эк\,ij}^{час}$, $B_{пк\,ij}^{час}$ — часовой расход условного топлива на энергетические и пиковые котлы; $Э_{отп}^{год}$ — годовой отпуск электроэнергии от ТЭЦ; N_{ij} — полезная электрическая мощность ТЭЦ; $k_{рj}$ — коэффициент, позволяющий учесть недоотпуск электроэнергии в связи с ремонтными и аварийными простоями оборудования; b_{ij} — расход условного топлива на единицу отпущенной электроэнергии; τ_{ij} — условное время работы станции; V — число групп режимов; r — число режимов в группе.

Для определения τ_{ij}, $i = \overline{1, r}$; $j = \overline{1, V}$, необходимо предварительно вычислить суммарное время работы станции в режимах, относящихся к каждой группе $\tau_j^{гр}$, $j = \overline{1, V}$. Определение $\tau_j^{гр}$ производится следующим обра-

зом. Режимы работы станции в неотопительный период составляют одну (V-ю) группу режимов и $\tau_V^{\text{гр}} = \tau_{\text{неот}}$, где $\tau_{\text{неот}}$ – продолжительность неотопительного периода. Режимы работы в отопительный период составляют остальные $(V-1)$ групп. Время работы станции в режимах каждой группы $\tau_j^{\text{гр}}$ $(j = \overline{1, V-1})$ определяется в результате разбиения интегрального графика тепловой нагрузки на $(V-1)$ частей таким образом, что площади всех частей графика равны между собой. Условие равенства площадей обеспечивает большую представительность режимов с низкой температурой наружного воздуха, что позволяет точнее учесть влияние пиковых источников на технико-экономические показатели ТЭЦ.

Назначение числа групп, числа режимов в группе и распределение длительности режимов в пределах каждой группы проводится исходя из конкретного вида графиков паровой и электрической нагрузок. Так, при равномерных в течение суток графиках группа может состоять только из одного режима.

Для определения часовых расходов топлива на котлы и электрических мощностей ТЭЦ в случаях работы станции по тепловому графику по всем сопоставляемым вариантам в каждом представительном режиме необходимо провести расчет тепловой схемы. Одним из основных условий сопоставимости различных вариантов является требование о постановке каждого из них в оптимальные условия. В частности, это значит, что распределение тепловых и электрических нагрузок между агрегатами ТЭЦ должно быть выбрано таким, чтобы приведенные затраты были минимальными. Это требование в зависимости от графика работы станции в энергосистеме приводит к следующим двум задачам оптимального распределения нагрузок между агрегатами ТЭЦ.

1. При работе ТЭЦ по электрическому графику

$$\min \text{И}^{\text{час}}(X_{\text{э}}, C^{ij}), \tag{7.9}$$

$$X_{\text{э}} \in \Omega(C^{ij}),$$

где C^{ij} – вектор исходных данных в i-м режиме j-й группы; Ω – множество допустимых значений вектора $X_{\text{э}}$ в i-м режиме j-й группы; оно отличается от ранее рассмотренного множества $\bar{\Omega}$ тем, что среди формирующих его ограничений имеется ограничение на производительность ПК вида

$$R_{\text{пк}} Q_{\text{пк}}^{\text{н}} - Q_{\text{пк}}^{\Sigma} \geqslant 0. \tag{7.10}$$

2. При работе станции по тепловому графику

$$\min [\text{И}^{\text{час}}(X_{\text{т}}, C^{ij}) + (N_{ij}^{\text{баз}} - N_{ij}(X_{\text{т}}, C^{ij}))\, \text{з}^{\text{эт}}]\, \tau_{ij}, \tag{7.11}$$

$$X_{\text{т}} \in \Omega_{\text{т}}(C^{ij}),$$

где $X_{\text{т}}$ – вектор оптимизируемых параметров при работе ТЭЦ по тепловому графику; он отличается от $X_{\text{э}}$ тем, что среди его компонентов нет электрических мощностей турбин типов Т и ПТ; $\Omega_{\text{т}}$ – множество допустимых значений вектора $X_{\text{т}}$, отличие его от множества $\bar{\Omega}$ состоит в том, что среди формирующих $\Omega_{\text{т}}$ ограничений нет ограничения на минимальную суммарную электрическую мощность ТЭЦ; $\text{з}^{\text{эт}}$ – удельные замыкающие затраты на электроэнергию, принимаемые для сопоставления вариантов оборудо-

вания с равной располагаемой мощностью, но различным отпуском электроэнергии (поскольку изменение N_{ij} не влияет на располагаемую мощность ТЭЦ); $N_{ij}^{баз}$ – электрическая мощность некоторого базового (вообще говоря, произвольного) варианта оборудования ТЭЦ в i-м режиме j-й группы.

Принятый в задаче (7.11) вид целевой функции позволяет учесть как топливные затраты по ТЭЦ, так и замыкающие затраты на электроэнергию в электроэнергетических системах и обеспечивает минимум приведенных затрат.

Определение приведенных затрат i-го сопоставляемого варианта оборудования и схемы $З_i$ производится по выражению (индексом i помечены те величины, которые при переходе от варианта к варианту меняют свое значение)

$$З_i = К_i^{ТЭЦ} E_н + В_{экi}^{год} З_{эк}^{т} + В_{пкi}^{год} З_{пк}^{т} + З_i^{эл} + \\ + [\varphi_{ар} К_i^{ТЭЦ} + П^{ТЭЦ} M_i^{ТЭЦ} + П^{пк} M_i^{пк}] \varphi_{об}, \qquad (7.12)$$

где $К_i^{ТЭЦ}$ – капиталовложения по ТЭЦ; $E_н$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; $В_{экi}^{год}$, $В_{пкi}^{год}$ – годовой расход условного топлива на энергетические и пиковые котлы; $З_{эк}^{т}$, $З_{пк}^{т}$ – удельные замыкающие затраты на используемый энергетическими и пиковыми котлами вид топлива; $З_i^{эл}$ – замыкающие затраты на электроэнергию; $\varphi_{ар}$ – коэффициент, учитывающий отчисления на амортизацию и текущий ремонт; $П^{ТЭЦ}$, $П^{пк}$ – годовой фонд заработной платы на одного работающего соответственно на ТЭЦ и пиковой котельной; $M_i^{ТЭЦ}$, $M_i^{пк}$ – численность персонала ТЭЦ и пиковой котельной; $\varphi_{об}$ – коэффициент, учитывающий общестанционные расходы.

Поскольку при оптимизации состава основного оборудования и тепловой схемы ТЭЦ приходится многократно проводить оптимизационные расчеты тепловой схемы, эффективность всей методики существенно зависит от эффективности метода оптимизацин непрерывно изменяющихся параметров.

Во всех рассматриваемых выше случаях оптимизация параметров сводится к задаче нелинейного программирования следующего вида:

$$\min_{X \in \Omega} F(X), \qquad (7.13)$$

где X – вектор оптимизируемых параметров; F – целевая функция; $\Omega = \{ X / g_j(X) \geqslant 0, j = \overline{1, M} \}$ – множество допустимых значений X. Особенность этой оптимизационной задачи – относительно простая система нелинейных уравнений, описывающих технологическую схему ТЭЦ (по сравнению, например, с системами, подробно описывающими теплофикационные турбоустановки), и соответственно малое время расчета функций F и g_j на ЭВМ. Поэтому для решения задачи эффективны методы с достаточно простым алгоритмом, пусть и не обеспечивающие минимального числа обращений к расчету технологической схемы ТЭЦ. Соответственно для решения рассматриваемой задачи использовался метод безусловных последовательных минимизаций с логарифмической функцией штрафа [60].

Его достоинство состоит в сведении исходной задачи с ограничениями к последовательности более простых задач на безусловную минимизацию функций

$$L^t(X) = F(X) - r^t \sum_{j=1}^{M} \ln(g_j), \qquad (7.14)$$

$$r^t > r^{t+1} > 0, \quad \lim_{t \to \infty} r_t = 0.$$

Однако логарифмическая штрафная функция имеет сильную овражность вблизи границ допустимого множества Ω, что делает неэффективными для ее минимизации известные методы первого порядка. Использование методов второго порядка здесь также неэффективно из-за необходимости вычисления конечно-разностным способом вторых производных, что связано с большими затратами машинного времени. Поэтому для минимизации штрафной функции разработан специальный метод первого порядка, имеющий высокую эффективность [57]. Суть его состоит в том, что на каждой итерации ищется безусловный минимум вспомогательной функции $\bar{L}^t$, образующейся из L^t в результате линеаризации F и g_j. Направление, ведущее в точку минимума $\bar{L}^t$, принимается в качестве направления спуска L^t. Решение этой задачи намного проще, поскольку $\bar{L}^t$ – явная функция. Предложенный способ поиска направления спуска позволил существенно (примерно в 5 раз по сравнению с методом сопряженных градиентов) сократить число итераций без значительного увеличения времени, затрачиваемого на одну итерацию.

Пример выбора состава основного оборудования ТЭЦ. В качестве примера рассмотрим задачу выбора оптимального состава оборудования для промышленно-отопительной ТЭЦ, имеющей следующие расчетные тепловые нагрузки: в паре 1,6 МПа – 430 т/ч; в паре 1,2 МПа – 1470 т/ч; в горячей воде по температурному графику 150/70 °С – 5360 ГДж/ч; в горячей воде по температурному графику 180/70 °С – 838 ГДж/ч. В отопительный период по условиям электроэнергетической системы станция работает по электрическому графику с номинальной мощностью, а в неотопительный – с мощностью, равной 80% от номинальной. К установке на ТЭЦ приняты энергетические котлы производительностью 420 т/ч и пиковые водогрейные котлы теплопроизводительностью 419 ГДж/ч. Топливом для котлов ТЭЦ является бурый уголь. Сравнение проводилось для пяти заранее заданных наборов турбин. Поскольку эти наборы отличались друг от друга лишь числом параллельно включенных в тепловую схему турбин разных типов, расчеты проводились с использованием одной полученной с помощью СМПП-6 программы, оперирующей группами однотипных турбин. Причем для перехода от одного набора турбин к другому требовалось лишь изменить числовую информацию, задающую число турбин в каждой группе. Система, описывающая тепловую схему станции, состояла из 120 линейных и нелинейных алгебраических уравнений, связывающих 203 переменные. Оптимизация режимов работы ТЭЦ проводилась по 11 оптимизируемым режимным параметрам, при этом учитывалось 36 ограничений в форме линейных и нелинейных неравенств. Для каждого варианта определялось число пиковых котлов.

Таблица 7.1. **Сопоставление вариантов состава оборудования**

Номер варианта	Состав оборудования	Оптимальное число		Разница			Перерасход приведенных затрат, тыс. руб./год
		энергетических котлов	ПК	в отпуске электроэнергии, млн кВт·ч	капитальных вложений, млн руб.	расходов топлива, тыс. т у. т/год	
1	2×ПТ-135 + 2×Т-175 + + 2×Р-100	12	6	370	15,0	59,8	357
2	ПТ-135 + 3×Т-175 + 3×Р-100	14	3	896	28,6	325,7	880
3	ПТ-135 + 2×Т-175 + 2×Р-100	10	9	−640	−10,9	−166,4	2230
4	2×ПТ-135 + 3×Т-175 + + 2×Р-100	14	4	1257	42,9	441,3	1700
5	ПТ-135 + 2×Т-175 + 3×Р-100	12	5	0	0	0	0

Для всех вариантов основного оборудования, полученных в результате нахождения конкурентоспособных сочетаний котлов, определялись технико-экономические показатели. При вычислении $В_{эк}^{год}$, $В_{пк}^{год}$, $Э_{отп}^{год}$ для каждого варианта проводились оптимизационные расчеты тепловой схемы ТЭЦ в пяти представительных режимах.

Перерасход приведенных затрат по сравнению с оптимальным вариантом (5) для различных наборов турбин представлен в табл. 7.1. Проведение всех расчетов в данной задаче потребовало около 90 мин машинного времени БЭСМ-6. Рассмотрение результатов расчетов в табл. 7.1 показывает, что оптимальным является 5-й вариант состава основного оборудования ТЭЦ. Несколько большими затратами характеризуется 1-й вариант. Однако вследствие большего числа турбин типа ПТ в 1-м варианте он обеспечивает бо́льшую гибкость и надежность при нерасчетных отклонениях в потреблении технологического пара. Это должно учитываться проектировщиками при окончательном выборе варианта состава оборудования.

7.3. Оптимизация параметров серийной паротурбинной установки ТЭЦ

Теплофикационные паротурбинные установки (ПТУ) ТЭЦ выпускаются, как правило, крупными сериями. Различные экземпляры серийной установки работают при разных соотношениях и графиках изменения тепловых и электрических нагрузок, разных стоимостях топлива и электроэнергии и т.д. Все это должно быть учтено при оптимизации установок: номинального давления в регулируемых отборах пара на теплофикацию и в нерегулируемых регенеративных отборах, концевых температурных напоров сетевых подогревателей, пропускной способности части низкого давления турбины и т.п. Назовем их первой группой оптимизирующих параметров.

Наиболее рациональным для учета различных условий работы разных экземпляров установок одной серии представляется подход, состоящий

в учете при оптимизации приведенных затрат в целом по серии. Для этого из всего возможного многообразия условий работы серийной ПТУ выделяются несколько типичных сочетаний. Для каждого из них назначается несколько режимов работы, достаточно хорошо представляющих все режимы работы установки в течение года. Возможный метод определения таких представительных режимов был рассмотрен выше.

Суммарные приведенные затраты для серии определяются из следующих соображений. При каждом типичном сочетании условий может быть оценена суммарная мощность потенциальных потребителей теплоты серийных ПТУ и работающих совместно с ними пиковых источников. Этой мощности соответствует известное суммарное годовое потребление теплоты.

Теплофикационная теплоэнергетическая установка (ТЭУ), под которой здесь понимается ПТУ и работающие совместно с ней пиковые ИТ, при различных значениях оптимизируемых параметров будет иметь разные отпуски теплоты и электроэнергии. Одно из основных условий сопоставления вариантов в теплоэнергетике – их равный энергетический эффект, заключающийся в равенстве для сравниваемых вариантов отпуска потребителю энергии. В данном случае все варианты должны иметь равные отпуски тепла Q_j^{Σ} и электроэнергии $Э_j^{\Sigma}$ по каждому j-му сочетанию условий работы ПТУ серии. Приведение к одинаковому отпуску теплоты может быть обеспечено за счет выбора соответствующего количества установок, а к равному отпуску электроэнергии – путем учета замыкающих затрат на нее в энергосистеме.

На основании изложенного при j-м сочетании условий работы установки приведенные затраты для i-го варианта значений оптимизируемых переменных имеют вид

$$З_{ij} = \tilde{З}_{ij} n_{ij} + (Э_j^{\Sigma} - Э_{ij} n_{ij})\, з_j^{эл}, \qquad (7.15)$$

где n_{ij}, $\tilde{З}_{ij}$ и $Э_{ij}$ – число ТЭУ, приведенные затраты собственно по одной установке и годовой отпуск электроэнергии; $Э_j^{\Sigma}$ – базисный суммарный годовой отпуск электроэнергии от ТЭЦ одной серии (к нему приводится отпуск всех вариантов); $з_j^{эл}$ – удельные замыкающие затраты на электроэнергию.

Величина n_{ij} определяется из условия обеспечения заданного суммарного отпуска теплоты Q_j^{Σ}:

$$n_{ij} = Q_j^{\Sigma}/Q_{ij}, \qquad (7.16)$$

где Q_{ij} – годовой отпуск теплоты от одной ТЭУ.

Суммарные приведенные затраты по серии определяются следующим образом:

$$З_i^{c} = \sum_{j=1}^{J} З_{ij}, \qquad (7.17)$$

где J – число сочетаний условий.

Обозначим суммарный отпуск теплоты по серии через $Q^{\Sigma} = \sum_{j=1}^{J} Q_j^{\Sigma}$.

Результаты оптимизации параметров ПТУ не изменятся, если вместо суммарных приведенных затрат (7.17) в качестве критерия эффективности

использовать удельные (на единицу отпущенной теплоты) приведенные затраты

$$з_i^c = З_i^c/Q^\Sigma = \sum_{j=1}^{J} З_{ij}/Q^\Sigma. \qquad (7.18)$$

Выражение для определения $з_i^c$ с учетом (7.15) и (7.16) после несложных преобразований примет вид

$$з_i^c = \sum_{j=1}^{J} \alpha_j \tilde{з}_{ij} + \sum_{j=1}^{J} \alpha_j (\bar{э}_j - \bar{э}_{ij})\, з_j^{эл}, \qquad (7.19)$$

где $\tilde{з}_{ij} = \tilde{З}_{ij}/Q_{ij}$ – удельные (на единицу отпущенной теплоты) приведенные затраты собственно по ТЭУ; $\alpha_j = Q_j^\Sigma/Q^\Sigma$ – ожидаемая доля мощности потребителей тепла при j-м сочетании условий от суммарной их мощности при всех условиях; $\bar{э}_{ij} = Э_{ij}/Q_{ij}$ – удельный годовой отпуск электроэнергии; $\bar{э}_j = Э_j^\Sigma/Q_j^\Sigma$ – базовый годовой удельный отпуск электроэнергии, к которому приводятся удельные выработки всех вариантов.

Из выражения (7.19) следует, что равный энергетический эффект по серии теплофикационных турбин будет достигнут при приведении вариантов к одинаковой годовой выработке электроэнергии на единицу отпущенного тепла, а не к равной абсолютной выработке одной установкой, как это следовало бы сделать при рассмотрении единичных установок.

Изложенный подход рассмотрен применительно к ПТУ типа Т. Он справедлив и для ПТУ типа ПТ, если для каждого сочетания условий будет задано соотношение между производственной и отопительной тепловыми нагрузками потенциальных потребителей.

Приведенные затраты собственно по ТЭУ $\tilde{З}_{ij}$ и годовой отпуск электроэнергии $Э_{ij}$ находятся из следующих выражений:

$$\tilde{З}_{ij} = E_н К_{ij} + з_j^{эк} \sum_{l=1}^{L} \tau_{jl} В_{ijl}^{эк} + з_j^{пи} \sum_{l=1}^{L} \tau_{jl} В_{ijl}^{пи}, \qquad (7.20)$$

$$Э_{ij} = \sum_{l=1}^{L} \tau_{jl} N_{ijl}, \qquad (7.21)$$

где $К_{ij}$ – капиталовложения в ПТУ и работающие с ней совместно пиковые ИТ; $E_н$ – коэффициент эффективности капиталовложений; L – число рассматриваемых режимов работы установки; τ_{jl} – число часов работы установки в l-м режиме; N_{ijl}, $В_{ijl}^{эк}$, $В_{ijl}^{пи}$ – полезная мощность ПТУ, часовые расходы топлива на энергетические котлы и пиковые ИТ в l-м режиме; $з_j^{эк}$, $з_j^{пи}$ – удельные замыкающие затраты на топливо энергетических котлов и пиковых ИТ.

Эффективность работы теплофикационной ПТУ при различных нагрузках зависит от режимных параметров, задающих распределение тепловых нагрузок между регулируемыми отборами пара и пиковыми источниками тепла и влияющих на выработку электроэнергии. Это расход острого пара на турбину, давление пара в регулируемых отборах и, возможно, некоторые другие параметры. Для корректного сопоставления различных вариантов параметров первой группы, определяющих конструкцию турбо-

установки, необходимо в каждом режиме проводить расчеты технологической схемы при оптимальных значениях режимных параметров, которые будем называть второй группой оптимизируемых параметров.

При нахождении приведенных затрат в установку для некоторого варианта значений оптимизируемых параметров первой группы требуется проводить расчеты технологической схемы двух типов: это один конструкторский расчет в некотором (в общем случае произвольном) режиме и серия поверочных расчетов для определения значений N_{jl}, $B^{эк}_{jl}$, $B^{пи}_{jl}$. Связь между расчетами двух типов осуществляется через конструктивные параметры элементов технологической схемы установки: поверхности нагрева теплообменников, неявно заданные пропускные способности отсеков турбин и другие. Они определяются при конструкторском расчете и служат исходными данными при следующих поверочных расчетах.

Вариант оптимизируемых параметров первой группы может считаться допустимым лишь в том случае, если паротурбинная установка обеспечит в сочетании с пиковыми источниками требуемый отпуск тепла, а если серия предназначена для установки на автономных ТЭЦ – то и требуемый отпуск электроэнергии во всех рассматриваемых режимах. Это означает, что для каждого режима существуют такие наборы режимных параметров, при которых все физико-технические ограничения на работу элементов установки будут выполнены. Речь идет об ограничениях на давление пара на входе в турбину, положительность концевых температурных напоров теплообменников, неотрицательность расходов рабочих тел и теплоносителей через элементы установки, положительность перепадов давлений в отсеках турбин и т.д.

Все ранее отмеченное приводит к следующей формальной постановке задачи оптимизации параметров теплофикационной паротурбинной установки (индекс варианта значений оптимизируемых переменных i опускается).

Требуется найти v_0; v_{jl}; $j = \overline{1,J}$; $l = \overline{1,L}$, обеспечивающие

$$\min\left[E_н \sum_{j=1}^{J} \alpha_j \frac{K_j}{Q_j} + \sum_{j=1}^{J} \frac{\alpha_j}{Q_j}\left(з_j^{эк} \sum_{l=1}^{L} \tau_{jl} B_{jl}^{эк} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + з_j^{пи} \sum_{l=1}^{L} \tau_{jl} B_{jl}^{пи}\right) + \sum_{j=1}^{J} \alpha_j \bar{э}_j Э_j^{эл} - \sum_{j=1}^{J} \frac{з_j^{эл} \alpha_j}{Q_j} \sum_{l=1}^{L} N_{jl} \tau_{jl}\right] \qquad (7.22)$$

при условиях

$$\Psi_0(v_0, y_0, c_0) = 0, \qquad (7.23)$$

$$\Psi_{jl}(v_0, z_j, c_{jl}, v_{jl}, y_{jl}) = 0, \quad j = \overline{1,J}; \quad l = \overline{1,L}; \qquad (7.24)$$

$$g_0(v_0, y_0, c_0) \geqslant 0, \qquad (7.25)$$

$$g_{jl}(v_0, z_j, c_{jl}, v_{jl}, y_{jl}) \geqslant 0, \quad j = \overline{1,J}; \quad l = \overline{1,L}; \qquad (7.26)$$

$$\underline{v}_0 \leqslant v_0 \leqslant \bar{v}_0, \qquad (7.27)$$

$$\underline{v}_{jl} \leqslant v_{jl} \leqslant \bar{v}_{jl}, \quad j = \overline{1,J}; \quad l = \overline{1,L}. \qquad (7.28)$$

Здесь $v_0 \in E^{пк}$ – вектор оптимизируемых параметров, определяющих конструкцию установки (параметры первой группы); $v_{jl} \in E^{пр}$ – векторы режимных оптимизируемых параметров (параметры второй группы);

$y_0 \in E^{sk}$ – вектор зависимых переменных, вычисляемых при конструкторском расчете; $y_{jl} \in E^{sp}$ – векторы зависимых переменных, вычисляемых при поверочных расчетах; $c_0 \in E^{tk}$ – вектор исходных данных для конструкторского расчета; $c_{jl} \in E^{tp}$ – векторы исходных данных при поверочных расчетах; $z \in E^{h}$ – вектор конструктивных характеристик установки:

$$z = \Phi(v_0, y_0, c_0), \tag{7.29}$$

$\Psi_0 \in E^{sk}$ – векторная функция, соответствующая математической модели ТЭУ, ориентированной на ее конструкторский расчет; $\Psi_{jl} \in E^{sp}$ – векторные функции, соответствующие математическим моделям ТЭУ, ориентированным на поверочные расчеты; $g_0 \in E^{mk}$ – вектор ограничений в виде неравенств, возникающих при конструкторском расчете; $g_{jl} \in E^{mp}$ – векторы ограничений в виде неравенств, возникающих при поверочных расчетах. В выражении функции цели в (7.22) капиталовложения в ТЭУ K_j, годовой отпуск теплоты внешним потребителям от ТЭУ Q_j, а также полезная электрическая мощность N_{jl} и часовые расходы топлива электрическими котлами $B_{jl}^{эк}$ и пиковыми ИТ $B_{jl}^{пи}$ являются функциями оптимизируемых и зависимых векторов вида

$$K_j = K_j(v_0, z, c_0), \tag{7.30}$$

$$Q_j = Q_j(v_0, y_{j0}, c_{j0}), \tag{7.31}$$

$$N_{jl} = N_{jl}(v_0, z_j, c_{jl}, v_{jl}, y_{jl}), \tag{7.32}$$

$$B_{jl}^{эк} = B_{jl}^{эк}(v_0, z_j, c_{jl}, v_{jl}, y_{jl}), \tag{7.33}$$

$$B_{jl}^{пи} = B_{jl}^{пи}(v_0, z_j, c_{jl}, v_{jl}, y_{jl}). \tag{7.34}$$

Капиталовложения K_j при различных j состоят из одинаковых капиталовложений в ПТУ и различных капиталовложений в пиковые ИТ. Вектор v_0, помимо перечисленных ранее параметров, включает расчетную тепловую нагрузку установки и мощность пиковых ИТ при различных сочетаниях условий.

Решение задачи (7.22)–(7.34) производится следующим образом. Для каждого варианта технологической схемы ПТУ решается задача нелинейного программирования с непрерывными оптимизируемыми параметрами v_0 и v_{jl}. В итоге находится оптимальное решение как по технологической схеме, так и по ее параметрам. Рассмотренная задача оптимизации непрерывных параметров является крайне сложной из-за больших вычислительных трудностей определения значений целевой функции и ограничений. Для решения подобных задач был разработан специальный метод, изложенный ниже.

Метод оптимизации параметров разработан для решения задач оптимизации, возникающих при исследовании проектируемых сложных технических систем, к которым относятся и теплофикационные ТЭУ. Структура метода определена наиболее существенными факторами, характерными для подобных задач. Среди них основными являются следующие особенности: математические модели объектов представлены нелинейными функциональными соотношениями, объединенными в системы большой размерности; время расчета значений функции цели, ограничений и их частных

производных продолжительно (80–90% времени решения оптимизационной задачи); размерность задачи оптимизации невелика (10–25 оптимизируемых переменных; 16–75 функций ограничений); имеются множества значений оптимизируемых переменных, при которых системы уравнений, описывающие установку, не имеют решений; совокупность оптимизируемых переменных составляют параметры, определяющие конструкцию установки и ее работу при различных режимах.

Рассмотренная задача оптимизации параметров серийной ПТУ (7.22)–(7.34), как и задачи оптимизации других ТЭУ при переменных условиях работы, в обобщенном виде может быть записана следующим образом.

Найти минимум функции

$$f(v_0, y_0, v_s, y_s) \tag{7.35}$$

при ограничениях

$$\Psi_0(v_0, y_0) = 0; \tag{7.36}$$

$$g_0(v_0, y_0) \geqslant 0; \tag{7.37}$$

$$\Psi_s(v_0, y_0, v_s, y_s) = 0, \quad s = \overline{1, S}; \tag{7.38}$$

$$g_s(v_0, y_0, v_s, y_s) \geqslant 0, \quad s = \overline{1, S}; \tag{7.39}$$

$$\underline{v}_0 \leqslant v_0 \leqslant \overline{v}_0; \tag{7.40}$$

$$\underline{v}_s \leqslant v_s \leqslant \overline{v}_s, \quad s = \overline{1, S}. \tag{7.41}$$

Здесь функция цели $f(v_0, y_0, v_s, y_s)$ имеет следующий вид:

$$f(v_0, y_0, v_s, y_s) =$$

$$= \alpha_0 \varphi_0(v_0, y_0) + \sum_{s=1}^{S} \alpha_s \varphi_s(v_0, y_0, v_s, y_s). \tag{7.42}$$

В задаче (7.35)–(7.42) $S = J \times L$, $\Psi_0 \in \mathrm{E}^{sk}$, $\Psi_s \in \mathrm{E}^{sp}$, $g_0 \in \mathrm{E}^{mk}$, $g_s \in \in \mathrm{E}^{mp}$, $s = \overline{1, S}$ – векторные функции; $v_0 \in \mathrm{E}^{nk}$, $v_s \in \mathrm{E}^{np}$, $s = \overline{1, S}$ – векторы оптимизируемых переменных; $y_s \in \mathrm{E}^{rk}$, $y_s \in E^{sp}$, $s = \overline{1, S}$ – векторы зависимых переменных. Напомним, что параметры вектора v_0 определяют конструкцию установки, а векторы v_s представляют собой совокупности режимных параметров.

Для решения задач вида (7.35)–(7.42) наиболее эффективно использование методов первого порядка. В этом случае требуется вычисление значений частных производных функций цели и ограничений на каждом шаге итеративного процесса поиска.

Наличие ограничений в виде равенств (7.36) и (7.38) позволяет использовать в процессе поиска приведенные градиенты функции цели f и ограничений $g_0, g_s, s = \overline{1, S}$ [61]. При этом равенства (7.36)–(7.38) представляют собой неявное задание функций $y_0(v_0)$ и $y_s(v_0, v_s)$. Применяя правила дифференцирования сложных и неявных функций к (7.36)–(7.39), (7.42) и учитывая их упрощенные структуры (функции Ψ_s и g_s в (7.38), (7.39) не зависят от параметров $v_i, y_i, i \neq s$), получим следующие соотношения

для определения приведенных градиентов:

$$\frac{dg_0}{dv_0} = \frac{\partial g_0}{\partial v_0} - \frac{\partial g_0}{\partial y_0}\left(\frac{\partial \Psi_0}{\partial y_0}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_0}{\partial v_0}, \tag{7.43}$$

$$\frac{dg_s}{dv_0} = \frac{\partial g_s}{\partial v_0} - \frac{\partial g_s}{\partial y_0}\left(\frac{\partial \Psi_0}{\partial y_0}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_0}{\partial v_0} - \frac{\partial g_s}{\partial y_s}\left(\frac{\partial \Psi_s}{\partial g_s}\right)^{-1} \times$$

$$\times\left[\frac{\partial \Psi_s}{\partial v_0} - \frac{\partial \Psi_s}{\partial y_0}\left(\frac{\partial \Psi_0}{\partial y_0}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_0}{\partial v_0}\right], \tag{7.44}$$

$$\frac{dg_s}{dv_s} = \frac{\partial g_s}{\partial v_s} - \frac{\partial g_s}{\partial y_s}\left(\frac{\partial \Psi_s}{\partial y_s}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_s}{\partial v_s}, \tag{7.45}$$

$$\frac{df}{dv_0} = \alpha_0\frac{d\varphi_0}{dv_0} + \sum_{s=1}^{S}\alpha_s\frac{d\varphi_s}{dv_0}, \tag{7.46}$$

где

$$\frac{d\varphi_0}{dv_0} = \nabla^t_{v_0}\varphi_0 - \nabla^t_{y_0}\varphi_0\left(\frac{\partial \Psi_0}{\partial y_0}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_0}{\partial v_0}, \tag{7.47}$$

$$\frac{d\varphi_s}{dv_0} = \nabla^t_{v_0}\varphi_s - \nabla^t_{y_0}\varphi_s\left(\frac{\partial \Psi_0}{\partial y_0}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_0}{\partial v_0} -$$

$$- \nabla^t_{y_s}\varphi_s\left(\frac{\partial \Psi_s}{\partial y_s}\right)^{-1}\left[\frac{\partial \Psi_s}{\partial v_0} - \frac{\partial \Psi_s}{\partial y_0}\left(\frac{\partial \Psi_0}{\partial y_0}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_0}{\partial v_0}\right], \tag{7.48}$$

$$\frac{df}{dv_s} = \alpha_s\left[\nabla^t_{v_s}\varphi_s - \nabla^t_{y_s}\varphi_s\left(\frac{\partial \Psi_s}{\partial y_s}\right)^{-1}\frac{\partial \Psi_s}{\partial v_s}\right]. \tag{7.49}$$

Здесь $\partial g_0/\partial v_0$, $\partial g_0/\partial y_0$, $\partial g_s/\partial v_0$, $\partial g_s/\partial v_s$, $\partial g_s/\partial y_0$, $\partial g_s/\partial y_s$, $\partial \Psi_0/\partial v_0$, $\partial \Psi_0/\partial y_0$, $\partial \Psi_s/\partial v_0$, $\partial \Psi_s/\partial v_s$, $\partial \Psi_s/\partial y_0$, $\partial \Psi_s/\partial y_s$ – матрицы частных производных; $\nabla_{v_0}\varphi_0$, $\nabla_{y_0}\varphi_0$, $\nabla_{v_0}\varphi_s$, $\nabla_{v_s}\varphi_s$, $\nabla_{y_0}\varphi_s$, $\nabla_{y_s}\varphi_s$ – векторы градиентов соответствующих функций. Предполагается, что матрицы $\partial \Psi_0/\partial y_0$, $\partial \Psi_s/\partial y_s$, $s = \overline{1,S}$ являются невырожденными. Приведенные градиенты имеют следующие размерности:

$dg_0/dv_0 - [mk \times nk]$, $dg_s/dv_0 - [mp \times nk]$, $dg_s/dv_s - [mp \times np]$,

$df/dv_0 - [l \times nk]$, $df/dv_s - [l \times np]$.

Компоненты матриц и векторов, стоящих в правых частях выражений (7.43)–(7.49), вычисляются конечно-разностным способом. Необходимо подчеркнуть, что для их вычисления не требуется многократно решать системы нелинейных уравнений (7.36) и (7.38), что пришлось бы сделать при непосредственном конечно-разностном дифференцировании выражений (7.37), (7.39), (7.42). Рассмотренный подход позволяет на 30–40% сократить расход машинного времени для вычисления частных производных. Кроме того, наличие значений матриц $\partial \Psi_0/\partial y_0$ и $\partial \Psi_s/\partial y_s$, $s = \overline{1,S}$, позволяет при решении систем (7.36) и (7.38) перейти от метода Зейделя к модифицированному методу Ньютона. Это обеспечивает экономию в 2–3 раза

машинного времени, затрачиваемого на расчет технологической схемы установки.

Использование приведенных градиентов (7.43)–(7.49) позволяет исключить из постановки задачи оптимизации (7.35)–(7.42) ограничения в виде равенств (7.36), (7.38) и векторы зависимых переменных y_0, y_s, $s = \overline{1,S}$. Обозначим через $x = (v_0, v_1, v_2, \ldots, v_S)$ обобщенный вектор оптимизируемых параметров размерностью $n = nk + Snp$. Представим ограничения в виде неравенств (7.37), (7.39) вектор-функцией $g = (g_0, g_1, g_2, \ldots \ldots, g_S)$ размерностью $M = mk + Smp$.

Исходя из сказанного, задачу оптимизации (7.35)–(7.42) можно сформулировать в следующем обобщенном виде:

$$\text{найти} \quad \min_{x \in R} f(x), \tag{7.50}$$

где

$$R = X \cap G, \tag{7.51}$$

$$X = \{ x \mid x^{\min} \leqslant x \leqslant x^{\max} \}, \quad X \subset \mathrm{E}^n, \tag{7.52}$$

$$G = \{ x \mid g_m(x) \geqslant 0, \quad m = \overline{1,M} \}. \tag{7.53}$$

Здесь x – n-мерный вектор оптимизируемых параметров; $f(x)$ – выпуклая, непрерывно дифференцируемая функция цели; $g_m(x)$, $m = \overline{1,M}$ – вогнутые, непрерывно дифференцируемые функции ограничений.

Основная идея разработанного метода оптимизации состоит в том, что для определения направления спуска используется информация о значениях частных производных функций f и g_m не только в текущей точке x^K, но и в точках, полученных на предыдущих итерациях. Метод, относящийся к группе методов с памятью, имеет весьма сложный алгоритм и требует хранения соответствующего накопителя информации в памяти ЭВМ. Его использование оправдано лишь для задач с невысокой размерностью вектора x и громоздким вычислением значений $f(x)$ и $g_m(x)$, что как раз характерно для задач оптимизации параметров ТЭУ. В этих условиях эффект от сокращения числа итераций значительно превышает дополнительные затраты времени на решение вспомогательных задач метода.

Последовательность текущих значений оптимизируемого вектора $\{x^K\}$ определяется соотношением

$$x^{K+1} = x^K + \lambda^K d^K, \tag{7.54}$$

где K – номер итерации; x^K – текущее значение вектора оптимизируемых переменных; d^K – вектор единичной длины, размерности n, определяющий направление поиска; λ^K – длина шага, получаемая как решение задачи минимизации одномерной функции $f(x^K + \lambda d^K)$ по λ. Направление d^K определяется соотношением

$$d^K = (x^{K'} - x^K) / \| x^{K'} - x^K \|, \tag{7.55}$$

где $x^{K'}$ – решение задачи линейного программирования на K-й итерации.

В основу метода положена идея метода погружения [62]. Пусть точка $x^K \in R$, тогда для получения нижней оценки функции цели требуется

решить следующую задачу линейного программирования:

$$\text{найти} \quad \min_{x \in R^K} x_{n+1}, \tag{7.56}$$

где

$$R^K = X^K \cap F^K \cap G^K, \tag{7.57}$$

$$X^K = \{x_1, x_{n+1} \mid x \in X, x_{n+1} \in (-\infty, \infty)\}, \tag{7.58}$$

$$F^K = \{x_1, x_{n+1} \mid -\tilde{f}^k(x) + x_{n+1} \geqslant 0; \ k = \overline{0, K}\}, \tag{7.59}$$

$$G^K = \{x, x_{n+1} \mid \tilde{g}_m^k(x) \geqslant 0, \ m = \overline{1, M}; \ k = \overline{0, K}\}. \tag{7.60}$$

Здесь $\tilde{f}^k(x)$, $\tilde{g}_m^k(x)$ – линейные аппроксимации функций $f(x)$ и $g_m(x)$ в точке x^k, т.е.

$$\tilde{f}^k(x) = f(x^k) - \frac{df(x^k)}{dx}(x - x^k),$$

$$\tilde{g}_m^k(x) = g_m(x^k) - \frac{dg_m(x^k)}{dx}(x - x^k),$$

где $df(x^k)/dx$, $dg_m(x^k)/dx$ – приведенные градиенты.

Условие (7.59) определяет множество, являющееся надграфиком линейной аппроксимации функции цели в точке x^k. Множество R^K является пересечением множества R^{K-1} с множеством, определяемым условиями (7.59), (7.60) при $k = K$. Таким образом, при решении задач линейного программирования образуется последовательность вложенных множеств

$$R^0 \supset R^1 \supset \ldots \supset R^{K-1} \supset R^K \supset \ldots$$

Решением задачи (7.56)–(7.60) являются точки $x^{K'}$, $x_{n+1}^{K'}$. Величина $f^K = x_{n+1}^{K'}$ представляет собой нижнюю оценку функции цели, при этом получаемые в процессе оптимизации оценки f^k, $k = \overline{1, K}$, удовлетворяют следующему условию:

$$f^1 < \ldots < f^k < \ldots < f^K.$$

В силу свойств выпуклости функции цели и вогнутости функций ограничений задачи (7.50)–(7.53) оптимальное решение $x^* \in R^k$, $\forall k = \overline{0, K}$, а последовательность $\{f^k\}$ сходится к $f(x^*)$.

Условием окончания итеративного процесса оптимизации служит выполнение неравенства

$$f(x^K) - f^K \leqslant \epsilon, \tag{7.61}$$

где $\epsilon > 0$ – заданная точность решения задачи. В точке x^K, удовлетворяющей условию (7.61), оценки множителей Лагранжа имеют вид

$$u_m = \sum_{k=0}^{K} u_{km}, \ m = \overline{1, M},$$

где u_{km} – множитель Лагранжа для ограничения, являющегося линейной

аппроксимацией m-го нелинейного ограничения в точке x^k, при решении задачи линейного программирования на K-й итерации.

Если условие (7.60) не выполняется, то процесс оптимизации продолжается. Точка $x^{K'}$ определяет направление поиска согласно (7.55).

Для определения длины шага λ^K решается подзадача одномерной оптимизации. Задача формулируется следующим образом:

найти λ^K, удовлетворяющее следующим условиям:

$$f(x^K + \lambda^K d^K) = \min_{0 < \lambda < \infty} f(x^K + \lambda d^K) \quad \text{и} \tag{7.62}$$

$$x^K + \lambda^K d^K \in R. \tag{7.63}$$

Для решения этой задачи использована комбинация модифицированного метода Ньютона и метода половинного деления.

Если исходная точка x_0 не принадлежит множеству G, то в этом случае требуется предусмотреть ввод в допустимое множество R. Для этого в пространстве E^{n+1} решается задача линейного программирования, постановка которой реализует модифицированный метод центров.

Найти

$$\max_{x \in \bar{R}^0} x_{n+1}, \tag{7.64}$$

где

$$\bar{R}^0 = X^0 \cap \bar{G}^0, \qquad \bar{X}^0 = \{x, x_{n+1} \mid x \in X, x_{n+1} \geqslant 1\}, \tag{7.65}$$

$$\bar{G}^0 = \{x, x_{n+1} \mid \tilde{g}_m^0(x) - x_{n+1} \geqslant 0, \ m = \overline{1, M}\}. \tag{7.66}$$

Решением задачи является точка $x^{0'}$, $x_{n+1}^{0'}$. Полагаем $x' = x^{0'}$. Если точка $x^1 \in R$, то вновь решается задача (7.64) на допустимом множестве $\bar{R}^1 = \bar{R}^0 \cap \bar{G}^1$,

где

$$\bar{G}^1 = \{x, x_{n+1} \mid \tilde{g}_m^1(x) - x_{n+1} \geqslant 0, \ m = \overline{1, M}\}. \tag{7.67}$$

Решение задач линейного программирования типа (7.64)–(7.67) продолжается до тех пор, пока не будет найдена точка $x^K \in R$. Для ввода в допустимую область обычно требуются одна–две итерации. В дальнейшем решение задачи одномерной минимизации (7.62) при выполнении условия (7.63) обеспечивает получение точек $x^K \in R$.

Если на текущей итерации K вектор x^K является граничной точкой множества R, то в этом случае целесообразно осуществить поворот вектора направления d^K внутрь допустимой области. В качестве точки $x^{K'}$, определяющей вектор d^K, принимается решение следующей задачи линейного программирования:

найти

$$\max_{x \in \hat{R}^K} x_{n+1}, \tag{7.68}$$

где

$$\hat{R}^K = \bar{X}^K \cap \hat{F}^K \cap \bar{G}^K, \tag{7.69}$$

$$\bar{X}^K = \{x, x_{n+1} \mid x \in X,\ x_{n+1} \geqslant 0\}, \tag{7.70}$$

$$\bar{F}^K = \{x, x_{n+1} \mid -\tilde{f}^k(x) + f^K + \delta^K \geqslant 0;\ k = \overline{0, K}\}, \tag{7.71}$$

$$\bar{G}^K = \{x_1, x_{n+1} \mid g_m^k(x) - x_{n+1} \geqslant 0;\ k = \overline{0, K};\ m = \overline{1, M}\}. \tag{7.72}$$

Здесь $\delta^K = (f(x^K) - f^K)\eta$, где $0 < \eta < 1$ – некоторая постоянная, например, $\eta = 0{,}2$. Оптимальная точка задачи (7.68)–(7.78) $x^{K'}$ удалена от любой из граней допустимого гипермногогранника R^K не менее чем на величину $x^{K'}$, при этом оценка функции цели возрастает не более чем на δ^K по сравнению с f^K. С ростом числа итераций величина δ^K уменьшается.

При построении допустимых множеств задач линейного программирования часть ограничений (7.60) не оказывает существенного влияния на размер допустимого множества R^K. Такие ограничения можно исключить из рассмотрения. Для этой цели разработана упрощенная процедура исключения избыточных ограничений [63].

Программы, реализующие описанный выше алгоритм, составляют блок оптимизации непрерывно изменяющихся параметров в программно-вычислительном комплексе, созданном в СЭИ для моделирования и оптимизации энергетических установок.

Глава восьмая

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА СТРУКТУРУ СЦТ

8.1. Общие методические положения

Количественный рост тепловых нагрузок современных городов и промышленных центров, появление новых типов основных ИТ (АСТ, АТЭЦ) и возможность совместной работы крупных ИТ на общую нагрузку требуют переоценки методов анализа перспективной структуры СЦТ, основанных на допущениях об одновременности возникновения всех элементов СЦТ (источников, тепловых сетей, тепловой нагрузки и т.д.) и отсутствии существующей части СЦТ.

В настоящее время далеко не полностью разработана методика оптимизации СЦТ с учетом динамики ее развития, предварительные основы которой закладывались в [2, 24]. Такая методика должна учитывать основные динамические факторы: непрерывность роста тепловых нагрузок в СЦТ, длительность сооружения крупных ИТ; наличие подготовленной нагрузки на начало расчетного периода развития СЦТ; тенденции изменения внешних условий; неполноту информации о пути достижения расчетной величины тепловой нагрузки и возможность адаптации выбранной стратегии развития СЦТ к изменяющимся условиям развития. Отсутствие учета перечисленных факторов может приводить к неоптимальным реше-

ниям по выбору структуры СЦТ, которые трудно откорректировать в приемлемое время даже путем значительных дополнительных капитальных вложений.

Результаты первоначальных приближенных исследований динамических факторов [2] показали влияние уровня централизации и очередности сооружения ТЭЦ на оценку экономичности теплофикации и выбор структуры СЦТ при длительности периода развития СЦТ более 5 лет. В дальнейшем в работе [24] изучалось влияние фактора динамики для СЦТ с ТЭЦ на органическом топливе с турбинами типа Т, ПТ и Р. Для ТЭЦ с турбинами Т и ПТ влияние динамики оказалось слабым и, хотя расчеты для ТЭЦ с турбиной Р дали иные результаты, установилось мнение о несущественности фактора динамики. Представляется, что этот вывод, базирующийся на рассмотрении одного типа ИТ – ТЭЦ на органическом топливе – с относительно близкими по капиталовложениям и расходам топлива наборами состава оборудования, не может быть распространен на СЦТ с другими типами ИТ и наборами оборудования. В самом деле, рассматриваемые в настоящее время возможные варианты типов ИТ (ТЭЦ на органическом топливе, АТЭЦ, РК, АСТ) формируют СЦТ с различающимися в несколько раз удельными капиталовложениями и удельными расходами органического топлива. Кроме того, в рамках указанных методик невозможно учесть влияние существующей части оборудования СЦТ, возможность его выбытия и влияние длительности сооружения основного ИТ.

Вместе с тем опыт моделирования динамических факторов развития СЦТ выделил основные методические и математические особенности таких задач: высокую размерность и нелинейность задач оптимизации СЦТ при детализации математического описания, принятого в статических постановках; неполноту информации о будущих условиях развивающейся СЦТ; несоответствие точности разрабатываемых методов с возможной точностью количественного описания учитываемых показателей.

Учитывая опыт моделирования развития СЦТ и общие методические подходы к оптимизации сложных развивающихся систем, динамическая задача оптимизации развития структуры СЦТ может быть сформулирована с энергетических позиций следующим образом.

Заданы: число и расположение тепловых районов города или промышленного центра; в каждом из районов показатели существующей части СЦТ (тепловая нагрузка и годовое потребление теплоты, мощность, состав оборудования и удельные расходы топлива для ИТ, пропускные способности существующих участков ТС); прирост расчетной тепловой нагрузки по годам планового периода и соответствующие годовые выработки теплоты; совокупность возможных мест размещения новых ИТ с указанием их типов, предельных производительностей и технико-экономических показателей; избыточный набор возможных новых участков трасс транзитных и магистральных ТС с указанием необходимых капитальных вложений в зависимости от пропускной способности участка и способа прокладки.

Требуется определить оптимальную, т.е. минимизирующую приведенные затраты, стратегию развития (по годам планового периода) структуры СЦТ, включающую: места размещения, типы, мощности, годовые выработки и состав основного оборудования основных и пиковых ИТ; про-

пускные способности и направления участков транзитных и магистральных ТС.

Полная математическая формализация поставленной задачи оптимизации развития структуры СЦТ является чрезвычайно громоздкой, а сама задача труднорешаемой. Поэтому в соответствии с описанным общим подходом (см. разд. 4.1) задача решается в два этапа: в статике (на конечный год развития) и динамике, а общая задача декомпозируется на ряд подзадач. Взаимная увязка решений и выбор окончательного решения осуществляются исследователем, учитывающим дополнительные факторы, не вошедшие в формальное описание задачи, а комплекс моделей служит инструментом количественного анализа обрабатываемой информации.

Уровни детализации используемой информации в статической и динамической постановках различны. Например, в статической постановке задачи оптимизации структуры СЦТ тепловая нагрузка СЦТ и необходимая выработка теплоты заданы с помощью характерного для данного города почасового графика нагрузки по продолжительности, а в динамической задаче – ежегодными максимальными часовыми нагрузками и средними числами часов использования максимума. Пиковые котельные и состав их оборудования рассматриваются в статической задаче детально по районам теплоснабжения, а в динамической задаче агрегируются и совокупность котельных заменяется одной (двумя) эквивалентной установкой с однородным по типоразмеру оборудованием. Таким образом, в динамике используемая информация представляется в более агрегированном виде и делается больше упрощающих предположений.

С другой стороны, динамическая постановка задачи оптимизации СЦТ требует дополнительной информации: длительности планового периода развития СЦТ, который выпадает из рассмотрения в статике; промежуточных значений тепловой нагрузки в годы развития; показателей длительности строительства основных ИТ и т.д. Использование в модели СЦТ этих данных позволяет определить суммарный (за период развития) расход топлива в СЦТ, выбрать год начала строительства основного ИТ, т.е. получить дополнительную (по сравнению с решением статической задачи) информацию об оптимальном варианте развития СЦТ. Это может отразиться на выборе окончательного варианта развития СЦТ в тех случаях, когда по приведенным затратам сравниваемые варианты близки, т.е. находятся в зоне равной экономичности.

Внешние условия развития СЦТ (уровни и темпы роста тепловых нагрузок, замыкающие затраты на используемые ресурсы и другие факторы) обычно неизвестны точно при длительных интервалах прогнозирования. Учет этих факторов при оптимизации СЦТ должен проводиться специальными методами (см. разд. 10.3). Особенность проявления динамических свойств решения задачи оптимизации СЦТ в условиях неполноты информации заключается в том, что появляются два дополнительных фактора: неопределенность в определении суммарной потребности в теплоте за плановый период (так как при заданной расчетной тепловой нагрузке могут меняться ее темпы роста в промежуточные годы) и возможность адаптации к изменению расчетной нагрузки СЦТ путем сдвига года начала строительства основного ИТ, а не изменением (корректировкой) его мощности.

В целом параллельное решение задачи оптимизации СЦТ в статике и динамике позволяет исследователю более обоснованно принять решение по оптимальному развитию СЦТ.

8.2. Динамика развития структуры ИТ в СЦТ

При формулировке динамической задачи оптимизации структуры ИТ в СЦТ принимались следующие содержательные допущения: основной ИТ вводится концентрированно и используется в каждом году максимально возможное время; пиковые ИТ рассматриваются в совокупности и на них устанавливается однородное по типам оборудование; сооружение тепловых сетей от основного ИТ к пиковым ведется равномерно и заканчивается к моменту пуска первого блока основного ИТ.

Динамическая задача оптимизации структуры ИТ в СЦТ формулируется в следующем виде.

Заданы: максимальная часовая тепловая нагрузка СЦТ по годам расчетного периода $(Q^1_{\max}, \ldots, Q^T_{\max})$; необходимое каждый планируемый год количество теплоты $(w_1, \ldots, w_T)$; технико-экономические показатели нового и установленного на начало планового периода оборудования ИТ и тепловых сетей по вариантам конфигурации СЦТ.

Требуется найти: число вводимых по годам развития СЦТ блоков основного $(n_1, \ldots, n_T)$ и пиковых $(m_1, \ldots, m_T)$ ИТ, число часов использования каждого из блоков $(h_1^{\text{осн}}, \ldots, h_T^{\text{осн}})$ и $(h_1^{\text{пк}}, \ldots, h_T^{\text{пк}})$ по годам расчетного периода, минимизирующие приведенные затраты в СЦТ за период ее создания и функционирования. Математически эта задача может быть записана так:

найти

$$\min З = \sum_{t=1}^{T} \{E_{\text{н}}(\text{К}_t^{\text{осн}}(n_t, T_{\text{стр}}) + \text{К}_t^{\text{пк}}(m_t) + \text{К}_t^{\text{тс}}(x_t, y_t)] + \\ + [\Delta\text{У}_t^{\text{осн}}(x_t, h_t^{\text{осн}}, T_{\text{стр}}) + \Delta\text{У}_t^{\text{пк}}(y_t, h_t^{\text{пк}}) + \Delta\text{У}_t^{\text{тс}}(x_t, y_t)](1+E_{\text{н.п}})^{T-t}\} \tag{8.1}$$

при ограничениях

$$x_t = x_0 + \sum_{\tau=1}^{t} n_\tau Q^{\text{осн}}, \quad t, \tau = 1, 2, \ldots, T, \tag{8.2}$$

$$y_t = y_0 + \sum_{\tau=1}^{t} m_\tau Q^{\text{пк}}, \tag{8.3}$$

$$x_t + y_t \geqslant Q^t_{\max}, \tag{8.4}$$

$$x_t h_t^{\text{осн}} + y_t h_t^{\text{пк}} = w^t, \tag{8.5}$$

$$0 \leqslant n_t \leqslant N_{\max}; \quad 0 \leqslant m_t \leqslant M_{\max}, \tag{8.6}$$

$$0 \leqslant h_t^{\text{пк}} \leqslant h^{\text{пк}}_{\max}; \quad 0 \leqslant h_t^{\text{осн}} \leqslant h^{\text{осн}}_{\max}(Q^t_{\max}, x_t), \tag{8.7}$$

где T – длительность расчетного периода; $\text{Е}_{\text{н}}$, $\text{Е}_{\text{н.п}}$ – коэффициенты эффективности капитальных вложений и разновременности затрат; $\text{К}_t^{\text{осн}}$,

$K_t^{пк}$, $K_t^{тс}$ – капитальные вложения в основной ИТ, ПК, тепловые сети в t-м году; $T_{стр}$ – длительность строительства основного ИТ; $\Delta U_t^{осн}$, $\Delta U_t^{пк}$, $\Delta U_t^{тс}$ – изменения эксплуатационных затрат по основному и пиковым ИТ и тепловым сетям в t-м году; x_0, y_0 – начальные мощности основного и пиковых ИТ; x_t, y_t – мощности основного и пиковых ИТ в t-м году; $Q^{осн}$, $Q^{пк}$ – мощности блоков основного и пиковых ИТ; N_{max}, M_{max} – максимальные количества устанавливаемых блоков основного и пиковых ИТ.

Ограничения (8.2) и (8.3) позволяют учесть начальное состояние СЦТ – подготовленную нагрузку, а ограничения (8.7) – возможные режимы отпуска теплоты. Отдельные составляющие приведенных затрат (8.1) вычисляются в каждый момент времени по принятым в расчетной практике методикам с учетом сделанных допущений.

Хотя сформулированная задача остается сложной оптимизационной задачей частично-целочисленного программирования, сделанные содержательные допущения и ограниченный набор типоразмеров блоков основного оборудования позволяют решить ее при расчетных длительностях развития СЦТ 15–20 лет полным перебором возможных вариантов.

Модель развития структуры ИТ реализована в виде отдельного блока в рамках ПВК (см. разд. 4.1) на языке ФОРТРАН применительно к ЕС ЭВМ.

Математическая формулировка (8.1)–(8.7) приведена для одноцелевых установок и включает балансы установленной мощности ИТ и тепловой нагрузки СЦТ; вырабатываемой и потребляемой теплоты; учитывает ограничения по максимальному числу устанавливаемых элементов основного оборудования; длительность строительства крупных ИТ. Для двухцелевых (многоцелевых) ИТ должны дополнительно учитываться балансы мощности и отпуска электроэнергии (остальных продуктов производства), связи с внешней энергосистемой. Полученные в моделях решения должны проверяться с точки зрения обеспечения заданного уровня надежности теплоснабжения, удовлетворять требованиям по балансам электрической и тепловой мощностей, а также отпуску электроэнергии и теплоты в аварийных условиях в соответствии с нормами технологического проектирования.

Предложенная модель позволяет исследовать основные интересные с энергетической точки зрения задачи: сопоставление разных типов ИТ при разработке схем теплоснабжения; определение оптимальных моментов ввода основного ИТ и его мощности; вычисление суммарного за период развития СЦТ расхода топлива; изучение влияния подготовленной нагрузки и ее неоднородности по технико-экономическим показателям на принимаемые решения по развитию СЦТ; оценивание влияния неоднозначности способа достижения расчетной величины тепловой нагрузки СЦТ (возможное изменение темпов роста нагрузки в процессе развития СЦТ).

Кроме того, возможно изучение целесообразных направлений изменения единичных мощностей блоков основного оборудования ИТ путем расширения первоначального набора типоразмеров и решения той же оптимизационной задачи и оценка влияния длительности сооружения основного ИТ на экономическую эффективность варианта развития структуры ИТ в СЦТ.

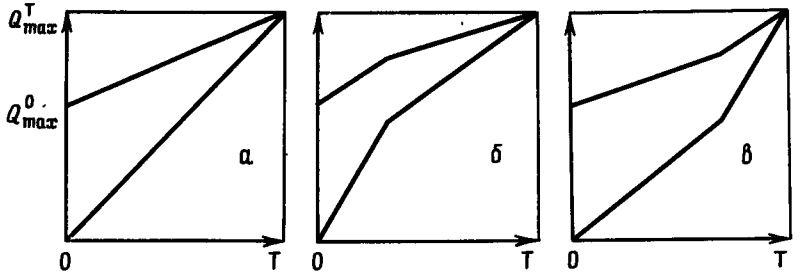


Рис. 8.1. Возможные варианты роста тепловой нагрузки в СЦТ

а–в – варианты набора тепловой нагрузки; $Q^{т}_{max}(Q^{0}_{max})$ – расчетная (начальная) нагрузка СЦТ, T – длительность периода прогнозирования

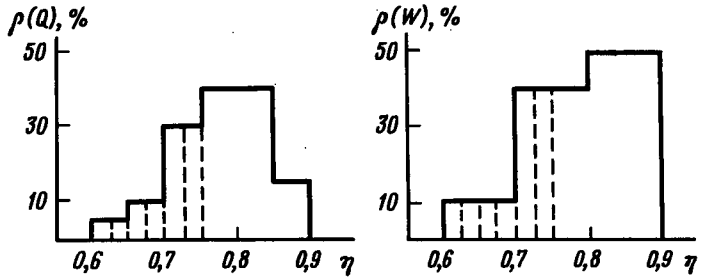


Рис. 8.2. Гистограмма технико-экономических показателей существующих к началу планового периода источников теплоты

$\rho(Q)$ – доля мощности существующих ИТ; η – КПД брутто ИТ; $\rho(W)$ – доля выработки теплоты существующими ИТ

Решение перечисленных задач и изучение динамических факторов проводилось в следующей последовательности: задавались два уровня расчетной тепловой нагрузки конечного года периода развития СЦТ длительностью 15 лет и три варианта возможных темпов роста нагрузки в процессе развития – равномерный, опережающий и замедленный, представленные на рис. 8.1; сначала исследовалось влияние динамических факторов при отсутствии подготовленной нагрузки – сооружение СЦТ начинается в новых районах города, потом при условии существования части ИТ на начало планового периода. В последнем случае совокупность имеющихся ИТ и их технико-экономические показатели целесообразно задавать в следующем виде. Если известны их мощности, КПД брутто (η) и годовые выработки теплоты (w), то можно описать существующие ИТ агрегированно с помощью соответствующих гистограмм (рис. 8.2). Здесь по оси абсцисс отложены КПД брутто котельных установок, а по оси ординат – доля мощности установок с соответствующим КПД. Аналогично представлена выработка теплоты. Анализируя гистограммы, начальную совокупность установок можно заменить одной-двумя усредненными установками, что позволит с достаточной точностью описать начальное состояние структуры ИТ в СЦТ и неоднородность их технико-экономических показателей.

Расчеты по оптимизации структуры ИТ в СЦТ проводились в динамической модели при технико-экономических показателях оборудования

и замыкающих затратах на топливо, аналогичных принимавшимся в статической модели (см. разд. 4.3) и для тех же климатических условий. Уровни тепловых нагрузок последнего года развития СЦТ принимались равными 1400 и 2100 МВт.

В табл. 8.1 приведены результаты оптимизации, когда подготовленная нагрузка отсутствует. Из этих данных видно, что оптимальным составом оборудования при расчетной тепловой нагрузке СЦТ 1400 МВт, найденным без учета фактора динамики, является вариант 2 (1 блок АСТ-500 и 16 котлов мощностью по 58 МВт). При решении задачи оптимизации СЦТ с учетом фактора динамики оптимальным становится вариант 4 (двухблочная АСТ-500 и 12 котлов по 58 МВт) для всех вариантов роста тепловой нагрузки СЦТ.

Учет динамики развития СЦТ уменьшает различие экономических показателей конкурирующих вариантов СЦТ с АСТ. Так, если при расчете без учета фактора динамики различие по приведенным затратам между вариантами 2 и 4 составляло 14%, то при учете фактора динамики это различие снизилось до 1%. И наоборот, возросла разница в экономической эффективности между вариантами СЦТ с АСТ и с РК. Интересен новый результат — получение в качестве оптимального варианта структуры ИТ с избыточной мощностью пиковых ИТ (вариант 4), который в принципе не мог быть выявлен при расчете без учета фактора динамики. Возможность его появления при учете фактора динамики определяется целесообразностью сдвига срока начала строительства АСТ к концу планового периода, так как при этом уменьшение приведенных затрат, обусловленных снижением затрат по капиталоемкой АСТ, превышает дополнительные затраты на создание и функционирование избыточной мощности пиковых ИТ.

Для расчетной тепловой нагрузки последнего года развития СЦТ 2100 МВт при решении задачи оптимизации СЦТ в статике оптимальным является вариант 7 состава оборудования СЦТ (с двухблочной АСТ).

Таблица 8.1. **Влияние динамики роста тепловых нагрузок на величину приведенных затрат в СЦТ при $Q^0_{max} = 0$**

Тепловая нагрузка на конечный год развития, МВт	Номер варианта	Структура ИТ в СЦТ	Приведенные затраты в СЦТ, %			
			Суммарные за период развития с учетом динамики, по вариантам роста тепловой нагрузки (рис. 8.3)			Без учета динамики
			а	*б*	*в*	
1400	1	2 РК по 6 × 116 МВт	107	127	95	102
	2	1 АСТ-500 + 16 × 58 МВт	101	111	92	100
	3	2 АСТ-500 + 8 × 58 МВт	101	110	94	110
	4	2 АСТ-500 + 12 × 58 МВт	100	110	91	114
2100	5	3 РК по 6 × 116 МВт	122	137	110	104
	6	1 АСТ-500 + 30 × 58 МВт	112	125	101	102
	7	2 АСТ-500 + 21 × 58 МВт	100	110	92	100
	8	2 АСТ-500 + 24 × 58 МВт	101	111	93	102

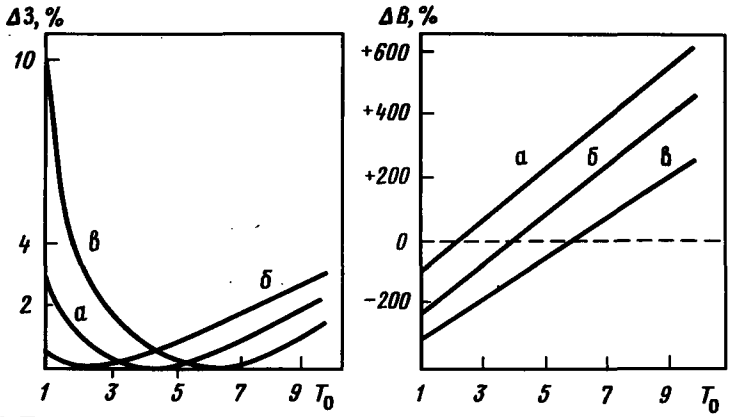


Рис. 8.3. Перерасход приведенных затрат ΔЗ и органического топлива ΔB в СЦТ в зависимости от года начала строительства T_0 двухблочной АСТ и варианта набора конечной нагрузки 1400 МВт

***а, б, в* – варианты роста тепловой нагрузки СЦТ**

Этот же вариант состава оборудования СЦТ оказывается оптимальным и при учете фактора динамики. Вместе с тем прослеживается тенденция сдвига вариантов оптимальной структуры СЦТ из области применения РК в область применения двухблочных АСТ. Так, при расчете СЦТ без учета фактора динамики вариант СЦТ с РК отличается от варианта СЦТ с двухблочной АСТ всего на 4%. Учет фактора динамики сделал вариант СЦТ с РК явно менее экономичным – приведенные затраты по нему на 18–27% выше, чем по варианту с двухблочной АСТ.

Анализ сроков ввода оборудования АСТ показывает, что оптимальный год начала строительства АСТ зависит как от структуры СЦТ, так и от темпов роста тепловой нагрузки СЦТ. При опережающем росте тепловых нагрузок оптимальный год начала строительства АСТ сдвигается к началу планового периода, при замедленном росте тепловой нагрузки – к концу планового периода (рис. 8.3). Расчеты показали, что эффективность варианта развития СЦТ на базе двухблочной АСТ весьма существенно зависит от срока ввода АСТ. Наилучшим этот вариант развития СЦТ становится только при оптимальном выборе года начала строительства АСТ. В противном случае вариант СЦТ с двухблочной АСТ может оказаться менее экономичным по сравнению с конкурирующими вариантами состава основного оборудования ИТ в СЦТ. Таким образом, в динамической постановке задачи оптимизации СЦТ нельзя говорить об оптимальном составе оборудования АСТ в отрыве от оптимального года начала строительства АСТ.

Кроме экономического критерия (приведенные затраты), при сравнении вариантов развития СЦТ с ИТ разных типов используются и другие критерии, особенно в тех случаях, когда по экономическому критерию варианты близки (равноэкономичны) [9]. Одним из важнейших дополнительных критериев является расход органического топлива в СЦТ. Результаты расчетов по выявлению влияния фактора динамики роста тепловых нагрузок в СЦТ на этот критерий приведены в табл. 8.2. Как

Таблица 8.2. **Влияние динамики роста тепловых нагрузок на расход органического топлива в СЦТ при $Q^{0}_{max} = 0$**

Тепловая нагрузка на конечный год развития, МВт	Номер варианта	Структура ИТ в СЦТ	Расход органического топлива в СЦТ			
			Суммарный и среднегодовой (в скобках) за период развития СЦТ с учетом динамики, по вариантам роста тепловой нагрузки СЦТ, млн т у.т. (млн т у.т./год)			Без учета динамики, млн т у.т./год
			а	*б*	*в*	
1400	1	2 РК по 6 × 116 МВт	5,61 (0,374)	6,5 (0,433)	4,7 (0,315)	0,693
	2	1 АСТ-500 + 16 × 58 МВт	1,60 (0,107)	2,20 (0,147)	1,63 (0,109)	0,307
	3	2 АСТ-500 + 8 × 58 МВт	0,50 (0,033)	0,47 (0,031)	0,55 (0,037)	0,045
	4	2 АСТ-500 + 12 × 58 МВт	1,04 (0,069)	0,77 (0,051)	1,30 (0,087)	0,045
2100	5	3 РК по 6 × 116 МВт	8,42 (0,561)	9,74 (0,649)	7,10 (0,473)	1,04
	6	1 АСТ-500 + 30 × 58 МВт	3,73 (0,249)	4,87 (0,325)	2,75 (0,183)	0,626
	7	2 АСТ-500 + 21 × 58 МВт	1,31 (0,087)	1,48 (0,099)	1,57 (0,104)	0,234

видно из этих данных, среднегодовые расходы органического топлива в СЦТ при учете фактора динамики значительно отличаются от расходов, полученных при статической постановке задачи. Например, для тепловой нагрузки конечного года развития СЦТ 1400 МВт и варианта 1 структуры ИТ статический подход дает величину 0,693 млн т у.т./год, а при учете динамики средний годовой расход органического топлива за период развития СЦТ (по вариантам роста тепловой нагрузки) составляет от 0,315 до 0,433 млн т у.т./год. В этом случае расчет СЦТ без учета фактора динамики дает завышенную оценку потребности в органическом топливе за период развития системы. Наоборот, для 4-го оптимального варианта структуры ИТ статический подход дает величину 0,045 млн т у.т./год, а при учете динамики среднегодовой расход органического топлива за период развития СЦТ (по вариантам роста тепловой нагрузки) составляет от 0,051 до 0,087 млн т у.т./год. Для этого варианта статический расчет СЦТ занижает потребность в органическом топливе.

Таким образом, расчеты СЦТ без учета фактора динамики дают значительную погрешность в оценке потребности в органическом топливе на период развития СЦТ и возможной экономии органического топлива при использовании АСТ в этот же период.

Следует отметить еще два эффекта, выявленные при расчетах с учетом динамики развития СЦТ, которые не могли быть получены при расчетах в статике: 1) существенное влияние темпов роста тепловой нагрузки на расход органического топлива за период развития СЦТ. В чистом виде этот эффект может быть оценен по варианту 6: расход органического топлива меняется от 4,87 млн т у.т./год для варианта быстрого роста тепловых нагрузок до 2,75 млн т у.т./год для варианта замедленного

роста тепловых нагрузок, т.е. в 1,8 раза. В остальных вариантах указанный эффект сочетается со вторым эффектом и не может быть выявлен в чистом виде; 2) влияние года начала строительства АСТ на расход органического топлива за период развития СЦТ. Проследить влияние этого эффекта можно путем сравнения вариантов 3 и 4 при одинаковых темпах роста тепловой нагрузки. Так, при среднем темпе роста нагрузки в СЦТ в период ее развития перенесение срока начала сооружения двухблочной АСТ со второго на четвертый год приводит к увеличению расхода органического топлива с 0,50 до 1,04 млн т у.т./год, т.е. в 2 раза. При замедленном темпе роста нагрузки, т.е. при переносе срока с третьего на шестой год, эффект еще больше: расход органического топлива возрастает с 0,56 до 1,30 млн т у.т./год – 2,4 раза. Более детально этот эффект показан на рис. 8.2.

Указанные эффекты нужно учитывать при выборе оптимального решения по структуре ИТ развивающейся СЦТ. Особенно существенна их роль при принятии решения в тех случаях, когда по основному экономическому критерию – приведенным затратам – варианты разнятся в пределах 1–3%, т.е. в зоне равной экономичности. Например, для нагрузки 1400 МВт сдвиг года начала строительства двухблочной АСТ на начало расчетного периода увеличивает приведенные затраты (вариант 4, равномерный рост нагрузки) на 3% и сокращает расход органического топлива за расчетный период на 43%.

Кроме случая, когда в начальный момент развития СЦТ тепловая нагрузка равна нулю, рассмотрены случаи развития СЦТ, имеющие на начало рассматриваемого периода подготовленную нагрузку. В свою очередь, этот этап исследований выполнен для двух характерных случаев: 1) сделано предположение, что технико-экономические показатели существующих котельных, покрывающих подготовленную нагрузку, совпадают с аналогичными показателями новых пиковых котельных; 2) технико-экономические показатели существующих котельных уступают показателям новых пиковых котельных.

В процессе развития СЦТ для первого случая существующие котельные не будут демонтироваться и при вводе АСТ будут использоваться в качестве пиковых котельных. Расчеты выполнены для подготовленной нагрузки, составляющей 20–80% от расчетной на конечный год развития СЦТ. В табл. 8.3 приведены результаты расчетов для 50%-ной подготовленной нагрузки. Анализ результатов расчетов показывает, что учет подготовленной тепловой нагрузки увеличивает различие показателей структуры ИТ в СЦТ по сравнению с результатами без учета подготовленной нагрузки. Например, для тепловой нагрузки последнего года развития СЦТ 1400 МВт при отсутствии подготовленной нагрузки варианты СЦТ с одноблочной и двухблочной АСТ (для равномерного роста нагрузки) экономичнее варианта СЦТ с РК на 6 и 7% соответственно. При нагрузке, подготовленной на 50%, относительная экономичность вариантов одноблочной и двухблочной АСТ возрастает до 15 и 19% по сравнению с СЦТ с РК. Для тепловой нагрузки последнего года развития СЦТ – 2100 МВт и при равномерности роста тепловой нагрузки соответствующее относительное расхождение вариантов по величине приведенных затрат еще более значительно.

Таблица 8.3. **Влияние 50%-ной подготовленной нагрузки на величину приведенных затрат и расход органического топлива в СЦТ**

Расчетная нагрузка СЦТ, МВт	Основной ИТ в СЦТ	Вариант набора нагрузки	Приведенные затраты в СЦТ за период развития, %	Расход топлива за период развития СЦТ, млн т у.т.
1400	РК	*а*	118	8,10
		б	119	8,50
		в	117	7,60
	1 блок АСТ-500	*а*	104	3,58
		б	105	3,96
		в	102	3,25
	2 блока АСТ-500	*а*	100	1,35
		б	100	1,50
		в	100	1,28
2100	РК	*а*	132	12,11
		б	131	12,76
		в	132	11,45
	1 блок АСТ-500	*а*	115	7,11
		б	114	7,71
		в	115	6,54
	2 блока АСТ-500	*а*	100	3,22
		б	100	3,64
		в	100	2,88

Наличие подготовленной тепловой нагрузки в СЦТ приближает срок ввода АСТ. Так, 50%-ная подготовленная нагрузка делает целесообразным начало строительства АСТ в первый год расчетного периода. Естественно, что при этом возрастает и количество вытесняемого за период развития СЦТ органического топлива (см. табл. 8.2 и 8.3).

Случай, когда теплогенерирующие установки, покрывающие к началу расчетного периода существующую нагрузку, менее экономичны по сравнению с новыми пиковыми котельными, не однозначен; он соответствует множеству возможных ситуаций, элементы которого различаются рядом технико-экономических показателей (тепловая экономичность, техническое состояние, удельные трудозатраты и др.) существующего генерирующего оборудования. Для каждой возможной ситуации может быть найдена оптимальная стратегия развития СЦТ, включая определение длительности периода использования разных типов существующих источников теплоты.

Для этого случая рассмотрен один достаточно характерный вариант технико-экономических показателей существующих ИТ.

Принималось, что из 50% подготовленной нагрузки 40% покрывают устаревшие котельные со средним КПД брутто $\eta = 0{,}75$, а остальные 60% — новые котельные ($\eta = 0{,}85$). Для рассматриваемых нагрузок 1400 и 2100 МВт это составит: 280 и 420 МВт старых установок, 420 и 630 МВт новых установок. Рост тепловой нагрузки принимался равномерным.

Рассматривались следующие стратегии развития ИТ в СЦТ: развитие РК без замены устаревшего оборудования ($РК_I$) и с заменой устаревшего оборудования в году τ ($РК_{II}$); развитие СЦТ на базе одноблочной АСТ без замены имеющихся устаревших котельных (1 блок $АСТ_I$) и с заменой (1 блок $АСТ_{II}$); аналогично для двухблочной АСТ. Результаты расчетов приведены в табл. 8.4. Расчеты показали, что для конечной нагрузки 1400 МВт замена устаревших котельных с первого года развития СЦТ экономически оправданна для вариантов СЦТ с РК и одноблочной АСТ. В оптимальном варианте (двухблочная АСТ) устаревшее оборудование выгоднее использовать в пиковом режиме до ввода первого блока АСТ на третьем году развития системы, после чего исчезает потребиость в котельных мощностью 440 МВт, соответственно старые котельные могут быть демонтированы. Для нагрузки 2100 МВт полная замена устаревшего оборудования выгодна для вариантов развития СЦТ с РК и одноблочной АСТ. Для варианта с двухблочной АСТ оптимизационные расчеты показали целесообразность замеиы устаревших котельных мощностью 290 МВт, хотя отказ от замены и перевод котельных в пиковый режим лишь незначительно увеличивают приведенные затраты (0,2%).

В целом расчеты покаэывают, что учет неоднозначности технико-экономических показателей существующих ИТ значительно расширяет множество возможных стратегий развития и влияет на их относительную экономичность. В то же время результаты расчетов показали увеличение эффективности СЦТ с АСТ. Например, при нагрузке 1400 МВт относительная экономичность варианта с двухблочной АСТ по сравнению с РК увеличивается с 19 (см. табл. 8.3) до 36% (см. табл. 8.4), а при расчетной нагрузке 2100 МВт – с 32 до 48%. Экономия органического топлива также несколько увеличивается.

Таблица 8.4. **Влияние замены устаревшего оборудования при различных стратегиях развития СЦТ на приведенные затраты и расход органического топлива (на примере 50%-ной подготовленной нагрузки)**

Расчетная нагрузка СЦТ, МВт	Стратегии развития ИТ в СЦТ	Перерасход приведенных затрат в СЦТ, %	Расход органического топлива за период развития СЦТ, млн т у.т.	Оптимальный год замены устаревшего оборудования
1400	$РК_I$	36	8,38	–
	$РК_{II}$	32	8,10	1
	1 бл. $АСТ_I$	4	3,72	–
	1 бл. $АСТ_{II}$	2,5	3,58	1
	2 бл. $АСТ_I$	0	1,41	3 – демонтаж
	2 бл. $АСТ_{II}$	0,9	1,35	1
2100	$РК_I$	48	12,54	–
	$РК_{II}$	45	12,11	1
	1 бл. $АСТ_I$	18	7,31	–
	1 бл. $АСТ_{II}$	15	7,11	1
	2 бл. $АСТ_I$	0,2	3,34	–
	2 бл. $АСТ_{II}$	0	3,25	290 из 420 МВт

8.3. Динамика развития тепловых сетей в СЦТ

Практически при всех подходах к моделированию долговременного развития СЦТ наибольшие математические затруднения возникают при выборе оптимального распределения потоков теплоносителя в СЦТ. Основными трудностями при решении этой задачи являются: нелинейность физической связи между расходом теплоносителя и напором на границах участка теплопровода; существенное увеличение объема перерабатываемой информации по сравнению с оптимизацией структуры ИТ, так как совокупность ИТ в СЦТ и суммарная тепловая нагрузка СЦТ детализируются по районам теплопотребления; возможность изменения конфигурации ТС в процессе развития СЦТ за счет неравномерности роста тепловых нагрузок и мощности ИТ в тепловых районах.

Критерием оптимального распределения потоков теплоносителя в ТС служит минимум приведенных затрат по всей СЦТ в целом, который тесно связывает развитие ИТ в отдельных тепловых районах с изменением конфигурации и параметров ТС. С другой стороны, для выбора конфигурации ТС и диаметров ее отдельных участков неважно, какими ИТ создаются потоки теплоносителя; важны только объемы и темпмература транспортируемого теплоносителя, что позволяет, как отмечалось выше, декомпозировать общую задачу развития СЦТ на задачи развития ИТ в СЦТ и задачу развития ТС.

Основными целями моделирования долговременного развития ТС являются выбор последовательности конфигураций ТС по этапам планового периода развития СЦТ и количественная оценка сетевой составляющей приведенных затрат на развитие СЦТ, которая значительно сильнее зависит от изменения конфигурации сети, чем от изменения других ее параметров (пропускных способностей отдельных участков, определяемых соответствующим диаметром и напором; расположения, числа и параметров насосных станций и т.д.).

Как и при статическом подходе к моделированию СЦТ (см. гл. 4), возможны два метода выбора конфигурации ТС: традиционный, сводящийся к перебору и сравнению вариантов развития ТС, полностью намеченных проектировщиком, и оптимизационный, сводящий проблему выбора конфигурации к некоторой экстремальной задаче на схеме ТС. Математическая формулировка такой задачи определяется энергетической постановкой и учитывает необходимый уровень детализации модели, качество и полноту исходной информации, возможные математические трудности поиска решения (алгоритмическая сложность, высокая размерность и т.д.).

С энергетической точки зрения динамическая задача оптимизации конфигурации ТС формулируется следующим образом.

Заданы: число тепловых районов города и их размещение; тепловые нагрузки районов и необходимые выработки теплоты в начальный момент и по этапам (интервалам) планируемого периода развития СЦТ; число, типы и мощности действующих ИТ (для мелких котельных агрегированно по району) и их годовые выработки теплоты; типы, число и мощности блоков новых основных и пиковых ИТ и их возможные места расположения с учетом ограничений по условиям водоснабжения, экологии и т.д.; технико-экономические характеристики существующих ТС и воз-

можные направления и условия прокладки вновь намечаемых участков ТС.

Требуется для каждого типа основного ИТ определить соответствующую последовательность конфигураций ТС по плановым интервалам, включающую: число, тепловые мощности и размещение основных и пиковых ИТ; направления и характеристики участков ТС от основного ИТ до тепловых районов.

Прежде чем переходить к математической формализации этой задачи, проанализируем специфику моделирования структуры СЦТ с учетом фактора динамики. Известно, что учет долговременной динамики ТС оказывает на экономический функционал такое же влияние, как и наличие существующей части сети [36], и приводит к существенной неаддитивности экономического функционала. Это может вызвать появление замкнутых циклов в оптимальных конфигурациях, невозможных при оптимизации СЦТ в статике. Здесь под аддитивностью экономического функционала понимают возможность представить его в виде суммы не зависящих друг от друга слагаемых, равных приведенным затратам на соответствующем интервале планирования. В динамике приведенные затраты на одном интервале времени зависят от совокупности всех предшествующих и последующих затрат, так как возможно изменение потокораспределения теплоносителя в процессе развития СЦТ. В вычислительном отношении неаддитивность целевого функционала является серьезным препятствием для применения методов динамического программирования.

Если учесть, что уже статические модели совместной оптимизации производительностей ИТ и конфигурации ТС относятся к классу многоэкстремальных задач нелинейного программирования (а при учете дискретности допустимых диаметров и других технических ограничений – к еще более сложному классу задач) высокой размерности [11], то становится очевидным, что в отсутствие быстрых алгоритмов динамического программирования формальное применение оптимизационного подхода к задаче динамики сети (т.е. основанное на нелинейных моделях ТС) сталкивается с непреодолимыми вычислительными трудностями.

В математическом отношении статические модели сводятся к минимизации вогнутой функции, определенной на выпуклом многогранном множестве допустимых потоков, удовлетворяющих материальным балансам сети. Точками минимума вогнутой функции являются некоторые граничные точки этого многогранника (его вершины). Так как линейные функции также достигают экстремума в вершинах многогранника допустимых потоков, появляется возможность использовать соответствующую линейную модель для поиска оптимального потокораспределения.

Применение линейных моделей для задач перспективного планирования распределения потоков в сетях с нелинейным законом течения (газопроводов) описано в работах [23, 64]. В них указывается, что для целей перспективного планирования вполне достаточно указать значение средних производительностей отдельных участков сети, а уточнение результатов этих расчетов с помощью более точных моделей необходимо лишь для контроля реализуемости таких планов. Ввиду возрастающей неопределенности условий функционирования системы при планировании на доста-

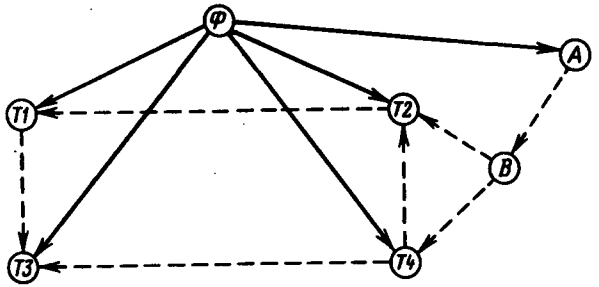


Рис. 8.4. Математическая модель СЦТ

Т1, . . . , Т4 – тепловые районы, Ф – фиктивный общий ИТ.

А – возможное место строительства нового ИТ, *В* – точка ветвления транзитной ТС; пунктирные линии – существующие и возможные участки ТС; сплошные линии – специальные дуги

точно отдаленные сроки такое упрощение математического описания вполне естественно.

Нами аналогичный подход применен для решения динамической задачи применительно к ТС. При этом удобно воспользоваться понятием пропускной способности сети как общей характеристики ее производственной мощности, пренебрегая зависимостью ее от напора на границах отдельных участков. Тогда задачей перспективного проектирования развития ТС становится выбор потокораспределения и приращений пропускных способностей участков ТС.

Как и в методе избыточной схемы (см. разд. 4.3), математической моделью СЦТ является ориентированный граф (схема теплоснабжения), содержащий вершины, соответствующие потребителям теплоты (тепловым районам), имеющимся к началу развития системы ИТ, возможным местам строительства новых ИТ и точкам ветвления трубопроводов (имеющихся и возможных), а также специальную, фиктивную вершину – общий ИТ (рис. 8.4). Эти вершины соединены совокупностью дуг (ребер) графа, состоящей из двух множеств (L_1, L_2): существующих и возможных участков ТС (с указанием соответствующих длин, условий прокладки, начальных пропускных способностей и т.д.) – L_1 и специальных дуг – L_2, соединяющих общий ИТ со всеми имеющимися ИТ и возможными ИТ в СЦТ. Каждая из дуг l этого графа характеризуется двумя числами в данный момент времени τ: пропускной способностью (мощностью) дуги (Q_l^τ) и потоком в ней (W_l^τ), который отождествляется с передаваемым (выработанным) количеством теплоты.

Для дуг, принадлежащих первому множеству (L_1), эти величины соответствуют действительным пропускным способностям участков ТС и потокам теплоносителя. Для специальных дуг они характеризуют мощность соответствующего ИТ в году τ и его годовую выработку теплоты. По известным технико-экономическим параметрам ИТ и участков ТС можно обычными методами определить удельные капитальные вложения, идущие на увеличение мощности соответствующего ИТ или пропускной способности участка ТС (k_l^τ) и удельные эксплуатационные издержки (c_l^τ). Тогда математическая задача оптимизации развития СЦТ, отражающая содержательную энергетическую постановку динамической задачи выбора оптимальной конфигурации ТС, может быть сформулирована следующим образом.

Заданы: число интервалов планирования развития СЦТ (J); числа вершин (I) и дуг (L) ориентированного графа, отражающего схему телоснабжения, матрица инциденций этого графа (А); начальные пропускные способности всех участков схемы (Q_l^0) (т.е. как участков ТС для l из L_1, так и начальные мощности ИТ для l из L_2) и потоки в ней (W_l^0); удельные капитальные вложения и эксплуатационные издержки ($к_l$, c_l), соответствующие l-му участку схемы; планируемые приросты тепловых нагрузок в вершинах схемы (i) по интервалам планирования $\{\Delta Q_{i\text{п}}^j\}$ и необходимые количества теплоты $\{W_{i\text{п}}^j\}$; годовые числа часов использования каждой дуги схемы (h_l); возможные ограничения на пропускные способности дуг ($Q_l^{\max}$).

Требуется определить приросты пропускных способностей (ΔQ_l^j) по интервалам прогнозного периода и потоки в участках сети (W_l^j), минимизирующие приведенные затраты на развитие и функционирование СЦТ. Математически эта задача может быть записана так:

найти минимум

$$З = \sum_{j=1}^{J} \omega_j (E_н K_j + И_j) \tag{8.8}$$

при ограничениях

$$A W^j = W_{\text{п}}^j, \quad j = \overline{1, J}; \tag{8.9}$$

$$\sum_{l \in L_i} \Delta Q_l^j \geqslant \Delta Q_{i\text{п}}^j, \quad i = \overline{1, I}; \tag{8.10}$$

$$0 \leqslant W_l^j \leqslant h_l Q_l^j, \quad l \in L_2; \tag{8.11}$$

$$-h_l Q_l^j \leqslant W_l^j \leqslant h_l Q_l^j, \quad l \in L_1; \tag{8.12}$$

$$0 \leqslant Q_l^0 + \sum_{j=1}^{J} \Delta Q_l^j \leqslant Q_l^{\max}; \tag{8.13}$$

$$\Delta Q_l^j \geqslant 0; \tag{8.14}$$

$$Q_l^j = Q_l^0 + \sum_{j=1}^{J} \Delta Q_l^j; \tag{8.15}$$

$$K_j = \sum_{l=1}^{L} к_l \Delta Q_l^j, \quad И_j = \sum_{l=1}^{L} c_l \Delta W_l^j; \tag{8.16}$$

$$\omega_j = (1 + E_н)^{J-j} \frac{(1 + E_н)^{\Delta t_j} - 1}{E_н (1 + E_н)^{\Delta t_j - 1} \cdot \Delta t_j}. \tag{8.17}$$

Здесь З – приведенные затраты в СЦТ с учетом динамики (8.8), (8.16), (8.17) и разбиения периода развития системы длительностью T на J интервалов планирования длительностью Δt_j в предположении равномерного ввода мощностей по годам интервала Δt_j [39]; L_i – множество дуг графа, инцидентных i-й вершине. Ограничение (8.9) выражает баланс выработки теплоты в каждой вершине схемы, ограничения (8.10) – баланс роста мощности; ограничения на выработку теплоты (8.11) записаны для дуг,

исходящих из общего ИТ, при условии, что поток в этих дугах всегда совпадает с ориентацией дуг. Для остальных дуг (8.12) учитывается возможное изменение направления потока (т.е. поток, текущий против направления, первоначально выбранного на графе, принимается отрицательным). Остальные ограничения учитывают допустимую суммарную пропускную способность (8.13), положительность приростов пропускных способностей (8.14); определяют суммарную пропускную способность ребра (Q^j_l) на j-м интервале через приросты пропускных способностей в предыдущие моменты времени (8.15).

Математическая модель развития ТС (8.8)–(8.17) фактически позволяет оптимизировать (в рамках линейного приближения) схему теплоснабжения в целом. Учитывая, что линейная модель существенно упрощает реальные взаимосвязи элементов СЦТ, целесообразно использовать ее только для выбора оптимальной последовательности конфигураций ТС для соответствующего основного ИТ. Для этого из решения задачи (8.8)–(8.17) выбираются оптимальные значения переменных, определяющие потоки теплоносителя и последовательность конфигураций ТС. Далее согласно общей схеме решения задачи оптимизации СЦТ (см. гл. 4) решается задача оптимизации структуры ИТ в СЦТ при заданной конфигурации ТС. Если по совокупности общих оптимизируемых переменных моделей (8.1)–(8.7) и (8.8)–(8.17) полученные решения совпадают, т.е. совпадают мощность основного ИТ, момент его ввода, совокупная мощность пиковых ИТ и их выработка по интервалам планового периода, то получено оптимальное решение для данного типа основного ИТ. В противном случае корректируется исходная информация линейной модели по показателям ИТ и снова решается задача выбора конфигурации ТС. Детализация информации по ТС (число ниток трубопроводов, количество насосных и т.д.) для каждого интервала планирования проводится в рамках вариантного подхода (см. разд. 4.3).

В вычислительном отношении задача (8.8)–(8.17) достаточно проста и решается стандартными программами, входящими в математическое обеспечение ЕС ЭВМ, так как практически необходимая размерность задачи после декомпозиции по типам основного ИТ не превышает допустимых пределов при общей длительности периода развития СЦТ 15–20 лет и пятилетних плановых интервалах планирования.

Глава девятая

НАДЕЖНОСТЬ СЦТ И ИТ

9.1. Постановка задачи

К числу основных свойств больших и сложных систем энергетики принадлежит надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от

назначения объекта и условий его применения состоит из сочетаний свойств: безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости [65]. Как видно, понятие надежности формируется преимущественно применительно к функционированию систем.

Надежность развития систем энергетики — понятие более сложное, чем надежность функционирования таких систем. Если применительно к функционированию (эксплуатации) условия надежности находятся для заданной (или почти заданной) структуры системы, то надежность развития должна обеспечиваться при некоторой возможной совокупности ее структур, компоненты которой соответствуют отдельным периодам многолетнего развития системы. Видимо, в общем случае под надежностью развития можно понимать способность системы иметь такую структуру, которая при заданных ограничениях может в пределах влияния ряда негативных возмущений (изменяющихся условий) обеспечить требуемую надежность развития и функционирования системы с необходимой вероятностью. Свойство надежности развития систем тесно взаимосвязано с такими системными понятиями, как гибкость структуры и затраты на адаптацию [9].

Надежность СЦТ во многом определяется надежностью ее структуры, а также надежностью составляющих ее элементов — ТС и ИТ. Под структурой системы понимается состав ее элементов, их взаимосвязи, соотношение мощностей ИТ и пропускных способностей ТС в цепи производства, передачи и распределения теплоты. На этапе проектирования надежность СЦТ наиболее эффективно может быть повышена путем повышения надежности структуры СЦТ и создания резервов в ТС и ИТ. Поэтому в данной главе рассматриваются только эти два направления повышения надежности СЦТ.

Вопросы исследования и обеспечения оптимального уровня надежности СЦТ приобретают особо важное значение в связи с наметившимися тенденциями развития теплоснабжения в стране: расширением масштабов централизованного теплоснабжения, увеличением единичной мощности ИТ, применением атомных ИТ, увеличением протяженности транзитных и магистральных ТС и т.д. Нарушения работоспособности СЦТ из-за отказов ее элементов приводят к недоотпуску теплоты промышленным и коммунально-бытовым потребителям. В конечном итоге это обусловливает появление ущерба для народного хозяйства и ухудшение комфортных условий труда и быта населения. Очевидно, что указанные тенденции развития теплоснабжения могут существенно усугубить негативные последствия из-за ненадежности СЦТ. Однако повышение надежности СЦТ связано с дополнительными затратами. Из этого следует важность и необходимость экономического обоснования уровня надежности СЦТ.

Существенным шагом в создании предпосылок для определения показателей надежности СЦТ и ИТ на стадии их проектирования явилось включение в ГОСТы на основные агрегаты ИТ (паровые турбины, ядерные реакторы и некоторые типы котлоагрегатов) количественных показателей надежности (наработки на отказ, коэффициента готовности и др.) [66–68].

Однако методы расчета и оптимизации надежности при разработке и проектировании СЦТ и ее элементов ТС и ИТ еще не нашли должного применения. Основные нормативные документы "Строительные нормы и правила" в части проектирования тепловых сетей и котельных установок

и "Нормы технологического проектирования тепловых электростанций" не предусматривают определения показателей надежности проектируемых СЦТ, ТС и ИТ. В них на основе исторически сложившихся принципов и правил, но без технико-экономического обоснования даны, как правило, однозначные рекомендации по выбору величины резерва для основного и вспомогательного оборудования, а также по резервированию схемы ТС [34, 35, 58]. В настоящее время показатели надежности СЦТ, ее элементов (ТС и ИТ) определяются только на стадии их эксплуатации. Между тем основные решения, определяющие уровни надежности СЦТ, ТС и ИТ, принимаются на стадиях разработки и проектирования СЦТ, ТС и ИТ.

Успешное решение проблемы надежности СЦТ требует системного подхода к исследованиям надежности. Эти исследования в соответствии с принятой авторами иерархией систем (см. гл. 2, 4 и 6) целесообразно проводить на всех иерархических уровнях с последующим согласованием решений, полученных на разных уровнях. Например, оптимальный уровень надежности ИТ определяется соотношением затрат на повышение надежности собственно ИТ и затрат на увеличение резервной мощности в СЦТ и на другие мероприятия, обеспечивающие рост надежности системы теплоснабжения.

Надежность энергетического объекта любого типа (в том числе СЦТ) определяется: а) структурой объекта; б) резервами всех видов; в) надежностью элементов объекта; г) совершенством эксплуатации объекта. Следует подчеркнуть, что ни один из указанных факторов не в состоянии в отдельности обеспечить экономически обоснованный уровень надежности объекта. Поэтому необходимо комплексное рассмотрение проблемы обеспечения надежности объекта с привлечением всех возможных способов; важен выбор рационального вклада каждого способа в решение проблемы [20]. Для управления надежностью СЦТ на этапе проектирования решающее значение имеют три первых фактора.

На этапе проектирования повышение надежности энергетического объекта возможно за счет: разделения номинальной производительности агрегатов и элементов между агрегатами и элементами меньшей производительности и их нагрузочного резервирования; полного или частичного структурного резервирования агрегатов, вспомогательных систем и элементов; создания временных запасов рабочих тел и теплоносителей; функционального резервирования агрегатов или элементов объекта обводными линиями и др.

Главное в системном подходе к надежности энергетических объектов — следующее: все элементы и части объекта должны быть равнонадежными; имеет смысл затрачивать средства для повышения надежности указанными выше способами лишь для менее надежных элементов и частей объекта.

По способности энергетического объекта выполнять заданные функции в заданном объеме с точки зрения надежности возможно несколько технических его состояний (рис. 9.1). Переход объекта из одного состояния в другое происходит обычно вследствие отказов и восстановлений элементов. К полному отказу работоспособности объекта приводит отказ работоспособности нерезервируемого элемента, участвующего в осуществлении основного технологического процесса, а также отказ работоспособности всех элементов, имеющих одинаковое функциональное назначение. Отказ

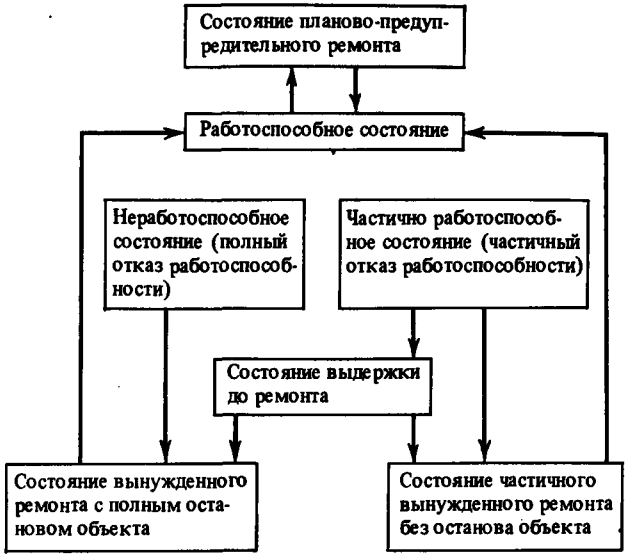


Рис. 9.1. Основные возможные состояния объекта

работоспособности резервируемого элемента приводит лишь к частичному отказу работоспособности объекта. Восстановление отказавшего элемента при частичном отказе работоспособности объекта в зависимости от места его расположения в технологической схеме может производиться либо с сохранением объекта в частично рабочем состоянии, либо с переводом его в нерабочее состояние. Последний случай предполагает, что объект может работать с неполной нагрузкой, но для выполнения ремонта необходим его перевод в нерабочее состояние. Часто бывает целесообразна задержка вывода объекта в ремонт до периода снижения нагрузки у потребителя.

Отрицательные последствия частичного отказа работоспособности энергетического объекта определяются не только величиной снижения мощности объекта ΔQ из-за отказа работоспособности какого-либо элемента, но и уровнем запланированной нагрузки объекта в период устранения отказа работоспособности. Поясним это на примере. На рис. 9.2 приведен график требуемой мощности $Q(t)$ объекта. В момент времени t_1 возникает отказ оборудования, устранение которого длится в течение времени $T_{\text{в}}$. В результате этого отказа объект может развивать мощность не выше уровня $Q_{\text{в}}$. Очевидно, что в течение времени τ_2, когда требуемая мощность $Q_{\text{т}}(t)$ меньше уровня $Q_{\text{в}}$, объект полностью обеспечивает заданный график нагрузки и недовыработка отсутствует.

Методы общей теории надежности технических систем, используемые для построения математических моделей надежности СЦТ и ее элементов ИТ и ТС, должны учитывать все отмеченные особенности их проектирования и функционирования. Кроме того, выбор того или другого метода должен определяться точностью исходной информации, желаемой точностью получаемых решений, возможностью реализации метода на ЭВМ, возможностью построения экономических характеристик, отражающих

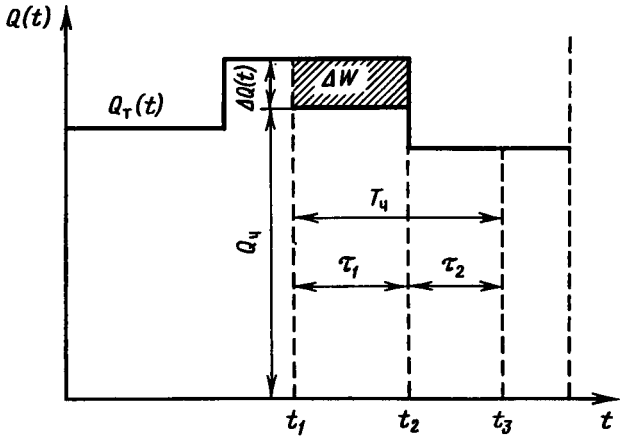


Рис. 9.2. Пример частичного отказа работоспособности объекта

зависимости типа "затраты – повышение надежности", а также возможностью нормирования показателей надежности.

Для построения математических моделей надежности технических систем используются, как правило, аналитические методы и значительно реже – метод статистического моделирования. Укажем некоторые из аналитических методов, играющих важную роль в теории надежности.

Из группы аналитических методов достаточно широко используются методы, базирующиеся на аппарате марковских процессов [69–72]. Наиболее эффективно использование этих методов применительно к системам, у которых законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления экспоненциальны. В этих случаях возможно достаточно просто получать характеристики надежности систем.

Широкое распространение получил также метод минимальных путей и минимальных сечений [70, 73]. Этот метод оказывается достаточно эффективным для оценки надежности систем со сложной структурой (каковой является СЦТ).

Надежность СЦТ и ее элементов может характеризоваться различными показателями [20, 70, 74]. Выбираемые показатели надежности СЦТ, ИТ и ТС должны учитывать следующее: СЦТ, ИТ и ТС являются сложными восстанавливаемыми объектами с длительными периодами эксплуатации; эффективность функционирования СЦТ, ИТ и ТС пропорциональна времени пребывания этих объектов в работоспособных состояниях; СЦТ, ИТ и ТС работают в режимах, определяемых потребителями теплоты. В соответствии с этим и в зависимости от иерархического уровня, на котором решается проблема надежности СЦТ, ИТ и ТС, используются следующие показатели надежности: комплексные – коэффициент обеспеченности продукцией, коэффициент готовности, коэффициент эффективного использования; единичные – вероятность безотказной работы, интенсивность и параметр потока отказов, среднее время восстановления; специальные – вероятность реализации объектом уровня располагаемой мощности и т.д.

В настоящее время можно выделить два подхода к оптимизации надеж-

ности технических систем. Первый подход связан с определением экономически обоснованного уровня надежности системы по критерию минимума приведенных затрат. При этом исследуемая система рассматривается как элемент систем более высокого иерархического уровня и соответственно при формировании критерия экономической эффективности системы учитываются затраты не только собственно по исследуемой системе, но и изменения затрат по системам верхнего иерархического уровня. Это наиболее правильный подход, так как задача выбора уровня надежности технической системы в конечном счете задача технико-экономическая. Однако в ряде случаев встречаются трудности по учету эффектов и оценке затрат в вышестоящих иерархических системах.

Второй подход связан с определением оптимальных способов обеспечения надежности системы по критерию удовлетворения заданному (нормативному) уровню надежности. Такой подход используется при оптимизации надежности ответственных систем (например, для аварийных систем АЭС), а также отдельных подсистем при заданных для этих подсистем технических ограничениях. Этот подход целесообразен также в том случае, когда система рассматривается как элемент более общей системы (например, ИТ – элемент СЦТ), применительно к которой определяется (нормируется) целесообразный уровень надежности исследуемой системы. Тогда для исследуемой системы определяются оптимальные средства для достижения заданного уровня надежности.

Конкретизации изложенных общих методических подходов к оптимизации надежности СЦТ и ее подсистем посвящен последующий материал данной главы.

9.2. Методика исследования надежности СЦТ

Задачи оптимизации развития и функционирования СЦТ с ИТ на органическом и ядерном топливе решаются в настоящее время без должного учета требований к надежности теплоснабжения.

В существующей практике перспективного проектирования рассматриваются лишь укрупненные условия резервирования оборудования ИТ и ТС. Применительно к генерирующей части СЦТ состав оборудования выбирается из заданных норм обеспечения потребителей тепловой энергией при выходе из строя одного самого крупного единичного агрегата ИТ [35, 58]. В аварийном режиме работы сетевой части СЦТ допускается снижение подачи тепловой энергии, нормы которого определены в [34] в зависимости от климатических условий и диаметра трубопровода. Для потребителей, не допускающих перерывов в теплоснабжении, резервирование ТС должно обеспечивать стопроцентную подачу теплоты в аварийном режиме.

Описанный укрупненный учет фактора надежности без специального расчета соответствующих показателей может приводить как к созданию недостаточно надежных систем, так и к неоправданно завышенным показателям надежности, влекущим за собой перерасход средств на создание СЦТ, что в равной мере недопустимо.

В исследуемых СЦТ, включающих в свой состав различные ИТ, ТС и абонентские установки потребителей теплоты, можно выделить ряд иерархических уровней. К верхнему уровню системы мы относим основные и пи-

ковые ИТ и соединяющие их транзитные ТС. Укрупненными потребителями тепловой энергии этого уровня являются районы теплопотребления, в пределах которых располагаются пиковые ИТ. Другие иерархические уровни СЦТ включают кольцевые магистральные ТС от пиковых ИТ, радиальные ответвления от ТС к группе потребителей, отдельные ИТ.

Бóльшая часть имеющихся работ по надежности теплоснабжения касается различных аспектов исследования надежности нижних иерархических уровней СЦТ. Опубликованные методики ориентированы отдельно на ИТ [75–77] и ТС [78–80], причем методика [78] ориентирована на оценку показателей надежности теплоснабжения отдельных или укрупненных потребителей для расчетного (100%) и пониженного (φ %) режимов работы. Методика [79] предполагает оценку надежности всей системы и отдельных наиболее ответственных потребителей и исходит из принципиальной недопустимости отказов, что в конечном счете ужесточает требования к системе теплоснабжения. Обе эти методики применимы как к радиальным, так и к кольцевым схемам ТС. Методика [80] применима к выбору параметров нерезервируемой части сети по коэффициентам готовности подачи теплоты за расчетный период.

Излагаемая методика посвящена определению надежности теплоснабжения верхнего иерархического уровня СЦТ и является частью разработанной в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского комплексной методики оптимизации СЦТ с ИТ на органическом и ядерном топливе, изложенной в гл. 4.

В качестве объекта исследования рассматривается СЦТ города или промышленного центра, генерирующая часть которой представлена основным и пиковым ИТ, а сетевая – транзитными ТС. Основной ИТ (ТЭЦ, районная котельная на угле, АСТ, АТЭЦ) покрывает базовую часть тепловой нагрузки СЦТ. Пиковая тепловая нагрузка покрывается от ИТ на органическом топливе (газе, мазуте). Транзитные ТС связывают основной ИТ, расположенный за пределами города, с пиковыми ИТ, находящимися в центрах районов теплопотребления. Оценка надежности такого объекта производится по показателям надежности выдачи теплоты после пиковых ИТ.

Задача оптимизации верхнего иерархического уровня СЦТ с описанным выше традиционным учетом надежности [34–35] заключается в определении множества альтернативных вариантов структуры системы, отличающихся составом генерирующего оборудования основного и пиковых ИТ, а также конфигурацией и диаметрами трубопроводов транзитных ТС, с последующим выбором оптимального варианта структуры СЦТ, соответствующего минимуму суммарных приведенных затрат в систему [81].

При оптимизации СЦТ с учетом фактора надежности теплоснабжения альтернативные варианты СЦТ должны уравниваться по надежности, что может быть достигнуто путем структурного резервирования генерирующей и сетевой частей рассматриваемой СЦТ. При этом структурное резервирование генерирующей части СЦТ может быть достигнуто установкой резервных блоков на основном ИТ и на пиково-резервных котельных (ПРК). Структурное резервирование сетевой части СЦТ связано с использованием секционирования и прокладки нескольких параллельных магистралей транзитной ТС.

С учетом изложенного надежность альтернативных вариантов СЦТ должна удовлетворять условию

$$H(s, H_{\text{осн}}, H^{\text{р}}_{\text{осн}}, H_{\text{пк}}, H^{\text{р}}_{\text{пк}}, H_{\text{тс}}) \geqslant H^{*}, \qquad (9.1)$$

где H – надежность выдачи тепловой энергии после ПРК; $H_{\text{осн}}$, $H^{\text{р}}_{\text{осн}}$ – надежность функционирования структурных элементов основного ИТ, включая их резервные блоки; $H_{\text{пк}}$, $H^{\text{р}}_{\text{пк}}$ – надежность функционирования пиковых и резервных структурных элементов ПРК; $H_{\text{тс}}$ – надежность функционирования структурных элементов транзитной ТС; s – параметр структуры системы; H^{*} – заданный уровень надежности выдачи тепловой энергии из пиковых ИТ, по которому осуществляется уравнивание вариантов СЦТ по надежности теплоснабжения. Знак неравенства в (9.1) связан с дискретностью типоразмеров ИТ и диаметров ТС.

В качестве структурных элементов СЦТ рассматривались единичные блоки основного ИТ и ПРК и линейные участки транзитных ТС. Каждый структурный элемент СЦТ с точки зрения функционирования может находиться в одном из двух состояний – полной работоспособности или полного отказа. В качестве основных показателей надежности функционирования структурных элементов ИТ и ТС принимались вероятности их нахождения в работоспособном и отказовом состояниях, определяемые исходя из значений параметров потоков отказов и восстановлений соответствующих элементов в предположении экспоненциального характера законов распределения времени их наработки и времени восстановления [70].

Предполагалось, что каждый основной и пиково-резервный ИТ состоит из структурных элементов одинаковой тепловой мощности и одинаковой аварийности. Соединение структурных элементов в пределах каждого ИТ параллельное, а в пределах транзитной ТС последовательно-параллельное с точки зрения надежности функционирования. Укрупненная структурная схема СЦТ, состоящей из двух районов теплопотребления, приведена на рис. 9.3.

Каждый ИТ в целом может находиться в состояниях полной работоспособности, а также частичного или полного отказа в зависимости от состояний, в которых пребывают составляющие его структурные элементы. В состоянии полной работоспособности ИТ работает с заданной тепловой мощностью. При частичном отказе ИТ продолжает функционировать с пониженной тепловой мощностью. Полный отказ ИТ связан с его остановом. Таким образом, тепловая мощность ИТ представляет собой дискретную случайную величину, определяемую своим рядом распределения. Значения случайной величины тепловой мощности ИТ в нормальном и аварийном режимах работы определяются числом и единичной мощностью находящихся в работоспособном состоянии структурных элементов ИТ. Вероятности значений тепловой мощности ИТ находятся по формуле Бернулли [82] в предположении независимости отказов структурных элементов, входящих в состав данного ИТ.

Далее методика излагается применительно к СЦТ, в которой основным ИТ является АСТ. В качестве структурного элемента может рассматриваться единичная циркуляционная петля теплотехнической части АСТ, представляющая собой ремонтируемый элемент, который может находиться

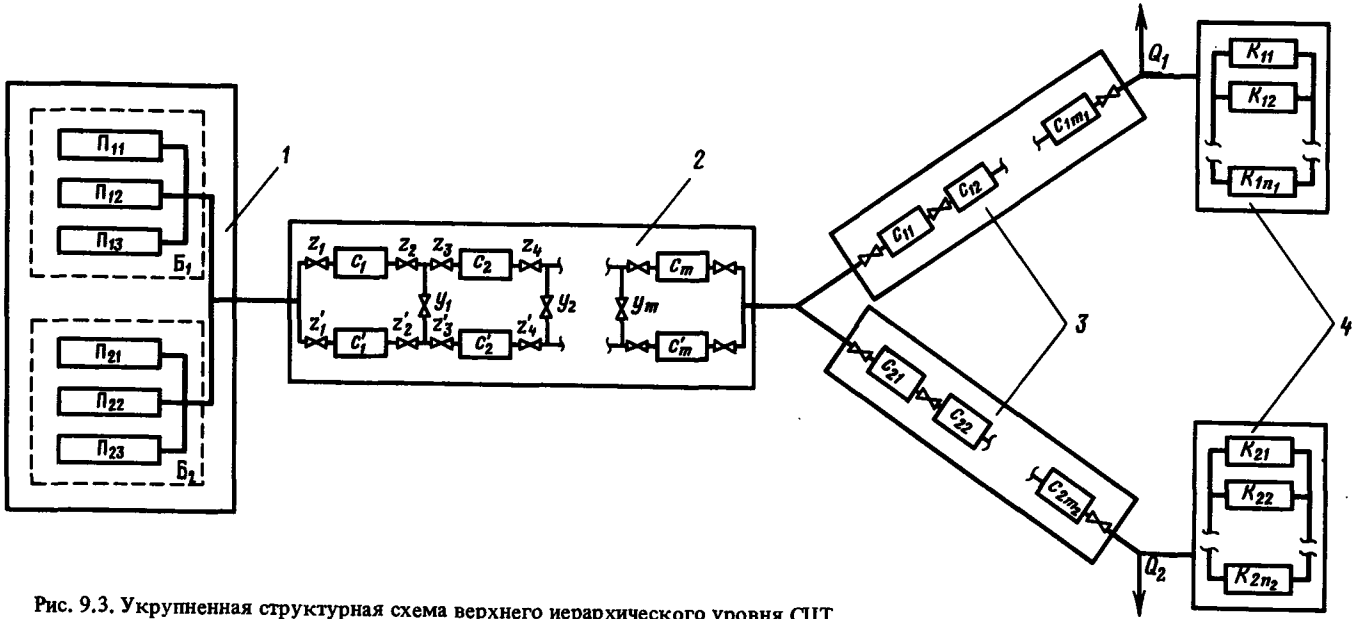


Рис. 9.3. Укрупненная структурная схема верхнего иерархического уровня СЦТ

1 — основной ИТ; *2* и *3* — головная и разветвленная части транзитной ТС; *4* — пиково-резервный ИТ; $Б_1$, $Б_2$ — единичные блоки основного ИТ; $П_{11}, П_{12}, \ldots, П_{2s}$ — структурные элементы основного ИТ; $C_1, C_2, \ldots, C_m, C'_1, C'_2, \ldots, C'_m$ — структурные элементы головной части транзитной ТС; $z_1, z_2, \ldots, z'_1, z'_2, \ldots$ — секционирующие задвижки; $y_1, y_2, \ldots$ — блокирующие перемычки; $C_{11}, C_{12}, \ldots, C_{1m_1}, C_{21}, C_{22}, \ldots, C_{2m_2}$ — структурные элементы ответвлений транзитной ТС; $K_{11}, K_{12}, \ldots, K_{1n_1}, K_{21}, K_{22}, \ldots, K_{2n_2}$ — структурные элементы пиково-резервных ИТ; Q_1, Q_2 — расчетные тепловые нагрузки районов теплопотребления

в состоянии полной работоспособности или полного отказа. Если в качестве основного ИТ в СЦТ используется двухблочная АСТ с трехпетлевой схемой блока, то отказ одной петли переводит блок АСТ в состояние частичного отказа; одновременный отказ двух и более циркуляционных петель приводит к полному отказу блока. С учетом этого ряд распределения дискретной случайной величины тепловой мощности основного ИТ $f(Q_{\text{осн}})$ может быть определен следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_{\text{осн}_1} &= 2Q_1, & Q_{\text{осн}_4} &= Q_1, \\ Q_{\text{осн}_2} &= (1+x)Q_1, & Q_{\text{осн}_5} &= xQ_1, \\ Q_{\text{осн}_3} &= 2xQ_1, & Q_{\text{осн}_6} &= 0; \end{aligned} \tag{9.2}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{осн}_1} &= P\{Q_{\text{осн}} = Q_{\text{осн}_1}\} = P_1^2, \\ P_{\text{осн}_2} &= P\{Q_{\text{осн}} = Q_{\text{осн}_2}\} = 2P_1P_2, \\ P_{\text{осн}_3} &= P\{Q_{\text{осн}} = Q_{\text{осн}_3}\} = P_2^2, \\ P_{\text{осн}_4} &= P\{Q_{\text{осн}} = Q_{\text{осн}_4}\} = 2P_2P_3, \\ P_{\text{осн}_5} &= P\{Q_{\text{осн}} = Q_{\text{осн}_5}\} = 2P_1P_3, \\ P_{\text{осн}_6} &= P\{Q_{\text{осн}} = Q_{\text{осн}_6}\} = P_3^2, \end{aligned} \tag{9.3}$$

где $Q_{\text{осн}_i}$ $(i = 1 \div 6)$ – значения дискретной случайной величины тепловой мощности двухблочной АСТ; Q_1 – номинальная тепловая мощность единичного блока АСТ; x – доля номинальной тепловой мощности блока АСТ, которую он может развить в состоянии частичного отказа; $P_{\text{осн}_i}$ $(i = 1 \div 6)$ – вероятности возможных значений тепловой мощности двухблочной АСТ; P_j $(j = 1 \div 3)$ – вероятности возможных значений тепловой мощности единичного блока АСТ, определяемые как

$$\begin{aligned} P_1 &= p_{\text{осн}}^3, \\ P_2 &= 3p_{\text{осн}}^2 q_{\text{осн}}, \\ P_3 &= 3p_{\text{осн}} q_{\text{осн}}^2 + q_{\text{осн}}^3, \end{aligned} \tag{9.4}$$

где $p_{\text{осн}}$, $q_{\text{осн}}$ – вероятности нахождения структурных элементов АСТ в состояниях полной работоспособности и полного отказа ($p_{\text{осн}} + q_{\text{осн}} = 1$).

Кроме основного ИТ, к генерирующей части СЦТ относятся ПРК, расположенные в районах теплопотребления. В качестве структурного элемента ПРК принимался единичный котлоагрегат, представляющий собой ремонтируемый элемент, который может находиться в одном из двух состояний – полной работоспособности или полного отказа. Выход из строя любого единичного блока приводит к снижению тепловой мощности ПРК на величину единичной мощности отказавшего котлоагрегата. Таким образом, пиково-резервный ИТ в целом может находиться в состоянии полной работоспособности, а также состоянии частичного или полного отказа в зависимости от состояний, в которых пребывают составляющие его структурные элементы.

С учетом указанного может быть определен ряд распределения дискретной случайной величины тепловой мощности пиково-резервного ИТ

$f(Q_{\text{прк}})$:

$$Q_{\text{прк}_j} = m_{\text{прк}} Q'_{\text{прк}},$$

$$P_{\text{прк}_j} = C^{m_{\text{прк}_j}}_{m_{\text{прк}}} p^{m_{\text{прк}_j}}_{\text{прк}} q^{(m_{\text{прк}} - m_{\text{прк}_j})}_{\text{прк}} \qquad (9.5)$$

$$(j = \overline{1, m_{\text{прк}} + 1}),$$

где $Q_{\text{прк}_j}$ – значения дискретной случайной величины тепловой мощности ПРК; $Q'_{\text{прк}}$ – единичная тепловая мощность структурного элемента ПРК; $m_{\text{прк}}$ – число единичных блоков, составляющих ПРК; $m_{\text{прк}_j}$ – число единичных блоков ПРК, находящихся в работоспособном состоянии; $P_{\text{прк}_j}$ – вероятности возможных значений тепловой мощности ПРК; $p_{\text{прк}}, q_{\text{прк}}$ – вероятности нахождения структурных элементов ПРК в состояниях полной работоспособности и полного отказа ($p_{\text{прк}} + q_{\text{прк}} = 1$); $C^{m_{\text{прк}_j}}_{m_{\text{прк}}}$ – число сочетаний из $m_{\text{прк}}$ по $m_{\text{прк}_j}$, определяемое как

$$C^{m_{\text{прк}_j}}_{m_{\text{прк}}} = \frac{(m_{\text{прк}})!}{(m_{\text{прк}_j})!(m_{\text{прк}} - m_{\text{прк}_j})!}. \qquad (9.6)$$

Выражения (9.2) – (9.5) представляют собой ряды распределения дискретных случайных величин тепловой мощности генерирующей части СЦТ, состоящей из двухблочной АСТ и пиково-резервных ИТ, включающих в свой состав пиковые и резервные котлоагрегаты.

Пусть сетевая часть рассматриваемой СЦТ представлена транзитной ТС из двух параллельных магистралей. В качестве сетевого структурного элемента можно принять линейную часть ТС между двумя ограничивающими ее секционирующими задвижками. В дальнейшем будем называть "участком ТС" совокупность двух структурных элементов между двумя соседними блокирующими перемычками. Соединение структурных элементов ТС в пределах каждого участка параллельное, а участков между собой в пределах рассматриваемой ТС – последовательное с точки зрения надежности функционирования (см. рис. 9.3).

Транзитная ТС в целом может находиться как в состоянии полной работоспособности, так и в состоянии частичного или полного отказа в зависимости от того, в каких состояниях находятся составляющие ее сетевые структурные элементы. При частичном отказе транзитная ТС лимитирует передачу потребителям тепловой энергии, вырабатываемой основным ИТ. Полный отказ транзитной ТС связан с прекращением теплоснабжения от основного ИТ. Таким образом, пропускная способность транзитной ТС по теплоте является дискретной случайной величиной, определяемой своим рядом распределения. Значения случайной величины пропускной способности транзитной ТС в нормальном и аварийном режимах ее работы определяются в зависимости от числа и диаметров участков ТС и степени ее резервирования. Вероятности значений пропускной способности сетевой части СЦТ определяются по формуле Бернулли [82] в предположении независимости отказов структурных элементов ТС.

Для транзитной ТС, состоящей из $m_{\text{тс}}$ участков, дискретные значения

случайной величины пропускной способности по теплоте могут быть определены в предположении постоянства создаваемого в ТС напора следующим образом:

$$Q_{\text{тс}} = c\sqrt{\Delta H / s_{\text{тс}_l}}(t_1 - t_2) \qquad (9.7)$$
$$(\overline{l = 1, m_{\text{тс}}^{Q}}),$$

где c – теплоемкость сетевой воды; ΔH – потеря напора в ТС; t_1, t_2 – температура сетевой воды в прямой и обратной линиях; $s_{\text{тс}_l}$ – сопротивление ТС, выраженное в единицах напора [8]; $m_{\text{тс}}^{Q}$ – число дискретных значений пропускной способности ТС.

Сопротивление ТС $s_{\text{тс}_l}$, являющееся дискретной случайной величиной, определяется в зависимости от состояний сетевых структурных элементов в предположении, что одновременно может быть не более двух отказов. В качестве сетевого структурного элемента принята линейная часть ТС между двумя соседними секционирующими задвижками.

Состояние полной работоспособности ТС соответствует состояниям полной работоспособности всех структурных элементов ТС; состояние частичного отказа ТС реализуется при отказе какого-либо одного структурного элемента либо двух элементов, не принадлежащих одному участку. При этом состояние частичного отказа ТС не всегда означает нарушение теплоснабжения потребителей. Состояние полного отказа ТС связано с отказом двух элементов, принадлежащих одному участку, т.е. с полным отказом какого-либо участка ТС. С учетом изложенного

$$\begin{aligned} s_{\text{тс}_1} &= m_{\text{тс}} s_{\text{эл}}/4, \\ s_{\text{тс}_2} &= s_{\text{эл}} + (m_{\text{тс}} - 1)s_{\text{эл}}/4, \\ s_{\text{тс}_3} &= 2s_{\text{эл}} + (m_{\text{тс}} - 2)s_{\text{эл}}/4, \\ s_{\text{тс}_4} &= \infty, \end{aligned} \qquad (9.8)$$

где $s_{\text{эл}}$ – сопротивление отдельного структурного элемента ТС, определяемое по [8]; $s_{\text{тс}_1}$ – сопротивление ТС в состоянии полной работоспособности; $s_{\text{тс}_2}$, $s_{\text{тс}_3}$ – сопротивления ТС в состояниях частичного отказа; $s_{\text{тс}_4}$ – сопротивление ТС в состоянии полного отказа.

Вероятности реализации состояний, характеризующиеся показателями (9.7), (9.8), определяются в предположении взаимной независимости отказов отдельных структурных элементов ТС:

$$\begin{aligned} P_{\text{тс}_1}^{(m_{\text{тс}})} &= P\{Q_{\text{тс}} = Q_{\text{тс}_1}\} = P_{\text{тс}_1}^{(m_{\text{тс}}-1)} P_{\text{тс}_1}^{(1)}, \\ P_{\text{тс}_2}^{(m_{\text{тс}})} &= P\{Q_{\text{тс}} = Q_{\text{тс}_2}\} = P_{\text{тс}_2}^{(m_{\text{тс}}-1)} P_{\text{тс}_1}^{(1)} + P_{\text{тс}_1}^{(m_{\text{тс}}-1)} P_{\text{тс}_2}^{(1)}, \\ P_{\text{тс}_3}^{(m_{\text{тс}})} &= P\{Q_{\text{тс}} = Q_{\text{тс}_3}\} = P_{\text{тс}_3}^{(m_{\text{тс}}-1)} P_{\text{тс}_1}^{(1)} + P_{\text{тс}_2}^{(m_{\text{тс}}-1)} P_{\text{тс}_2}^{(1)}, \\ P_{\text{тс}_4}^{(m_{\text{тс}})} &= P\{Q_{\text{тс}} = Q_{\text{тс}_4}\} = 1 - \sum_{l=1}^{3} P_{\text{тс}_l}^{(m_{\text{тс}})}, \end{aligned} \qquad (9.9)$$

где $P_{\text{тс}_l}^{(1)}$ $(l = 1 \div 3)$ – вероятности возможных состояний ТС, состоящей из одного участка, определяемые как

$$P_{\text{тс}_1}^{(1)} = p_{\text{тс}}^2, \quad P_{\text{тс}_2}^{(1)} = 2p_{\text{тс}}q_{\text{тс}}, \quad P_{\text{тс}_3}^{(1)} = q_{\text{тс}}^2, \qquad (9.10)$$

$p_{тс}$, $q_{тс}$ – вероятности нахождения сетевых структурных элементов в состояниях полной работоспособности и полного отказа ($p_{тс} + q_{тс} = 1$).

Верхние индексы в круглых скобках в (9.9) означают число участков рассматриваемой ТС. Выражения (9.7), (9.8) и рекуррентное соотношение (9.9) определяют собой ряд распределения дискретной случайной величины пропускной способности рассматриваемой двухмагистральной ТС.

Поскольку основной ИТ и транзитная ТС соединены последовательно с точки зрения надежности их функционирования (см. рис. 9.1), ряд распределения дискретной случайной величины тепловой энергии, поступающей в единицу времени от основного к пиковым ИТ по транзитной ТС ($Q^{тс}_{осн}$), определяется следующим образом:

$$Q^{тс}_{осн} = Q_{осн} \cup Q_{тс},$$

$$Q^{тс}_{осн_m} \in Q^{тс}_{осн}; \quad Q_{осн_i} \in Q_{осн}; \quad Q_{тс_l} \in Q_{тс} \tag{9.11}$$

$$(i = \overline{1, m^{Q}_{осн}}; \quad l = \overline{1, m^{Q}_{тс}}; \quad m = \overline{1, m^{тс}_{осн}}),$$

где $m^{Q}_{осн}$ – число значений дискретной случайной величины тепловой мощности основного ИТ; $m^{тс}_{осн}$ – число значений дискретной случайной величины тепловой энергии, поступающей в единицу времени от основного ИТ через транзитную ТС.

Вероятности значений $Q^{тс}_{осн_m}$ определяются в предположении независимости отказов основного ИТ и транзитной ТС:

$$P^{тс}_{осн_m} = \begin{cases} P_{осн_i} \sum\limits_{Q_{тс_l} > Q_{осн_i}} P_{тс_l} & \text{для} \quad Q^{тс}_{осн_m} = Q_{осн_i}, \\ P_{тс_l} \sum\limits_{Q_{осн_i} > Q_{тс_l}} P_{осн_i} & \text{для} \quad Q^{тс}_{осн_m} = Q_{тс_l}, \\ P_{осн_i} P_{тс_l} & \text{для} \quad Q^{тс}_{осн_m} = Q_{осн_i} = Q_{тс_l}, \end{cases} \tag{9.12}$$

где $P_{осн_i}$ – вероятности значений случайной величины тепловой мощности основного ИТ, определяемые согласно (9.3); $P_{тс_l}$ – вероятности значений случайной величины пропускной способности транзитной ТС, определяемые по (9.9); $P^{тс}_{осн_m}$ – вероятности значений случайной величины тепловой энергии, передаваемой от основного ИТ к ПРК по транзитной ТС.

Поскольку генерирующая часть СЦТ представлена основным и пиково-резервными ИТ, тепловая энергия, получаемая в целом районом теплопотребления в единицу времени, представляет собой дискретную случайную величину Q_G, ряд распределений которой $f(Q_G)$ можно получить в предположении независимости отказов генерирующего оборудования основного и пиково-резервных ИТ и транзитных ТС:

$$Q_{Gm_j} = Q^{тс}_{осн_m} + Q_{прк_j}, \quad P_{Gm_j} = P^{тс}_{осн_m} P_{прк_j} \tag{9.13}$$

$$(m = \overline{1, m^{тс}_{осн}}; \quad j = \overline{1, m^{Q}_{прк}}),$$

где P_{Gm_j} – вероятности значений случайной величины тепловой энергии, получаемой потребителями СЦТ в единицу времени; $P_{прк_j}$ – вероятности

значений случайной величины тепловой мощности пиково-резервных ИТ, получаемые по (9.5); $m^{Q}_{\text{прк}}$ – число дискретных значений $Q_{\text{прк}}$.

Пусть тепловая нагрузка СЦТ Q задается ступенчатым графиком по интервалам времени в течение года, оставаясь в пределах каждого расчетного интервала ΔT постоянной. Для каждого значения тепловой нагрузки Q, время стояния которой в течение года составляет ΔT, рассмотрим множество состояний СЦТ S, каждое из которых характеризуется небалансом тепловой нагрузки в системе ΔQ_{m_j} и вероятностью этого небаланса P_{m_j}:

$$\Delta Q_{m_j} = Q_{Gm_j} - Q, \quad P_{m_j} = P_{Gm_j} \tag{9.14}$$

$$(\overline{m = 1, m^{\text{тс}}_{\text{осн}}};\ \overline{j = 1, m^{Q}_{\text{прк}}}).$$

Множество состояний S состоит из подмножества избыточных состояний S^{+}, характеризующихся избытком или балансом генерирующей мощности в СЦТ ($\Delta Q_{m_j} \geqslant 0$), и подмножества дефицитных состояний S^{-}, в которых тепловой мощности ИТ недостаточно для покрытия требуемой тепловой нагрузки СЦТ ($\Delta Q_{m_j} < 0$).

Сумма вероятностей избыточных состояний из подмножества S^{+} определяет вероятность бездефицитного покрытия тепловой нагрузки системы имеющимся составом генерирующего оборудования ИТ с учетом аварийности генерирующей и сетевой частей СЦТ Π^{+}. Сумма вероятностей дефицитных состояний из подмножества S^{-} дает вероятность недопокрытия тепловой нагрузки системы Π^{-}:

$$\Pi^{+} = \sum_{S^{+}} P_{m_j}\{\Delta Q_{m_j} \geqslant 0\},$$
$$\Pi^{-} = \sum_{S^{-}} P_{m_j}\{\Delta Q_{m_j} < 0\}. \tag{9.15}$$

Исходя из (9.15) может быть определен любой из показателей [70], характеризующих надежность теплоснабжения потребителей СЦТ на временном интервале ΔT. Таким показателем надежности может быть, например, коэффициент обеспечения тепловой нагрузки СЦТ π, определяемый как

$$\pi = 1 - \Delta Q^{-}_{G}\tau/(Q\Delta T), \tag{9.16}$$

где τ – среднее время недопокрытия тепловой нагрузки на интервале ΔT; ΔQ^{-}_{G} – среднее значение дефицита генерирующей мощности в СЦТ на временном интервале ΔT:

$$\Delta Q^{-}_{G} = \sum_{S^{-}} \Delta Q_{m_j} P_{m_j}\{\Delta Q_{m_j} < 0\} \tag{9.17}$$

$$(\overline{m = 1, m^{Q}_{\text{осн}}};\ \overline{j = 1, m^{Q}_{\text{прк}}}).$$

Применение описанной методики определения показателей надежности теплоснабжения иллюстрируется на примере исследования СЦТ с расчетной тепловой нагрузкой 1400, 1750 и 2100 МВт, в состав которой входят 4–6 районов теплопотребления. В качестве альтернативных типов основных ИТ рассматривались одно- и двухблочная АСТ с единичными блоками РУ-500 [48]. На пиково-резервных ИТ были установлены котлоагрегаты единич-

Таблица 9.1. **Результаты технико-экономических расчетов по оптимизации СЦТ с учетом фактора надежности**

Расчетная тепловая нагрузка СЦТ, МВт	Состав генерирующего оборудования ИТ		Диаметры трубопроводов ТС, м		Суммарные приведенные затраты в СЦТ, млн руб./год	Показатели надежности	
	основного	пиково-резервных	головного участка	ответвлений		коэффициент обеспечения тепловой нагрузки	максимальный небаланс тепловой нагрузки, МВт
1400	РУ-500	12 × ВК-116	1 × 0,996	4 × 0,514	62,0	0,994	100
	2 × РУ-500	12 × ВК-58	1 × 1,192	4 × 0,612	65,2	0,973	109
1750	РУ-500	15 × ВК-116	1 × 1,192	5 × 0,514	73,1	0,985	114
	2 × РУ-500	20 × ВК-58	1 × 1,192	5 × 0,612	73,9	0,980	150
2100	РУ-500	18 × ВК-116	1 × 1,192	6 × 0,514	86,1	0,980	128
	2 × РУ-500	24 × ВК-58	2 × 0,996	6 × 0,514	83,9	0,985	149

ной тепловой мощностью 58 и 116 МВт, работающие на газе. Транзитная ТС, соединяющая основной ИТ с ПРК, состояла из одно- или двухмагистрального головного участка протяженностью 4500 м и одномагистральных ответвлений по числу районов теплопотребления протяженностью 2000 м. Расчеты выполнены для средней тепловой нагрузки января.

Для каждого из исследуемых уровней тепловой нагрузки с привлечением описанной в гл. 4 методики комплексной оптимизации СЦТ, использующей традиционный учет фактора надежности, были получены альтернативные варианты составов генерирующего оборудования ИТ и конфигурации транзитной ТС (табл. 9.1).

Значения показателей надежности функционирования структурных элементов СЦТ принимались в соответствии с имеющимися данными по параметрам потоков отказов и восстановлений элементов ИТ и ТС [80] и их экспертными оценками. Так, вероятности нахождения в работоспособном состоянии структурных элементов основного и пиковых ИТ составляли 0,973 и 0,952; вероятность пребывания в работоспособном состоянии сетевого структурного элемента принималась 0,994.

В качестве показателей надежности теплоснабжения рассматривались коэффициент обеспечения тепловой нагрузки (9.16) и максимальная на рассматриваемом интервале величина небаланса тепловой мощности

$$\Delta Q_{\bar{G}_{\max}} = \max_{s^-} \{\Delta Q_{m_j} < 0\}. \qquad (9.18)$$

Показатель (9.18) дает возможность оценить максимальный дефицит тепловой мощности ИТ на рассматриваемом интервале времени, что позволяет сделать соответствующие выводы о том, насколько в данном конкретном случае правомерен традиционный укрупненный подход к учету фактора надежности теплоснабжения [34, 35].

Анализ показателей надежности (9.17), (9.18) альтернативных вариантов структуры СЦТ (см. табл. 9.1) показал:

для расчетных тепловых нагрузок 1400 и 1750 МВт предпочтительными с точки зрения обеспечения надежности теплоснабжения оказываются варианты АСТ с одной реакторной установкой РУ-500, которым одновременно соответствуют и меньшие значения суммарных приведенных затрат в СЦТ;

при расчетной тепловой нагрузке 2100 МВт большей надежностью характеризуется вариант СЦТ с двухблочной АСТ. Это связано с тем, что головной участок транзитной ТС является двухмагистральным, что приводит к существенно меньшим ограничениям передачи тепловой энергии от АСТ в ПРК в аварийных режимах работы ТС. Этим объясняется, что вариант с двухблочной АСТ становится более надежным, хотя разница в показателях надежности вариантов незначительна.

9.3. Оптимизация структурной надежности ИТ

АСПТ по сравнению с ИТ на органическом топливе имеют существенно большую единичную мощность, характеризуются повышенной сложностью конструкций оборудования и технологических схем, значительным ростом удельных капиталовложений на их сооружение. Кроме того, для АСПТ

характерна значительная протяженность магистральных ТС между АСПТ и районами теплопотребления. Соответственно отрицательные экономические последствия для потребителей теплоты в СЦТ из-за возможных нарушений работоспособности АСПТ могут быть более значительными, чем в случае ИТ на органическом топливе. Все это требует большего внимания к вопросам надежности АСПТ.

Повышение надежности АСПТ почти всегда связано с дополнительными затратами. Это определяет важность и необходимость экономического обоснования уровня надежности АСПТ и способа его обеспечения. Однако в настоящее время в практике разработки и проектирования АСПТ и СЦТ с АСПТ используются критерии и оценки надежности, основанные на инженерном опыте эксплуатации котельных, ТЭЦ и АЭС [83]. Учитывая перечисленные особенности АСПТ, специфику СЦТ с АСПТ и отсутствие опыта эксплуатации близких аналогов, представляется недостаточным использование таких качественных характеристик надежности. В данном разделе предлагается методика, позволяющая на стадии разработки и проектирования АСПТ количественно обосновывать решения по ее надежности. Эта методика использовалась для решения задач надежности для АСПТ – двух-трехпродуктового объекта со сложной технологической схемой и излагается здесь применительно к этому объекту. Однако она без значительных изменений может быть использована для любого типа АИТ.

В предлагаемой методике применительно к энергоблоку АСПТ рассматривается один из основных способов повышения надежности технических систем – повышение структурной надежности. В рамках этого способа повышение надежности энергоблока АСПТ возможно за счет: разделения номинальной производительности элементов и систем между элементами и системами меньшей производительности; полного или частичного структурного резервирования элементов и систем; резервирования элементов обводными связями.

Как отмечалось, АСПТ может производить несколько видов теплоты: пар одного-двух уровней давления и горячую воду. Каждый из этих видов продукции выдается из разных элементов АСПТ, имеет свой график нагрузки, своих потребителей и другие особенности. Соответственно исследуется надежность АСПТ по каждому из отпускаемых видов теплоты.

При решении задач оптимизации надежности АСПТ в качестве критерия оптимальности решения принимается экономический критерий – минимум приведенных затрат по АСПТ и смежным объектам. Конкретное выражение (содержание) этого критерия зависит от постановки задачи оптимизации надежности АСПТ.

Рассмотрим возможные постановки задач надежности для АСПТ.

1. При заданных (нормативных) уровнях надежности $H_0 = (H_{0_1}, \ldots \ldots, H_{0_L})$ по каждоу из L видов теплоты для энергоблока АСПТ минимизировать приведенные затраты З по энергоблоку АСПТ, необходимые для достижения этих уровней надежности, путем выбора оптимального варианта X_s структуры технологической схемы энергоблока АСПТ на множестве ее вариантов, т.е.

$$\text{З}\{X_s \mid H_l(X_s) \geqslant H_{0l}, F^{\min} \leqslant F(X_s) \leqslant F^{\max}\} = \text{З}_{\min}, \quad s = \overline{1, S}, \qquad (9.19)$$

где S – количество вариантов технологической схемы энергоблока АСПТ;

$H_l(X_s)$ – расчетный уровень надежности энергоблока АСПТ по l-му виду теплоты; F – совокупность ограничений на допустимое количество, производительность, теплогидравлические параметры элементов и систем энергоблока АСПТ, ограничения по безопасности и т.д.; $F^{\min}$, $F^{\max}$ – совокупность минимально и максимально допустимых значений ограничений F.

Нормативным уровнем надежности H_0 для энергоблока АСПТ может быть либо экономически целесообразный уровень надежности, определяемый для него в результате решения задачи надежности на уровне СЦТ, либо устанавливаемый по другим соображениям [84, 85].

2. В условиях, когда нормативы надежности для АСПТ не выработаны, может решаться следующая задача укрупненного определения оптимального уровня надежности АСПТ (соответственно и ее энергоблоков).

При заданных экспертным путем нормативах надежности на производство теплоты в СЦТ $H_0 = (H_{0_1}, \ldots, H_{0_L})$ и заданной неоптимизируемой структуре магистральных ТС минимизировать сумму приведенных затрат по АСПТ и пиково-резервным котельным, необходимых для обеспечения этих нормативных уровней надежности, путем выбора оптимального варианта структуры технологической схемы энергоблоков АСПТ X_s и оптимальных величин резерва мощности в СЦТ по видам теплоты $Q = (Q_1 \ldots, Q_L)$, т.е.

$$З\{X_s, Q(X_s) \mid H_l(X_s, Q(X_s)) \geqslant H_{0l};$$
$$F^{\min} \leqslant F(X_s) \leqslant F^{\max}; \quad Q_l \in G_l\} = З_{\min}, \quad s = \overline{1, S}, \tag{9.20}$$

где G_l – множество дискретных значений резервной мощности.

При наличии по какому-либо из отпускаемых потребителям видов теплоты достоверных показателей удельных ущербов от ее недоотпуска в рамках этой задачи по данному виду теплоты можно отказаться от задания норматива надежности и определять оптимальный уровень надежности АСПТ из условия минимума суммы затрат по АСПТ, ПРК и ущерба.

В сформулированных задачах оптимизация надежности АСПТ осуществляется путем направленного перебора вариантов структурной схемы энергоблока АСПТ и количества резервных котлов в СЦТ – во второй задаче. Необходимой предпосылкой для решения этих задач является расчет количественных характеристик надежности АСПТ. Такие характеристики определяются при помощи математической модели надежности АСПТ, которая строится на основе дискретного однородного марковского процесса [86].

Расчет надежности АСПТ осуществляется в два этапа – расчет показателей надежности энергоблока АСПТ, а затем на их основе получение показателей для двухблочной АСПТ в целом. При этом предполагается, что энергоблоки АСПТ независимы в смысле надежности.

Для расчета показателей надежности энергоблока АСПТ выделяются его возможные состояния, обусловливаемые различным количеством отказавшего оборудования в его схеме. Эти состояния описываются векторами вида

$$r_n = (\varphi_1, \ldots, \varphi_M, Q_\upsilon, Q_{\upsilon_1}, \ldots, Q_{\upsilon_L}), \qquad n = \overline{0, N}, \tag{9.21}$$

где N – количество возможных состояний энергоблока АСПТ; M – коли-

чество блоков элементов в схеме энергоблока АСПТ (под блоком элементов понимается группа из a однотипных параллельно соединенных в смысле надежности элементов, $a \geqslant 1$); φ_M – переменная, равная количеству отказавших элементов в M-м блоке; Q_v, Q_{v_l} – уровни располагаемой мощности энергоблока: суммарный и по l-му виду теплоты соответственно ($v = \overline{1, V}$; $v_l = \overline{1, V_l}$).

Случайный процесс переходов энергоблока АСПТ в выделенные состояния описывается указанным выше марковским процессом, а вероятности пребывания энергоблока в этих состояниях определяются из решения системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dP(t)}{dt} = \Lambda P(t), \quad \sum_{n=0}^{N} p_n(t) = 1, \tag{9.22}$$

для которой задаются начальные условия вида

$$p_0(t=0) = p_0, \ldots, p_N(t=0) = p_N,$$

где $P(t)$ – вектор-столбец вероятностей состояний энергоблока; Λ – матрица интенсивностей переходов между состояниями; $p_n(t)$ – условная вероятность пребывания энергоблока в состоянии n в момент времени t при условии, что в начальный момент времени он находился в некотором начальном состоянии.

Вероятности состояний энергоблока АСПТ используются для вычисления показателей его надежности, таких, как коэффициенты готовности $K_г$, вероятности реализации уровней располагаемой мощности (у.р.м.) R и параметры потока отказов ω. Эти показатели вычисляются относительно у.р.м. по отдельным видам теплоты энергоблока АСПТ:

$$K_г(Q_{v_l}, t) = \sum_{n \in E(Q \geqslant Q_{v_l})} p_n(t); \quad R(Q_{v_l}, t) = \sum_{n \in E(Q_{v_l})} p_n(t); \tag{9.23}$$

$$\omega(Q_{v_l}, t) = \sum_{n \in E(Q_{v_l})} p_n(t) \sum_{j \in E(Q < Q_{vl})} \lambda_{nj},$$

где $E(\cdot)$ – множества состояний энергоблока с соответствующими у.р.м.; λ_{nj} – интенсивности переходов энергоблока между состояниями.

В тех случаях, когда имеются ограничения на размерность пространства возможных состояний энергоблока АСПТ, расчет показателей (9.23) может быть проведен с использованием приема декомпозиции исходной расчетной схемы энергоблока АСПТ на независимые подсистемы. Рассчитанные для каждой подсистемы показатели (9.23) используются затем для получения показателей исходной схемы.

Для комплексной характеристики надежности АСПТ в целом используются коэффициенты готовности и коэффициенты обеспеченности продукцией по видам теплоты, последние из которых вычисляются по формуле

$$\pi = (W_0 - \Delta W)/W_0, \tag{9.24}$$

где W_0, ΔW – математические ожидания требуемой выработки и недовыработки теплоты от АСПТ за рассматриваемый период эксплуатации из-за отказов работоспособности оборудования.

При решении второй задачи оптимизации наряду с АСПТ рассматриваются ПРК и магистральные ТС между этими ИТ. Учитывая, что целью этой задачи является определение оптимального уровня надежности АСПТ, а не размещение резервов в СЦТ, предполагается, что по каждому из видов теплоты в СЦТ имеется по одному концентрированному пиково-резервному ИТ. Соответственно структура системы АСПТ – магистральные ТС – ПРК представляется в виде: АСПТ и магистральная ТС соединены последовательно и параллельно с ними соединена ПРК. Предполагается также, что АСПТ, ПРК и магистральные ТС являются тремя независимыми в смысле надежности системами; соответственно расчет надежности каждой из них проводится отдельно.

Вычисление показателей надежности производства какого-либо из видов теплоты в СЦТ осуществляется следующим образом. По рассматриваемому виду теплоты рассчитывается надежность системы магистральных ТС по изложенной выше методике. Относительно пиковых котлов на ПРК предполагается, что они одинаковые и могут находиться в двух состояниях – исправности или отказа. По известным вероятностям этих состояний p_1 и p_2 соответственно рассчитываются вероятности отказа k пиковых котлов из общего количества m на ПРК по формуле

$$P_k = \frac{m!}{k!\,(m-k)!}\, p_1^{m-k} p_2^k, \quad k = \overline{0, m}. \tag{9.25}$$

Резервные котлы считаются системой кратковременного действия, всегда начинающей свою работу из исправного состояния и остающейся в нем в течение времени ее использования.

Далее для каждого состояния α системы АСПТ – магистральные ТС – ПРК (получаемых исходя из ее структуры) вычисляются: у.р.м. системы, определяемый у.р.м. АСПТ, ПРК и пропускной способностью ТС; вероятность реализации состояния $P_\alpha^*(t)$, определяемая вероятностями $R(Q_{vl}, t)$, P_k и вероятностями функционирования системы магистральных ТС с различной пропускной способностью. На основе таких характеристик системы АСПТ – магистральные ТС – ПРК вычисляются коэффициенты готовности и обеспеченности продукцией, характеризующие надежность производства и отпуска теплоты этой системой.

Тепловая нагрузка в СЦТ (за исключением нагрузки технологического теплопотребления) определяется температурой наружного воздуха, колебания которой имеют случайный характер. Соответственно для задания нагрузки СЦТ используется вероятностный способ, основанный на обобщенных данных по колебаниям температур наружного воздуха, приведенных в [6].

Выражение для критерия экономической эффективности для первой задачи оптимизации надежности записывается в виде

$$З(X_s) = З_к + И_т + И_{ар}, \tag{9.26}$$

где $З_к$ – переменная часть затрат по энергоблоку АСПТ, определяемых капиталовложениями на создание резервов в его схеме; $И_т$ – топливная составляющая приведенных затрат по энергоблоку; $И_{ар}$ – издержки на аварийный ремонт оборудования энергоблока АСПТ за год.

Затраты $З_к$ определяются по общепринятой в энергетике методике [20]. Издержки $И_т$ являются функцией от двух случайных аргументов – у.р.м. энергоблока АСПТ и температуры наружного воздуха (нагрузки). Обозначив среднее время пребывания энергоблока на некотором интервале постоянства нагрузки $[t_c, t_{c+1}]$ в множестве состояний с уровнем располагаемой мощности Q_{v_l} через $\tau_{cv_l} = \int_{t_c}^{t_{c+1}} R(Q_{v_l}, t)\,dt$, среднее значение $И_т$ можно определить по формуле

$$И_т = Ц_т \sum_{l=1}^{L} W_l^{э.б} = Ц_т \sum_{l=1}^{L} \left[\sum_{c=1}^{C} \sum_{i=1}^{I} \sum_{v_l=1}^{V_l} P_{ci}\, Q_{v_l}\, \delta \tau_{cv_l} \right], \qquad (9.27)$$

$$\delta = \begin{cases} 1, \text{ если } Q_i^{э.б} \geqslant Q_{v_l}; \\ Q_i^{э.б}/Q_{v_l}, \text{ если } Q_i^{э.б} < Q_{v_l}, \end{cases}$$

где $Ц_т$ – топливная составляющая удельных приведенных затрат на АСПТ; $W_l^{э.б}$ – годовая выработка энергоблока АСПТ по l-му виду теплоты; C – количество интервалов постоянства требуемой мощности за год; I – количество возможных значений нагрузки на c-м интервале времени; $Q_i^{э.б}$ – нагрузка энергоблока АСПТ по l-му виду теплоты; P_{ci} – вероятность стояния i-го уровня нагрузки на c-м интервале.

Издержки $И_{ар}$ определяются по формуле

$$И_{ар} = \sum_{n=1}^{N} \bar{z}_n \left[\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq n}}^{N} \lambda_{jn} \int_0^T p_j(t)\,dt \right], \qquad (9.28)$$

где N – количество возможных состояний энергоблока АСПТ; $\bar{z}_n$ – удельные затраты на однократное восстановление энергоблока из n-го состояния; T – рассматриваемый период эксплуатации.

Выражение в квадратных скобках представляет собой среднее количество попаданий энергоблока АСПТ за время T в состояние n.

Выражение для критерия экономической эффективности для второй задачи оптимизации надежности имеет вид

$$З(X_s, Q(X_s)) = З_{АСПТ} + З_{прк} + \delta У, \qquad (9.29)$$

где $З_{АСПТ}$ – затраты по АСПТ, аналогичные по смыслу затратам по энергоблоку АСПТ в первой задаче оптимизации; $З_{прк}$ – переменная часть затрат по ПРК за год; У – ущерб от недоотпуска теплоты потребителям за год; $\delta = 1$, если решается задача с использованием показателей ущерба, и $\delta = 0$ в противном случае.

Затраты $З_{прк}$ для простейшего случая резервирования АСПТ (когда по каждому из отпускаемых ею видов теплоты в СЦТ имеется отдельный резерв мощности) определяются по формуле

$$З_{прк} = \sum_{l=1}^{L} [З_l^{р} + (Ц_{т_l}^{прк} - Ц_т)\ (W_l^{р} + W_l^{пк})\ ], \qquad (9.30)$$

где $З_l^{р}$ – составляющая затрат, определяемая капиталовложениями на установку резервных котлов; $Ц_{т_l}^{прк}$ – топливная составляющая удельных

приведенных затрат на ПРК; $W_l^{\text{Р}}$, $W_l^{\text{пк}}$ – годовая энерговыработка резервных и пиковых котлов соответственно при использовании их для компенсации недовыработки на АСПТ.

В формуле (9.30) второе слагаемое учитывает издержки, связанные с перерасходом топлива при использовании пиково-резервных котлов для замещения АСПТ, так как удельная топливная составляющая затрат на АСПТ существенно ниже, чем на ПРК.

Ущерб от недоотпуска теплоты потребителям определяется по формуле

$$У_l = \bar{y}_l \Delta W_l, \tag{9.31}$$

где $\bar{y}_l$ – удельный ущерб от недоотпуска единицы теплоты l-го вида; ΔW_l – годовой недоотпуск теплоты потребителям.

В формулах (9.30), (9.31) величины $W^{\text{Р}}$, $W^{\text{пк}}$ и ΔW являются функциями от двух случайных величин – у.р.м. СЦТ и температуры наружного воздуха (нагрузки). Средние значения этих функций определяются следующим образом.

Для каждого состояния α системы АСПТ – магистральные ТС – ПРК и при i-м уровне ее нагрузки величина неявного резерва пиковой мощности $\Delta Q_{i\alpha}^{\text{пк}}$ на ПРК, которая может быть использована для компенсации недовыработки теплоты на АСПТ, определяется по формуле

$$\Delta Q_{i\alpha}^{\text{пк}} = \max\{0; Q_\alpha^{\text{пк}} - Q_i^{\text{пк}}\}, \tag{9.32}$$

где $Q_\alpha^{\text{пк}}$ – располагаемая мощность пиковой котельной в состоянии α; $Q_i^{\text{пк}}$ – нагрузка пиковой котельной.

Если обозначить $\delta Q_1 = Q_i^{\text{АСПТ}} - Q_\alpha^{\text{АСПТ}}$, то среднее значение энерговыработки $W^{\text{пк}}$ определяется по формуле

$$W^{\text{пк}} = \sum_{c=1}^{C} \sum_{i=1}^{I} \sum_{\alpha=1}^{A} P_{ci}\, Q_{i\alpha}^{\text{пк}}\, \tau_{c\alpha}^*, \tag{9.33}$$

$$Q_{i\alpha}^{\text{пк}} = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta Q_1 \leqslant 0; \\ \delta Q_1, & \text{если } 0 < \delta Q_1 < \Delta Q_{i\alpha}^{\text{пк}}; \\ \Delta Q_{i\alpha}^{\text{пк}}, & \text{если } \delta Q_1 \geqslant \Delta Q_{i\alpha}^{\text{пк}}, \end{cases}$$

где A – количество состояний (у.р.м.) системы АСПТ – магистральные ТС – ПРК; $Q_{i\alpha}^{\text{пк}}$ – используемый неявный резерв мощности пиковых котлов на ПРК; $\tau_{c\alpha}^*$ – среднее время пребывания системы в состоянии α на c-м интервале времени (определяется при помощи вероятностей $P_\alpha^*(t)$); $Q_i^{\text{АСПТ}}$ – нагрузка АСПТ; $Q_\alpha^{\text{АСПТ}}$ – располагаемая мощность АСПТ в состоянии системы α.

Мощность резервных котлов в СЦТ, которая может быть использована для компенсации недовыработки теплоты на АСПТ $\Delta Q_{i\alpha}^{\text{Р}}$, равна либо суммарной мощности этих котлов $Q_0^{\text{Р}}$ (если не имеется дефицита мощности по пиковым котлам), либо (в противном случае) величине, определяемой по формуле

$$\Delta Q_{i\alpha}^{\text{Р}} = \max\{0; Q_0^{\text{Р}} - (Q_i^{\text{пк}} - Q_\alpha^{\text{пк}})\}. \tag{9.34}$$

Обозначив через $\delta Q_2 = Q_i^{\text{АСПТ}} - Q_\alpha^{\text{АСПТ}} - Q_{i\alpha}^{\text{пк}}$, среднее значение

величины $W^{\text{Р}}$ можно определить по формуле

$$W^{\text{Р}} = \sum_{c=1}^{C} \sum_{i=1}^{I} \sum_{\alpha=1}^{A} P_{ci}\, Q_{i\alpha}^{\text{Р}}\, \tau_{c\alpha}^{*}, \tag{9.35}$$

$$Q_{i\alpha}^{\text{Р}} = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta Q_2 \leqslant 0; \\ \delta Q_2, & \text{если } 0 < \delta Q_2 < \Delta Q_{i\alpha}^{\text{Р}}; \\ \Delta Q_{i\alpha}^{\text{Р}}, & \text{если } \delta Q_2 \geqslant \Delta Q_{i\alpha}^{\text{Р}}, \end{cases}$$

где $Q_{i\alpha}^{\text{Р}}$ – используемая часть мощности $\Delta Q_{i\alpha}^{\text{Р}}$.

Обозначив дефицит мощности в СЦТ через

$$\delta Q_3 = \max\{0; Q_i^{\text{АСПТ}} + Q_i^{\text{пк}} - Q_\alpha^{\text{АСПТ}} - Q_\alpha^{\text{пк}} - Q_0^{\text{Р}}\},$$

среднее значение ΔW можно определить по формуле

$$\Delta W = \sum_{c=1}^{C} \sum_{i=1}^{I} \sum_{\alpha=1}^{A} P_{ci}\, \delta Q_3 \tau_{c\alpha}^{*}. \tag{9.36}$$

Изложенная методика реализована в виде ПВК для ЭВМ на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV.

В качестве примера использования изложенной методики здесь приводятся некоторые результаты решения задачи надежности для АСПТ во второй постановке. Рассматривалась двухблочная АСПТ, вынесенная за пределы районов теплопотребления на 7 км. Пар и горячая вода от АСПТ подаются по двухниточным подающим трубопроводам. Имеются две ПРК: на промпредприятии в составе двух котлов Е-100-24ГМ и у коммунально-бытовых потребителей в составе четырех котлов КВГМ-100. Для оптимизации уровней надежности АСПТ по отпуску пара использовались показатели удельного ущерба, а по отпуску горячей воды задавались нормативные показатели для системы АСПТ – магистральные ТС – ПРК: коэффициент готовности $K_{\text{г}}$ = 0,97 для у.р.м. этой системы Q = 100% и $K_{\text{г}}$ = 0,99 для Q = 70%.

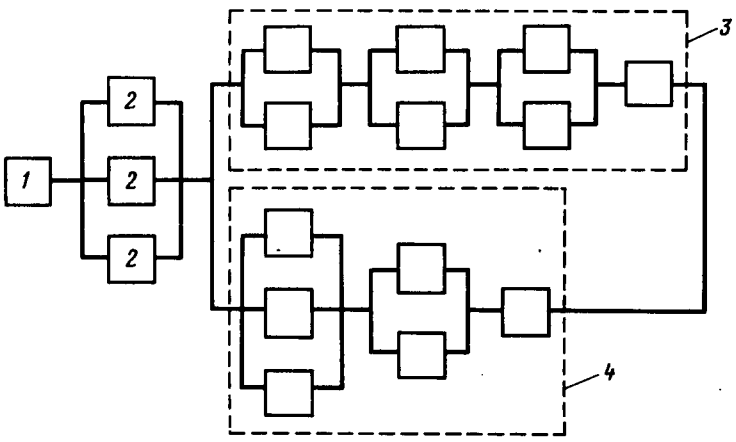


Рис. 9.4. Расчетная схема энергоблока АСПТ

1 – реактор; *2* – петля II контура; *3, 4* – оборудование, связанное с производством пара и горячей воды соответственно

Таблица 9.2. **Показатели надежности и эффективности АСПТ**

Количество петель	Прирост			Коэффициент обеспеченности продукцией по АСПТ	
	капиталовложений по АСПТ, млн руб.	приведенных затрат, млн руб./год	ущерба, млн. руб./год	Пар	Вода
2	0	0	0	0,927	0,942
3	1,62	−0,56	−0,15	0,942	0,964
4	3,43	−0,35	−0,19	0,956	0,973

Результаты расчетов в зависимости от изменения количества петель II контура энергоблока АСПТ (рис. 9.4) приведены в табл. 9.2. За исходный вариант принята двухпетлевая схема. Переход к трех- и четырехпетлевым схемам привел к соответствующему уменьшению приведенных затрат и ущерба, а также к увеличению показателей надежности АСПТ, причем в первом случае уменьшение приведенных затрат на 1 руб. дополнительных капвложений составляет 0,346 руб./год, а во втором – 0,102 руб./год.

Исследовано также влияние на надежность отпуска теплоты АСПТ количества циркнасосов в петлях II контура, вариантов байпасирования некоторого его оборудования, различных вариантов резервирования оборудования, связанного с производством пара и горячей воды и др.

Глава десятая

ИССЛЕДОВАНИЯ СЦТ ПРИ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

10.1. Исходные методические положения

При технико-экономическом анализе и комплексной оптимизации СЦТ и ИТ исключительно большое значение имеет правильный учет природы и свойств исходной информации, необходимой для определения технико-экономических показателей СЦТ и ИТ. Свойства исходной информации принадлежат к числу решающих условий постановки указанных задач; ими в значительной мере определяются метод решения задачи и интерпретация полученных результатов.

Используемую в расчетах исходную информацию по степени ее неоднозначности подразделяют на три вида: детерминированная, вероятностная, недостаточно определенная (частично неопределенная). При рассмотрении СЦТ и ИТ к детерминированной информации, т.е. информации, задаваемой единственным значением соответствующего показателя, можно отнести номинальные значения параметров ИТ и их оборудования, а также некоторые дискретно или целочисленно изменяющиеся величины: число агрегатов, вид схемы тепловой сети, типы конструкций и компоновок ИТ и оборудования тепловой сети.

Вероятностная информация, рассматриваемая как объективная, характеризует массовые случайные события (явления), многократно повторяющиеся в неизменных условиях и имеющие функции распределения вероятностей появления этих событий. При этом случайными называют события, которые в данных условиях могут произойти или не произойти, причем имеется определенная вероятность наступления этих событий. К этому виду информации относятся некоторые геофизические показатели: температура наружного воздуха, скорость ветра, температура воды в водоемах и т.п.

Недостаточно определенная информация не обладает вероятностной характеристикой и отображает недостаточность знаний о данной системе (объекте), требуемых для принятия однозначного решения. Это обусловлено сложностью структуры системы, многочисленностью факторов, влияющих на ее развитие, неопределенностью будущих объективных тенденций развития, возможными последствиями от еще не принятых решений, например, о развитии смежных систем и др. Так, для перспективного планирования, проектирования и прогнозирования в энергетике характерна недостаточная определенность знаний о научно-техническом прогрессе, что обусловлено недостаточной определенностью реализации в будущем его отдельных направлений и открытий, а также невозможностью познания точных характеристик техники будущего, сроков ее создания и др.

Существование недостаточно определенных знаний позволяет говорить об исследовании СЦТ при неполной информации, т.е. когда невозможно на основе данной информации получить в большинстве случаев однозначные решения о структуре и параметрах СЦТ.

Соотношение видов используемой информации существенно зависит от временного периода оптимизации системы. Обычно чем ближе рассматриваемый отрезок времени, тем в большей мере снимается неполнота знаний, а поэтому тем больше доля детерминированной информации и меньше доля неполной информации. Применительно к задачам исследования СЦТ рассматриваемый отрезок времени изменяется в весьма широком диапазоне. Многие важные задачи разработки и проектирования СЦТ и ИТ (особенно новых типов) решаются с достаточно большой заблаговременностью (до 15–20 лет), когда большая часть исходных данных неоднозначна. При этом для ряда величин опыт прошлого или отсутствует, или недостаточен для статистической обработки и они могут быть заданы (оценены) лишь возможным диапазоном значений.

Кроме неполноты, для решения задач оптимизации СЦТ и ИТ весьма важны и такие свойства информации, как существенность, достаточность, своевременность, стабильность и достоверность, так как этими свойствами определяется качественная ценность информации.

С целью повышения качества используемой информации в последние годы выполнены работы по развитию методов установления статистических закономерностей для той части информации, для которой имеется некоторый статистический материал. Значительное внимание уделялось исследованию источников исходной информации в затрудненных условиях, способам и методам ее сбора, обработки и подготовки для целей оптимизации СЦТ и ИТ. Предложен и используется ряд методов (факторный анализ, планирование эксперимента и др.) для выделения и отсева несущественной информации с целью снижения размерности решаемой задачи.

Известно огромное количество (более 400) методик, методов и способов прогнозирования показателей исходной информации. Однако все они, в сущности, сводятся к четырем основным: экстраполяция, экспертные оценки, морфологическое расчленение и математическое моделирование [87–89]. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и недостатками. Повысить качество прогнозирования можно при комбинированном применении существующих методов прогнозирования. В качестве примера современного метода прогнозирования можно назвать метод дерева целей, который включает экспертные процедуры и схему декомпозиции [90].

Для выявления возможных источников информации и ее неопределенности необходим глубокий анализ системы информационных связей. Применительно к исследованию СЦТ и ИТ такие системы показаны на рис. 2.2 и 2.3. Внешняя исходная информация получается отчасти в результате оптимизации энергетических и экономических систем более высокого уровня, элементами которых являются СЦТ и ИТ, отчасти на основании прогнозирования. Источником исходной внутренней информации является анализ технологических процессов и конструктивно-компоновочных решений в ИТ или в физико-технических системах частей элементов оборудования. Получаемая в результате решения задачи искомая информация выступает в двух видах: в качестве информации прямого назначения для установления оптимальных параметров и характеристик СЦТ и ИТ и в качестве обратной внешней и внутренней информации. Обратная внешняя информация содержит показатели влияния СЦТ и ИТ на внешние системы. Обратная внутренняя информация определяет направления дальнейшего развития исследований на нижестоящей ступени иерархической лестницы. Кроме того, имеются потоки прямой и обратной обменной информации, циркулирующей внутри рассматриваемых систем математических моделей и содержащей сведения об оптимальных значениях параметров, полученных при решении оптимизационных задач на разных иерархических уровнях внутри СЦТ или ИТ. Содержание указанных потоков информации в информационной системе достаточно подробно было рассмотрено в гл. 2.

Опыт решения задач оптимизации СЦТ и ИТ показывает, что неопределенность внутренней исходной информации может быть существенно уменьшена в процессе разработки, проектирования и развития (создания) СЦТ и ИТ, а также при доводке головных образцов ИТ нового типа. Соответственно должно осуществляться поэтапное принятие решений, позволяющее проводить корректировку оптимальных решений по мере уточнения исходных данных. Неопределенность внешних условий будущей эксплуатации СЦТ и ИТ за указанный период уточнится относительно мало и будет значительно больше неопределенности внутренней информации. Поэтому учету неопределенности внешней информации должно быть уделено основное внимание.

Неоднозначность исходной информации порождает в каждой задаче зону недостаточной определенности ее оптимальных решений. В эту зону входят решения, оптимальные при тех или иных возможных сочетаниях исходной информации, а также некоторые решения, относительно мало отличающиеся от оптимальных, но легко приспосабливающиеся к большинству рассматриваемых условий. В зону неопределенности не входят реше-

ния, которые при всех рассматриваемых условиях дают более высокие затраты, чем какой-либо другой вариант решения данной задачи.

Объективное существование зоны неопределенности оптимальных решений имеет принципиальное значение, определяя требования к организации и методам решения проектно-плановых задач. Оно, в частности, обусловливает объективную ограниченность формализованных методов оптимизации, отводя им важную, но, по сути, вспомогательную роль подготовки возможных вариантов, на основании которых окончательные решения принимаются специалистами. Тем самым определена обязательная активная роль человека в формировании вариантов и в принятии окончательных решений, т.е. принципиальная "эвристичность" процедуры решения оптимизационных задач в условиях неполноты исходной информации.

Важно подчеркнуть, что главным средством преодоления неоднозначности исходной информации всегда является изучение реальных условий развития систем энергетики и входящих в них объектов, например путем выполнения соответствующих проектно-изыскательских работ. Рассматриваемые ниже методы необходимо использовать в тех случаях, когда, несмотря на все меры, неоднозначность исходной информации оказывает существенное влияние на принимаемые решения. Очевидный признак такой ситуации – получение противоположных решений при разных сочетаниях исходных данных в пределах неустранимой (на данном этапе) их неопределенности.

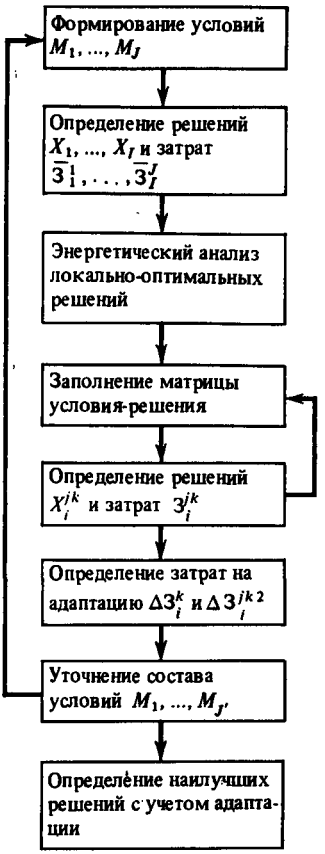
В настоящее время среди формализованных методов принятия решения в условиях неоднозначности исходной информации наибольшее применение нашел метод, базирующийся на использовании матрицы условия-решения, рекомендованный [91]. Проведение оптимизационных расчетов при неполной информации на основе этого метода предполагает: а) выявление зоны недостаточной определенности принимаемых решений; б) формирование из такой зоны значительно меньшей зоны равной экономичности принимаемых решений.

Реализация основных положений указанного метода существенно различна для статических и динамических задач. К первым относится задача поиска оптимального решения по ИТ, а ко вторым – оптимизация развития СЦТ. Далее в разд. 10.2 и 10.3 рассмотрены методы решения двух этих задач.

10.2. Оптимизация источников теплоты

В результате решения задачи оптимизации ИТ и его оборудования определяется рациональная технологическая схема ИТ, оптимальные параметры и профиль оборудования, которые реализуются при сооружении ИТ. Возможности изменения этих решений в случае существенного изменения условий функционирования ИТ очень ограничены или отсутствуют совсем. В этом проявляется статический характер рассматриваемой задачи. Вместе с тем при поиске оптимальных решений по ИТ необходимо учитывать возможные изменения условий работы ИТ. Эти изменения за полный период эксплуатации ИТ, как правило, весьма значительны. Соответственно приходится решать статическую задачу в условиях динамики многих внутренних и внешних факторов.

Рис. 10.1. Упрощенная блок-схема алгоритма поиска оптимального решения по ИТ при неполной информации



Оптимизационные расчеты ИТ при неоднозначной информации рекомендуется выполнять в три этапа: 1) выбор ограниченного, но представительного сочетания возможных условий создания и функционирования объекта; 2) выбор оптимальных решений для каждого из таких условий и их анализ; 3) обобщение полученных решений и формирование на этой основе зоны равноэкономичных решений по ИТ. Процедуры выполнения этих этапов существенно зависят от состава исходной информации, определяющей условия создания и функционирования ИТ и рассматриваемой как не полностью определенная. Здесь можно выделить два характерных случая: а) в состав учитываемой не полностью определенной информации входят экономические показатели (например, стоимость топлива, оборудования, материалов), характеристики энергетической эффективности оборудования (например, КПД котла) и другие показатели, изменение которых не отражается на работоспособности ИТ. Именно этот случай был рассмотрен в [91]; б) неопределенными являются не только экономические, но и внешние технические влияющие факторы (например, возможность перехода от сжигания малозольного к сжиганию многозольного топлива), изменение которых сказывается не только на экономичности, но и на работоспособности ИТ. Это более общий случай, применительно к нему также будет рассмотрена последовательность решения задачи (рис. 10.1).

Хотя отсев несущественной информации и снижает размерность задачи, часто она все же оказывается чрезмерно большой для практической реализации. Поэтому необходимо из данного множества возможных сочетаний исходной информации найти некоторое ограниченное, но достаточно представительное множество наиболее интересных для анализа условий создания и функционирования ИТ. В число таких сочетаний обычно вводят наряду с некоторыми "средними" (кажущимися наиболее вероятными) различные благоприятные и неблагоприятные сочетания, представляющиеся реально возможными. В процессе решения задачи набор принятых к рассмотрению условий будет уточнен (рис. 10.1).

Естественно, что каждому представительному варианту условий соответствует какое-то условно-оптимальное решение по ИТ. Это решение есть решение задачи оптимизации ИТ в детерминированной постановке:

найти

$$\min З_i^j(X_i, Y_i, M_j) \tag{10.1}$$

при

$$\Phi_i(X_i, Y_i) = 0, \tag{10.2}$$

$$F_i^* \leqslant F_i(X_i, Y_i) \leqslant F_i^{**}, \tag{10.3}$$

$$Y_i^* \leqslant Y_i(X_i) \leqslant Y_i^{**}, \tag{10.4}$$

$$X_i^* \leqslant X_i \leqslant X_i^{**}, \tag{10.5}$$

где $З_i^j$ – функция цели – приведенные затраты; X_i – вектор независимых оптимизируемых параметров; Y_i – вектор зависимых параметров; M_j – совокупность исходных данных; Φ_i – совокупность балансовых уравнений; F_i – вектор технологических характеристик.

Решение задачи (10.1)–(10.5) может быть найдено с помощью математической модели ИТ и детерминированных методов оптимизации [20, 25]. В итоге соответствующих оптимизационных расчетов для множества представительных сочетаний условий создания и функционирования ИТ $(M_1, \ldots, M_j, \ldots, M_J)$ находятся условно-оптимальные решения X_i и им соответствующие минимальные приведенные затраты $\overline{З}_i^j$. Полученные результаты расчетов удобно свести в матрицу условия-решения по ИТ (табл. 10.1). Столбцы этой матрицы соответствуют отобранным совокупностям исходных данных M_j, а строки – возможным совокупностям оптимизируемых параметров X_i. По главной диагонали матрицы расположатся минимальные значения приведенных затрат $(\overline{З}_1^1, \ldots, \overline{З}_i^j, \ldots, \overline{З}_I^J)$ для каждой совокупности значений исходных данных. Совокупность таким образом полученных условно-оптимальных решений входит в зону неопределенности получаемых решений.

Далее производится энергетический анализ полученных детерминированных условно-оптимальных решений с целью выяснения степени их совпадения. Поскольку конечной целью оптимизации ИТ является выбор оптимальной совокупности физических, расходных и конструктивно-компоновочных параметров, состава оборудования, а также вида техноло-

Таблица 10.1. **Матрица условия-решения по ИТ (первый случай)**

Вариант решения задачи	Условия решения задачи					Средние затраты по варианту
	M_1	...	M_j	...	M_J	
X_1	$\overline{З}_1^1$	...	$З_1^j = \overline{З}_1^1 \pm \Delta З_1^j$	...	$З_1^J = \overline{З}_1^1 \pm \Delta З_1^J$	$З_1$
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
X_i	$З_i^1 = \overline{З}_i^j \pm \Delta З_i^1$	...	$\overline{З}_i^j$	...	$З_i^J = \overline{З}_i^j \pm \Delta З_i^J$	$З_i$
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
X_I	$З_I^1 = \overline{З}_I^J \pm \Delta З_I^1$	...	$З_I^j = \overline{З}_I^J \pm \Delta З_I^j$	...	$\overline{З}_I^J$	$З_I$

гической схемы объекта, то основной целью анализа полученных решений должно быть установление: а) степени совпадения результатов расчетов, т.е. выявление совокупности решений по составу оборудования, виду технологической схемы и величинам параметров, одинаковых или очень близких во всех вариантах исходных условий; все совпадающие решения могут считаться экономичными; б) необходимости более детальных оптимизационных расчетов (на основе дополнительно привлекаемой информации) для ряда элементов оборудования и значений параметров, а также для некоторых участков технологической схемы ИТ; в первую очередь уточнению подлежат решения, существенно различающиеся для рассматриваемых сочетаний исходных данных.

Анализ подобных условно-оптимальных решений может быть достаточен для решения задачи. Это имеет место, если оптимальные значения параметров и схемно-компоновочных характеристик ИТ оказываются близкими во всех рассмотренных вариантах условий. Если же окажется, что полученные решения существенно различаются по ряду важных компонентов, то необходимо продолжить процесс оптимизации, переходя к его третьему этапу.

Третий этап процесса оптимизации предусматривает проведение дополнительных расчетов с использованием матрицы условия-решения по ИТ (см. табл. 10.1). Речь идет о заполнении клеток матрицы, оставшихся свободными после определения и занесения в матрицу условно-оптимальных решений. Конкретно эта операция сводится к определению величины приведенных затрат $З_i^j$ на реализацию решения X_i при появлении сочетаний исходных данных, иных, чем то M_j, для которого решение X_i найдено как оптимальное. Для данного решения X_i значения $З_i^j$ отличаются на величину $\Delta З_i^j$ от $\overline{З}_i^j$; величину $\Delta З_i^j$ можно интерпретировать как затраты на приспособление (адаптацию) данного решения к соответствующим условиям.

Для случая, когда неопределенными являются только экономические факторы, заполнение матрицы условия-решения несложно; оно сводится к расчету (не оптимизации) ИТ и определению $З_i^j$ при тех или иных сочетаниях исходных данных. Различия производственной мощности объекта по столбцам матрицы, т.е. для каждого отдельного сочетания исходных данных M_j, имеющие место для разных вариантов решений, компенсируются с помощью замыкающих затрат на топливо, электрическую и тепловую энергию. При наличии соответствующей расчетной математической модели заполнение в этих задачах матрицы условия-решения не вызывает особых затруднений.

Процесс заполнения клеток матрицы условия-решения более сложен, если неопределенными являются не только экономические, но и внешние технические влияющие факторы. Дело в том, что в рассматриваемом случае нет гарантии работоспособности варианта решения задачи X_i, найденного для условий M_j, при всех остальных условиях $M_1, \ldots, M_J$. Иными словами, возможно нарушение ограничений по параметрам и технологическим характеристикам ИТ (10.2)–(10.5) при значениях $M_1, \ldots, M_J$, отличных от M_j, для которого решена задача (10.1)–(10.5) и найдено оптимальное значение X_i.

Необходимо проверить техническую работоспособность ИТ при всех вариантах значений параметров X_i применительно ко всем сочетаниям исходных данных M_j. Для тех вариантов локально-оптимальных решений X_i, которые при некоторых сочетаниях исходной информации M_j не удовлетворяют требованию работоспособности ИТ, необходима корректировка решений X_i.

Корректировка локально-оптимальных решений X_i включает изменение физических и конструктивно-компоновочных параметров оборудования, вида технологической схемы и состава оборудования. За счет корректировки параметров X_i достигается приспособление (адаптация) ИТ к новым условиям функционирования. Определение состава компонентов совокупности параметров X_i, подлежащих корректировке, – трудноформализуемая операция. Поэтому необходим инженерный анализ применительно к каждому из рассматриваемых сочетаний M_j и к каждому из локально-оптимальных решений X_i. Весьма часто в совокупность параметров X_i приходится вводить новые параметры.

Реализация любого набора откорректированных параметров $X_i^{\text{к}}$ требует, как правило, дополнительных капитальных вложений или (и) приводит к увеличению текущих затрат по ИТ. Поэтому необходимо найти такой набор корректирующих параметров и такие их значения для каждого сочетания исходных данных M_j, при которых приращение затрат по ИТ было бы минимальным. Для решения этой задачи используются обычные методы поиска наилучшего решения для однозначно заданной информации:

найти

$$\min З_i^{j\text{к}}(X_i^{j\text{к}},\ Y_i^{j\text{к}},\ M_j) \tag{10.6}$$

при

$$\Phi_i^{j\text{к}}(X_i^{j\text{к}},\ Y_i^{j\text{к}}) = 0, \tag{10.7}$$

$$F_i^{j\text{к}*} \leqslant F_i^{j\text{к}}(X_i^{j\text{к}},\ Y_i^{j\text{к}},\ M_j) \leqslant F_i^{j\text{к}**}, \tag{10.8}$$

$$Y_i^{j\text{к}*} \leqslant Y_i^{j\text{к}}(X_i^{j\text{к}}) \leqslant Y_i^{j\text{к}**}, \tag{10.9}$$

$$X_i^{j\text{к}*} \leqslant X_i^{j\text{к}} \leqslant X_i^{j\text{к}**}. \tag{10.10}$$

В результате решения задачи (10.6)–(10.10) для каждого элемента матрицы условия-решения будет найдено оптимальное значение вектора $X_i^{j\text{к}}$, обеспечивающее работоспособность ИТ при сочетании условий M_j. Каждому решению $X_i^{j\text{к}}$ будет соответствовать свое минимальное значение затрат $З_i^{j\text{к}}$.

Статический характер задачи оптимизации ИТ в сочетании с большой длительностью периода эксплуатации ИТ обусловливает своеобразие процесса реализации откорректированных параметров $X_i^{j\text{к}}$. Опыт эксплуатации ИТ разных типов показывает, что возможности функционирующего ИТ адаптироваться к непредусмотренным проектом условиям весьма ограниченны. Это естественно, так как в отличие от развивающихся систем энергетики более высокого иерархического уровня ИТ не развивается; все элементы и технологические связи в нем однозначно заданы при его создании. Адаптация к новым условиям функционирующего ИТ сопряжена с заменой действующего или установкой дополнительного оборудо-

вания, изменением технологической схемы. Затраты на такую адаптацию во многих случаях оказываются столь большими, что от нее отказываются. Ситуация осложняется также тем обстоятельством, что необходимость адаптации ИТ к новым условиям, как правило, выявляется через достаточно длительный период времени (10–15 лет) после начала эксплуатации объекта.

Положение коренным образом меняется, если уже на стадиях разработки и проектирования ИТ заложить в него способность адаптироваться к возможным условиям на протяжении всего периода функционирования. Такую способность обеспечивают найденные оптимальные решения $X_i^{j\kappa}$. Откорректированную совокупность параметров $X_i^{j\kappa}$ делим на две группы параметров: $X_i^{j\kappa 1}$ и $X_i^{j\kappa 2}$. Параметры первой группы $X_i^{j\kappa 1}$ определяют решения по ИТ, в том числе и по обеспечению его адаптивности, реализуемые на стадии создания ИТ. Параметры $X_i^{j\kappa 2}$ определяют решение по адаптации ИТ к возможным в будущем изменениям условий, которые реализуются по мере необходимости в процессе его функционирования.

При заполнении матрицы условия-решения (табл. 10.2) естественно должны быть учтены обе группы параметров: $X_i^{j\kappa 1}$ и $X_i^{j\kappa 2}$. При этом если параметры второй группы $X_i^{j\kappa 2}$ индивидуальны для каждого элемента матрицы, то из параметров первой группы $X_i^{j\kappa 1}$ должен быть сформирован единый обобщенный для каждой строки набор параметров X_i^{κ}. Совокупность параметров X_i^{κ} определяет условно-оптимальное решение рассматриваемой задачи с учетом первого этапа адаптации.

Двухэтапный процесс адаптации более полно учитывает реальные условия создания и функционирования ИТ и позволяет:

выбрать на первом этапе решения с учетом того, что дальнейшие решения будут приниматься позднее на базе информации, полученной к тому времени;

Таблица 10.2. **Матрица условия-решения по ИТ (второй случай)**

Вариант решения задачи	Условия решения задачи					Средние затраты по варианту
	M_1	...	M_j	...	$M_{J'}$	
X_1^{κ}	$\bar{З}_1^1, \Delta З_1^{\kappa}$	...	$X_1^{j\kappa 2}, \bar{З}_1^j, \Delta З_1^{\kappa}, \Delta З_1^{j\kappa 2}$	...	$X_1^{J'\kappa 2}, \bar{З}_1^{J'}, \Delta З_1^{\kappa}, \Delta З_1^{J'\kappa 2}$	$З_1$
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
X_i^{κ}	$X_i^{1\kappa 2}, \bar{З}_i^1, \Delta З_i^{\kappa}, \Delta З_i^{1\kappa 2}$	...	$\bar{З}_i^j, \Delta З_i^{\kappa}$	...	$X_i^{J'\kappa 2}, \bar{З}_i^{J'}, \Delta З_i^{\kappa}, \Delta З_1^{J'\kappa 2}$	$З_i$
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
X_I^{κ}	$X_I^{1\kappa 2}, \bar{З}_I^1, \Delta З_I^{\kappa}, \Delta З_I^{1\kappa 2}$	...	$X_I^{j\kappa 2}, \bar{З}_I^j, \Delta З_I^{\kappa}, \Delta З_I^{j\kappa 2}$	...	$\bar{З}_I^{J'}, \Delta З_I^{\kappa}$	$З_I$

уточнить за время перехода от первого этапа ко второму реальность наступления и характеристики отдельных рассматриваемых условий;

обеспечить рациональное сочетание двух принципов принятия решения: принципа принятия заблаговременного решения, позволяющего достигнуть результата с меньшими затратами, и принципа откладывания решения до получения более полной информации.

Разница затрат по ИТ, найденных с учетом и без учета необходимости корректировки параметров объекта, определяет затраты на адаптацию к соответствующим условиям с целью обеспечения работоспособности ИТ. Затраты на адаптацию могут быть представлены в двух видах:

затраты на адаптацию по элементам матрицы условия-решения $\Delta З_i^{j\kappa}$, найденные как разница затрат по ИТ с учетом и без учета необходимости корректировки параметров X_i^j; эти затраты можно, в свою очередь, разделить на две части: $\Delta З_i^{j\kappa 1}$ – затраты, производимые на этапе создания ИТ для обеспечения его адаптивности, и $\Delta З_i^{j\kappa 2}$ – затраты, производимые в будущем для адаптации к изменившимся условиям;

затраты на адаптацию по строке матрицы условия-решения $\Delta З_i^{\kappa}$, т.е. учитывающие необходимость однозначной реализации откорректированных параметров X_i^{κ} на первом этапе адаптации, и по элементам матрицы $\Delta З_i^{j\kappa 2}$, т.е. учитывающие необходимость возможной реализации откорректированных параметров $X_i^{j\kappa 2}$ на втором этапе адаптации.

Изложенный подход к решению задачи оптимизации ИТ позволяет вернуться к этапу выбора состава рассматриваемых сочетаний исходной информации M_j и дать этому этапу экономическое обоснование. Как следует из приведенного, за возможность приспособления к новым условиям приходится платить уже на стадии создания ИТ независимо от того, наступят ли новые условия или нет, будут ли использованы заложенные в ИТ возможности к адаптации или нет. Очевидно, что в число рассматриваемых должны быть прежде всего включены те сочетания условий, вероятность наступления которых достаточно велика. Однако для всех сочетаний условий, т.е. как маловероятных, так и с большой вероятностью наступления, нужно сопоставить затраты на адаптацию ИТ $\Delta З_i^{j\kappa}$ к этим условиям и возможный ущерб $\Delta З_i^{jy}$ по ИТ или по соответствующей иерархически вышестоящей энергетической системе при отказе от адаптации ИТ к этим условиям. Величина ущерба $\Delta З_i^{jy}$ должна оцениваться с учетом вероятности наступления соответствующих условий.

Целесообразность включения сочетания условий M_j для рассмотрения в матрицу условия-решения определяется соотношением

$$\Delta З_i^{j\kappa} < \Delta З_i^{jy}. \qquad (10.11)$$

Сочетания условий M_j, не удовлетворяющие неравенству (10.11), должны быть исключены из рассмотрения (см. рис. 10.1). В их числе могут быть не только маловероятные сочетания условий. Если неравенству (10.11) не удовлетворяет сочетание условий M_j с большой вероятностью их наступления, то это означает, что сделана не оправдавшая себя попытка найти единое решение, удовлетворяющее существенно различающимся условиям. При таком результате нужно рассмотреть целесообразность разработки двух различных по параметрам и характеристикам ИТ.

В результате заполнения матрицы условия-решения для второго случая получаем (см. табл. 10.2):

совокупность откорректированных оптимальных значений параметров ИТ $X_i^{к}$ для каждой строки матрицы;

уточненную совокупность условий решения задачи $M_1, \ldots, M_{J'}$;

совокупность оптимальных значений параметров ИТ $X_i^{j к 2}$ для каждого элемента матрицы, определяющих направления адаптации объекта в период функционирования;

две пары составляющих затрат на адаптацию $\Delta З_i^{j к 1}$ и $\Delta З_i^{j к 2}$ или $\Delta З_i^{к}$ и $\Delta З_i^{j к 2}$.

Важно подчеркнуть, что благодаря корректировке параметров для каждого из вариантов решений обеспечена работоспособность при каждом сочетании рассматриваемых условий создания и функционирования ИТ. При этом матрица условия-решения приобретает определенное экономическое содержание, характеризуя по каждому оцениваемому варианту решения затраты как на его реализацию, так и на приспособление к рассматриваемым условиям.

Для сравнения и выбора решений с помощью матрицы условия-решения в литературе предлагаются разные критерии. Для рассматриваемого класса относительно частных и вместе с тем массовых задач в качестве основного рекомендуется критерий минимума средних затрат, обеспечивающий примерную взаимную компенсацию (в массе решаемых задач) реализации благоприятных и неблагоприятных условий. При этом решение по минимуму средних затрат совпадает с решением по минимуму риска от незнания будущих условий создания и функционирования ИТ. Значения средних затрат по вариантам решения (по строкам матрицы) приведены в крайнем правом столбце матрицы условия-решения (табл. 10.1 и 10.2).

Критерий минимума средних затрат может применяться в двух модификациях. Если появление рассматриваемых условий равновероятно, то применяется критерий минимума среднеарифметических затрат (по строке матрицы условия-решения)

$$\min_i З_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^{J} З_i^j. \qquad (10.12)$$

Если вероятность появления рассматриваемых условий существенно различна и этому может быть дана обоснованная количественная оценка путем приписания каждому сочетанию условий M_j вероятности p_j, то критерий минимума средних затрат приобретает вид

$$\min_i З_i = \sum_{j=1}^{J} p_j З_i^j, \qquad (10.13)$$

причем $0 < p_j < 1$ и $\sum_{j=1}^{J'} p_j = 1$.

При использовании второго подхода возникают трудности в оценке значений p_j. Обычно для этого используются экспертные (субъективные) оценки. Однако экспертным путем трудно получить однозначные величины p_j. С большей уверенностью эксперты дают интервальную оценку значения p_j или называют несколько возможных значений p_j. Поэтому при

исследовании крупных ИТ целесообразно рассмотреть не один, а несколько наборов значений p_j. В этом случае процесс подготовки информации об условиях создания и функционирования ИТ должен включать: а) выбор нескольких возможных значений p_j для каждого из рассматриваемых M_j; б) формирование нескольких представительных наборов значений p_j для всех рассматриваемых сочетаний условий M_J; при этом для каждого набора должны соблюдаться условия $0 < p_j < 1$ и $\sum_{j=1}^{J} p_j = 1$.

При использовании данного подхода состав и содержание элементов левой части матрицы условия-решения остаются неизменными. Меняется только правая часть матрицы: вместо одного столбца средних затрат по варианту будет несколько столбцов (по числу принятых наборов значений p_j). Каждый из них заполняется согласно выражению (10.13) и соответствует одному из принятых наборов значений p_j.

В результате дополнительного анализа зоны неопределенности оптимальных решений и выявления наилучших решений, отбираемых по критерию средних затрат, можно в частном случае найти единственное рекомендуемое решение либо в более общем случае значительно уменьшить размеры зоны. Входящие в оставшуюся зону неопределенности совокупности параметров следует рассматривать как имеющие равную экономичность, так как существующие формальные методы и приемы не позволяют осуществить их дальнейшую дифференциацию. Выбор окончательного решения из числа равноэкономичных требует привлечения дополнительных критериев оптимизации – технического совершенства решения, надежности работы, минимума затрат живого труда, социальных факторов и т.д.

Определенными возможностями дальнейшего сопоставления равноэкономичных вариантов обладает часто используемый прием [9, 20, 25], суть которого состоит в следующем. Пусть некое одно условие (или несколько условий) неопределенно настолько, что если оно примет значение M_1, то оптимально решение X_1 с приведенными затратами $З_1$; если же условие примет значение M_2, то оптимально решение X_2 с затратами $З_2$. Требуется определить предпочтительное решение (X_1 или X_2) при равной вероятности появления условий M_1 и M_2. Решение задачи включает: а) определение дополнительных затрат $\Delta З_1$, которые необходимы в том случае, если принято решение X_1 для условий M_1, а реально ИТ с параметрами X_1 будет функционировать в условиях M_2; б) рассматривается обратный случай – определяются дополнительные затраты $\Delta З_2$, которые необходимы, если принято решение X_2 применительно к условиям M_2, а реальны будут условия M_1. Если величина $\Delta З_2 > \Delta З_1$, то целесообразно принять решение X_1, и, наоборот, при $\Delta З_2 < \Delta З_1$ – решение X_2.

Анализ решения ряда задач оптимизации ИТ разных типов выявил закономерность: оптимальные решения, найденные в условиях неопределенности исходных данных применительно к неблагоприятному их сочетанию, обладают большей стабильностью и дают существенно меньший перерасход затрат при их реализации в условиях благоприятного сочетания исходных данных, чем решения найденные при благоприятных сочетаниях данных, но поставленные в условиях неблагоприятного сочетания исходных данных [20, 25].

10.3. Оптимизация развития систем теплоснабжения

Динамический характер задачи оптимизации развития СЦТ предопределяет необходимость получения решения, взаимоувязанного по всем интервалам рассматриваемого расчетного периода. Основной конечной целью решения оптимизационных динамических задач является нахождение наилучшей последовательности ввода в эксплуатацию и вывода из нее основных объектов рассматриваемой системы. Эта весьма сложная задача нелинейного программирования с дискретными переменными (см. гл. 8) еще больше усложняется при ее решении в условиях неполноты информации.

Большое значение для повышения достоверности исходной информации имеет использование принципа обоснования и принятия решений с минимально допустимой заблаговременностью. Этот принцип вытекает из свойства информации постепенно уточняться по мере приближения конкретного календарного срока, к которому она относится. Поэтому в случаях, когда имеется неопределенность выбора, окончательное решение следует принимать возможно позже, непосредственно перед началом его реализации. При этом будет использоваться каждый раз наиболее достоверная информация, имеющая минимально возможную неопределенность.

Практическое осуществление принципа минимальной заблаговременности требует соответствующей организации управления принятием решения. Так, при разработке и проектировании непрерывно развивающихся систем окончательное решение должно приниматься только по первоочередным объектам или для ближайшего интервала времени. По следующим объектам или интервалам времени окончательные решения следует принимать позднее, когда лучше прояснится реальная обстановка. При этом проектирование СЦТ будет представлять собой непрерывный процесс последовательного обоснования назревших первоочередных решений. Кроме того, целесообразно разбивать принятие решений на этапы. Например, раздельно принимать решения о начале проектирования и о начале строительства объектов с параллельным проектированием нескольких конкурирующих объектов. При этом, с одной стороны, в процессе проектирования уточнятся технико-экономические показатели объектов, с другой стороны, за время, необходимое для проектирования, прояснятся внешние условия, что уменьшит неопределенность информации при принятии окончательного решения о строительстве объекта.

Осуществление непрерывного проектирования развивающихся систем требует четкого определения последовательности (очередности) принятия и взаимной увязки отдельных решений по развитию их объектов. Надлежащий учет неопределенности информации приводит к тому, что единая задача оптимизации развития СЦТ распадается на ряд задач (подзадач) обоснования отдельных решений, принимаемых в определенной последовательности и с соответствующей заблаговременностью. Каждая такая задача должна быть четко поставлена и увязана с другими задачами по времени (последовательности) решения и по составу обменной информации. В том числе должны быть уяснены связи рассматриваемой задачи с задачами развития систем более высокого иерархического уровня [9, 27, 91].

Как было отмечено в разд. 10.1, в настоящее время для решения динамических оптимизационных задач в условиях неполноты информации наиболее эффективен метод, базирующийся на использовании матрицы условия-решения. Общая последовательность этапов построения и анализа матрицы условия-решения для поиска оптимальных решений в динамических оптимизационных задачах та же, что и для статических задач, рассмотренных в разд. 10.2. Однако в реализации этих этапов имеются и существенные различия.

На первом этапе определяется состав неоднозначных исходных данных по СЦТ, которые создают неопределенность ситуации, и производится выбор ограниченного количества представительных сочетаний этих данных, т.е. формируется множество M_J. Общим критерием для отбора существенных показателей исходных данных, включаемых в множество M_J, служит тот факт, что при изменении значения показателя (в диапазоне его неопределенности) изменяется оптимальный вариант решения. Например, выбор того или иного объекта СЦТ в качестве первоочередного для строительства очень часто зависит от того, принимаются ли его экономические показатели (удельные капиталовложения или приведенные затраты) на верхней или на нижней границе диапазона возможных значений. Здесь же делаются экспертные оценки вероятностей принимаемых для расчета значений исходных данных и их сочетаний.

Второй этап включает выбор оптимальных решений для каждого из отобранных сочетаний исходных данных и анализ этих решений. Здесь очень важно четко определить смысл обосновываемого решения и состав характеризующих его параметров. Постановка оптимизационных динамических задач предполагает, что рассматривается длительный расчетный период, разбиваемый на несколько интервалов времени. В таких задачах, как правило, нужно различать первоочередные решения, для обоснования которых и ставится задача, и последующие решения, которые рассматриваются для определения последствий от первоочередных решений. Эти последующие решения могут быть различными для разных вариантов первоочередных решений и для разных условий развития систем. Параметры, характеризующие обосновываемые первоочередные решения, обозначим через X_{I}, а параметры, связанные с решениями на последующих интервалах времени, – через $X_{\text{П}} = (X_{\text{II}}, ..., X_k, ..., X_K)$, где K – число интервалов времени, на которое разбит расчетный период.

Возможная схема принятия своевременных решений для развивающейся системы при разных условиях этого развития показана на рис. 10.2. Допустим, что календарно мы находимся в точке τ_0, когда следует принять решения X_{I} и X_{II} о развитии системы. Интервал $\tau_0 - \tau_1$ – это интервал ближайших лет, для которого в силу ранее принятых решений (X_0) и инерционности системы ее развитие в основном предопределено достаточно однозначно. Требуется принять решение о развитии системы на интервалах $\tau_1 - \tau_2$ и $\tau_2 - \tau_3$, когда эти решения уже могут активно воздействовать на ее развитие. Решения X_{I}, принимаемые для интервала $\tau_1 - \tau_2$, являются первоочередными. Применительно к моменту времени τ_0 информация на интервале $\tau_1 - \tau_2$ является существенно неопределенной; ее анализ позволил сформировать три представительных сочетания условий M_j и определить три возможных варианта развития системы по отрезкам ab, ac и ad.

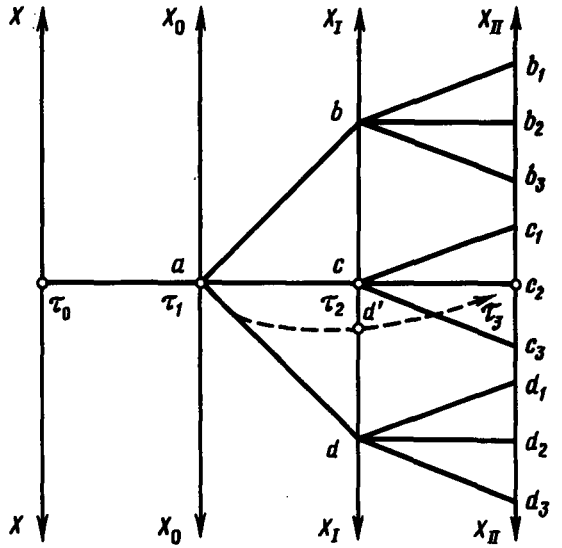


Рис. 10.2. Схема принятия решений по развивающейся СЦТ
τ – календарные периоды времени; X – возможные варианты решений применительно к разным условиям M развития системы

На интервале $\tau_2 - \tau_3$ применительно к точкам b, c, d, характеризующим возможные конечные состояния развития системы на интервале $\tau_1 - \tau_2$, для неопределенной информации сформированы по три сочетания условий M_j и определены девять возможных вариантов развития системы: по отрезкам bb_1, bb_2, bb_3, cc_1, cc_2, cc_3, dd_1, dd_2 и dd_3. Допустим, что для заданных условий на интервалах $\tau_1 - \tau_2$ и $\tau_2 - \tau_3$ наилучшим оказалось решение о развитии системы по отрезкам add_2. Причем отрезок ad определяет первоочередные решения X_{I}, а решения X_{II} на отрезке dd_2 нужны для обоснования правильности решений на отрезке ad.

Аналогично изложенному в разд. 10.2 процесс поиска оптимального значения параметров X_{I} зависит от состава неопределенной исходной информации, вошедшей в вектор M_j. Здесь также можно выделить два характерных случая: а) в состав информации входят экономические показатели и показатели энергетической эффективности элементов СЦТ, изменение которых не отражается на соблюдении балансовых условий; б) неопределенными являются как экономические показатели, так и разного рода внешние технические факторы и расходные характеристики. Например, неопределенной является величина тепловой нагрузки СЦТ на конец интервала и т.п. Ниже рассматривается более общий случай, когда при некоторых сочетаниях информации (из M_J) для рассматриваемого варианта решения X_{1l} не соблюдается часть технических ограничений или балансовых условий.

Каждому варианту условий M_j соответствует условно-оптимальное решение X_{1l} по СЦТ, определяемое из задачи нелинейного дискретного программирования:

найти

$$\min З_i^j = \sum_{\tau=1}^{\tau_к} З_{i\tau}^j(X_{1i}, \ldots, X_{кi}, M_j) \qquad (10.14)$$

при

$$Q_\Sigma^\tau(X_{1i}, \ldots, X_{кi}, M_j) \geqslant Q_{j\,max}^\tau, \qquad (10.15)$$

$$W^\tau(X_{1i}, \ldots, X_{кi}, M_j) = W_j^\tau, \qquad (10.16)$$

где $З_{i\tau}^j$ – приведенные затраты по СЦТ за интервал τ для решения $(X_{1i}, \ldots, X_{кi})$ и условий M_j; Q_Σ^τ – суммарная мощность источников теплоты в интервале τ для i-го решения; $Q_{j\,max}^\tau$ – суммарная расчетная часовая тепловая нагрузка СЦТ в интервале τ для условий M_j; W^τ – количество теплоты, отпускаемой за интервал τ при i-м решении; W_j^τ – необходимое для интервала τ при условиях M_j количество теплоты.

Метод решения задачи (10.14)–(10.16) изложен в гл. 8. Полученные условно-оптимальные решения заносятся в левый столбец матрицы условия-решения (табл. 10.3). Хотя непосредственный интерес представляют решения для первого интервала времени, т.е. X_{1i}, для общности картины в матрицу внесены решения $X_{1i}, \ldots, X_{кi}$ для всех интервалов рассматриваемого периода. Минимальные значения приведенных затрат ($\overline{З}_i^j$), соответствующие найденным условно-оптимальным решениям, располагаются по главной диагонали матрицы. Кроме условно-оптимальных решений, в матрицу могут быть включены для рассмотрения некоторые дополнительные варианты решений, определяемые интуитивным путем разработчиком СЦТ.

Далее проводится анализ результатов с целью определения степени близости значений параметров $X_{11}, \ldots, X_{1i}, \ldots, X_{1I}$ для рассмотренных условий

Таблица 10.3. **Матрица условия-решения по СЦТ**

Вариант решения задачи	Условия решения задачи				
	M_1	...	M_j	...	M_J
$X_{11}, \ldots, X_{к1}$	$\overline{З}_1^1$	...		...	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$X_{1i}, \ldots, X_{кi}$		...	$\overline{З}_i^j$	...	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$X_{1I}, \ldots, X_{кI}$		...		...	$\overline{З}_I^J$

$M_1, \ldots, M_J$. Сопоставление по приведенным затратам $\bar{З}_i^j$ здесь неправомочно, так как найденные решения получены при различных внешних условиях (например, разных годовых темпах роста нагрузки) и не могут быть приведены предварительно к тождественному энергетическому эффекту. Критерием близости полученных решений является степень совпадения последовательности вводов отдельных объектов СЦТ в эксплуатацию. При этом выделяются: а) основные существующие и новые объекты, вошедшие во все полученные решения для интервала $\tau_1 - \tau_2$ и с одинаковой производительностью; б) то же, но с разной производительностью; в) существующие и новые объекты, вошедшие только в часть решений; г) новые объекты, не попавшие ни в одно решение.

Существующие и новые объекты, вошедшие (с равной или разной производительностью) во все решения, могут быть признаны абсолютно экономичными. Объекты, попавшие только в часть решений, являются "сомнительными". По таким объектам необходим специальный анализ, уточняющий: а) исходную информацию, дополнительно конкретизирующую относительную экономичность "спорных" объектов; б) условия, позволяющие производить дополнительную независимую и более детальную оптимизацию таких объектов и др.

Иногда таким качественным анализом полученных результатов можно найти решения, которые позволяют считать данную оптимизационную задачу исчерпанной. Но в ряде случаев расхождение результатов расчетов оказывается столь существенным, что требует дополнительных расчетов. Точность этих расчетов можно существенно увеличить, если исключить из них объекты, вошедшие во все локально-оптимальные решения.

Дополнительные исследования зоны неопределенности решений включают заполнение матрицы условия-решения. Эта матрица дает возможность анализировать изменение денежных затрат при принятии данного решения, если условия развития СЦТ изменились в сравнении с теми, для которых принято данное решение. В заполненном виде матрица условия-решения приведена в табл. 10.4. Между табл. 10.3 и 10.4 может быть разница. При построении табл. 10.4 в отличие от табл. 10.3 предполагается существование реальной возможности перехода СЦТ от одного рассматриваемого условия к другому. В общем случае не для всех сочетаний решений X_{Ii} и условий M_j такое предположение справедливо.

Процесс заполнения матрицы условия-решения (табл. 10.4) не прост, так как необходимо не только оценить новое значение величины приведенных затрат для каждого элемента матрицы, но и обеспечить соблюдение всех ограничений и балансовых соотношений за счет выбора в дополнение к основным решениям корректирующих мероприятий. Здесь под основными решениями – мерами по развитию СЦТ – понимаются те, которые заранее определены из нормальных оптимальных решений. Применительно к схеме принятия решений, приведенной на рис. 10.2, для момента времени τ_0 к основным решениям относятся решения X_{I} и X_{II}, принимаемые с достаточной заблаговременностью. Если задача оптимизации развития системы решается в момент времени τ_1, то основным является только решение X_{II}. Под корректирующими мероприятиями понимаются те, которые заранее не определялись; они должны осуществляться в связи с появлением новых, ранее неизвестных условий развития системы,

Таблица 10.4. **Матрица условия-решения по СЦТ**

Вариант решения задачи	Условия решения задачи					Средние затраты по варианту
	M_1	...	Mj	...	MJ	
$X_{11}, \ldots, X_{к1}$	$\bar{З}_1^1$	...	$З_1^{jк}$ Z_1^j	...	$З_1^{Jк}$ Z_1^J	$З_1^к$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$X_{1i}, \ldots, X_{кi}$	$З_i^{1к}$ Z_i^1	...	$\bar{З}_i^j$	...	$З_i^{Jк}$ Z_i^J	$З_i^к$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$X_{1I}, \ldots, X_{кI}$	$З_I^{1к}$ Z_I^1	...	$З_I^{jк}$ Z_I^j	...	$\bar{З}_I^J$	$З_I^к$

требующих быстрой реакции, чтобы не нарушить нормального функционирования СЦТ. Естественно, что при прочих равных условиях корректирующие мероприятия относительно менее экономичны в сравнении с основными.

Рассмотрим процесс воздействия корректирующих мероприятий применительно к построениям рис. 10.2. Выше было определено, что применительно к моменту времени τ_0 наилучшим решением на втором и третьем интервалах является решение о развитии системы по отрезкам add_2. Однако в течение интервала $\tau_0 - \tau_1$ выяснилось, что условия развития системы (например, рост ее нагрузки) изменяются; соответственно чтобы обеспечить бесперебойность теплоснабжения, необходимо провести некие мероприятия, например корректировку (в сторону ускорения) ввода мощности в пиковой котельной. В результате корректирующих воздействий к моменту наступления времени τ_2 СЦТ будет находиться в состоянии, характеризуемом не точкой d, а точкой d' (приближенной к точке c, оптимальной для изменившихся условий развития).

Применительно к третьему интервалу разработчик, находящийся в интервале $\tau_0 - \tau_1$, для исправления направления развития СЦТ может не только применять корректирующие мероприятия, но главным образом менять основные решения. В результате этих действий система по линии $d'c'$ выйдет к оптимальной точке c_2. Однако на этом процесс оптимизации развития СЦТ не заканчивается. В самом деле, по истечении первого интервала времени, т.е. при функционировании СЦТ в интервале $\tau_1 - \tau_2$, произойдет дальнейшее уточнение исходной информации о развитии систе-

мы. Соответственно необходимо второй раз уточнить направление развития СЦТ на третьем интервале, но на этот раз в основном за счет корректирующих мероприятий.

Таким образом, процесс принятия решения о развитии СЦТ следует рассматривать как периодический процесс принятия основных решений (последовательно в точках τ_0, τ_1, τ_2 и т.д.); между этими периодами часто требуется осуществлять корректирующие мероприятия, которые призваны реагировать на относительно частные изменения условий развития системы. Разумное сочетание корректирующих мероприятий применительно к ближайшему интервалу и возможностей пересмотра основных решений на последующих интервалах позволяет обеспечить достаточную гибкость развития СЦТ в условиях неопределенности информации.

Если конкретизировать указанные выводы применительно к практике разработки и проектирования СЦТ на 15-летний период, т.е. для трех последующих пятилеток, то получим следующее: развитие системы на первую пятилетку в силу ранее принятых решений и инерционности СЦТ считается в основном заданным однозначно и может лишь частично изменяться адаптивными корректирующими мероприятиями и путем корректирования затрат и сроков ввода "переходящих объектов". Для второго пятилетия развитие СЦТ можно изменять, также преимущественно изменяя сроки и объемы ввода "переходящих объектов" корректирующими мероприятиями и лишь частично основными. Для третьего пятилетия можно принимать полноценные основные оптимизационные решения, естественно, в условиях частичной неопределенности. Как видно, учет фактора времени может существенно повлиять на процедуру и результаты заполнения матрицы условия-решения (см. табл. 10.4).

Наиболее часто причинами появления корректирующих мероприятий в СЦТ являются заранее неизвестные переходы к условиям с пониженными, одинаковыми или повышенными уровнями потребления тепловой энергии. В первом случае корректирующие мероприятия определяются наиболее просто – они сводятся в основном или к отказу от ввода соответствующего ИТ или участка тепловой сети, или к фиксации появления дополнительных резервов в системе. Изменение условий развития СЦТ при той же производимой тепловой энергии обычно требует перераспределения материальных и денежных средств внутри системы (например, на получение одного оборудования при отказе от другого). Наиболее сложно реагировать на изменения условий развития СЦТ, которые связаны с ранее неизвестным дополнительным ростом потребностей в тепловой энергии. В таких случаях источником корректирующих мероприятий могут быть только быстро реализуемые резервы производственных мощностей в пределах данной системы или дополнительный ввод даже менее экономичных ИТ.

Расчеты затрат по развитию СЦТ с учетом корректирующих мероприятий, вносимых в матрицу условия-решения (см. табл. 10.4), носят своеобразный оценочно-оптимизационный характер. Для рассматриваемого набора условий M_1, ..., M_J все параметры (если нет нарушения ограничений) или их значительная часть (если имеет место нарушение ограничений при каких-то M_j) для каждого основного решения X_{1l}, ..., X_{kl} по СЦТ остаются неизменными. Элементы оптимизации встречаются лишь при вы-

боре корректирующих мероприятий, характеризующихся вектором Z_i^j. Соответственно задачу оптимизации корректирующих мероприятий и вектора Z_i^j можно записать следующим образом:

найти

$$\min З_i^{j\kappa} = \sum_{\tau=1}^{\tau_\kappa} З_{i\tau}^{j\kappa}(X_{1i}, ..., X_{\kappa i}, Z_i^j, M_j) \qquad (10.17)$$

при

$$Q_\Sigma^\tau(X_{1i}, ..., X_{\kappa i}, Z_i^j, M_j) \geqslant Q_{j\,\max}^\tau, \qquad (10.18)$$

$$W^\tau(X_{1i}, ..., X_{\kappa i}, Z_i^j, M_j) = W_j^\tau. \qquad (10.19)$$

Данная задача аналогична ранее сформулированной задаче (10.14)–(10.16). Для несложных СЦТ совокупность корректирующих мероприятий, вектор Z и значения приведенных затрат могут быть определены на основе инженерной интуиции и простых расчетов. В более сложных случаях для решения задачи применим метод, изложенный в гл. 8.

Отметим одну принципиальную особенность матрицы условия-решения (табл. 10.4). В этой матрице к тождественности энергетического эффекта приведены лишь решения, записанные в столбцах матрицы (они получены для одинаковых условий развития СЦТ). Приведенные затраты, найденные при данном решении $X_i = \{X_{1i}, ..., X_{\kappa i}\}$, но при разных условиях M_j, т.е. по строкам матрицы, к такому тождеству энергетического эффекта не приведены. Таким образом, решение оптимизационных задач при неполной информации во многом изменяет подход к одному из основных требований оптимизационных детерминированных расчетов – предварительному приведению сравниваемых вариантов к тождественному энергетическому эффекту.

Для выбора по матрице условия-решения (см. табл. 10.4) лучшего решения по развитию СЦТ в настоящее время рекомендуется использовать критерий минимума средних затрат (по строкам матрицы). При этом решение по минимуму средних затрат совпадает с решением по минимуму среднего риска от незнания будущих условий развития системы. Минимум средних приведенных затрат находится по выражению (10.12) или (10.13) в зависимости от возможности количественной оценки вероятности появления условий M_j.

Если величины средних затрат по некоторым строкам матрицы близки или даже совпадают, то решения, соответствующие этим строкам, следует рассматривать как равноэкономичные, практически неразличимые по приведенным затратам. Окончательный выбор решения из числа равноэкономичных должны делать специалисты по СЦТ с учетом преимуществ равноэкономичных вариантов по условиям гибкости, надежности, минимума затрат живого труда, экологических преимуществ и др.

10.4. Методы многокритериальной оптимизации

До сих пор, говоря о неполноте информации, имели в виду в основном исходные данные, необходимые для решения задачи оптимизации СЦТ и ее элементов. В действительности понятие информации значительно шире, оно включает характеристику уровня наших знаний о целях и критериях оптимизации СЦТ. В гл. 2 при рассмотрении основ системных исследований в числе важнейших свойств систем энергетики было названо свойство многокритериальности. В данном разделе в сжатом виде рассматриваются понятия целей при управлении СЦТ, а также подходы к выбору критериев принятия решений о развитии этих систем [9, 20, 21, 27].

Понятие цели можно определить как предвосхищение в сознании человека (трудового коллектива), управляющего данной системой, результата, на достижение которого им направляется развитие (функционирование) данной системы. Как показано в гл. 2, для систем энергетики характерно иерархическое строение. Задачи, решаемые при развитии этих систем, и цели их развития также имеют иерархическое строение. Поэтому в дополнение к иерархии систем энергетики, иерархии решаемых задач, иерархии математических моделей нужно иметь согласованную иерархию целей развития систем.

Из желания иметь четко сформулированную цель развития системы, большей ее конкретизации вытекает стремление к количественной оценке цели. Однако это не всегда выполнимо. Во многих случаях количественная оценка цели сопровождается рядом качественных ограничений. Ряд же обобщенных выражений цели, таких, как "ускорение научно-технического прогресса в системах теплоснабжения", едва ли можно четко количественно соизмерить или задавать в виде однозначно количественно выраженной цели. Таким образом, при управлении развитием СЦТ во многих реальных случаях количественное задание цели – дело далеко не простое, а главное, не формализуемое.

На самом верхнем государственном уровне формируются социально-экономические цели народнохозяйственного развития, которые, как правило, не могут быть выражены неким однозначным числом. Но обычно существует главная цель развития; для социалистических стран – это постоянное повышение благосостояния и духовного уровня народа и ряд других целей, не противоречащих главной цели, которые необходимо обеспечить для ее реализации. Все эти цели конкретизируются на следующем иерархическом уровне в виде государственных планов развития народного хозяйства, предусматривающих и выбор основных народнохозяйственных пропорций. Тогда на следующем, более низком иерархическом уровне возникает серия оптимизационных задач, требующих наилучшего решения с точки зрения народного хозяйства. Применительно к энергетике главная цель таких задач – найти в пределах энергетики наиболее эффективные методы производства, распределения и использования различных видов энергии и энергетических ресурсов для надежного и высококачественного обеспечения заданных (в определенных диапазонах) потребностей народного хозяйства в конечных видах энергии с учетом ряда ограничений, например экологических.

Подобная ограничительная постановка цели оптимизационных задач,

а поэтому и выбора критериев принятия решений для достижения такой цели характерна для социалистического хозяйства, где подобные расчеты имеют решающее значение на относительно низких иерархических уровнях управления.

В качестве основного критерия оптимизации функционирования и развития СЦТ следует принимать бесперебойное обеспечение заданных потребителей тепловой энергией с наименьшими затратами живого и овеществленного труда. Мерой таких затрат приняты денежные единицы. Поэтому основным критерием для массовых задач оптимизации СЦТ и их элементов можно считать минимум приведенных затрат, т.е. затрат, соизмеряющих с учетом фактора времени единовременные (капиталовложения) и ежегодные расходы.

В то же время существует ряд задач, для которых далеко не всегда применим критерий минимума приведенных затрат. В их числе, например, задача энергетического обеспечения бытовых нужд населения, где, с одной стороны, самое примитивное решение может быть и самым дешевым, а с другой стороны – за лучшие комфортные условия потребитель часто согласен платить больше. Второй пример – оздоровление биосферы, где необходимость дополнительных денежных затрат определяется требованием соблюдения санитарных норм, которые выступают как обязательные ограничения. Однако и в этих задачах часто важно найти решение по достижению таких норм, наиболее приемлемых и в техническом, и в экономическом отношении.

Приведенные соображения строго справедливы для задач в детерминированной постановке. При учете неопределенности используемой информации вопрос о выборе критерия принятия решения значительно усложняется. В этом случае наряду с экономическим следует применять и другие критерии выбора оптимальных решений. Главная причина, почему при выборе оптимальных решений по СЦТ критерий минимума приведенных затрат не может быть единственным, заключается в существенной экономической стабильности решений. Иными словами, часто существенно технически разные перспективные структуры систем оказываются малоразличимыми по требуемой величине денежных затрат. В разд. 10.2 и 10.3 показано, что итогом оптимизации СЦТ и ИТ являются равноэкономичные варианты, рассматриваемые как неразличимые по приведенным затратам. Именно поэтому следует вводить дополнительно совокупность других критериев.

В качестве других (неэкономических) критериев могут выступать: технологические – надежность теплоснабжения, управляемость системы и т.п.; социальные – уровень удобств для населения, условия работы обслуживающего персонала и др.; экологические – степень загрязнения атмосферы, земли и водных бассейнов; безопасность для жизни и здоровья людей и некоторые другие.

Для различных задач состав этих критериев может различаться, причем в зависимости от своей значимости отдельные критерии могут выступать при решении задачи либо как критерии оптимальности (наряду с приведенными затратами), либо как ограничения, либо просто как показатели, дополнительно принимаемые во внимание. Неэкономические критерии очень часто находятся в противоречии с экономическими – обеспечение

допустимых уровней неэкономических критериев требует дополнительных экономических затрат. В общем случае при оптимизации СЦТ и их элементов по нескольким критериям могут быть найдены варианты лучшие по одним критериям, но худшие по другим критериям, что приводит к появлению несравнимых вариантов. Специфика задач многокритериальной оптимизации состоит в умении выделять лучшие из множества вариантов несравнимых решений.

К настоящему времени предложен ряд подходов к решению оптимизационных задач в многокритериальной постановке [90, 92, 93]. Имеются различные принципы их классификации. Примем весьма конструктивную классификацию, основанную на учете характера имеющейся информации о соотношениях между критериями оценки решения. Предполагается, что число несравнимых вариантов оптимальных решений в существенной степени зависит от того, какой принцип оптимальности использован при решении задач многокритериальной оптимизации. Применение же того или иного принципа оптимальности прежде всего определяется характером имеющейся информации о соотношениях между критериями оценки решений.

Случай полного отсутствия информации о важности критериев приводит к использованию принципа оптимальности Парето и выделению множества Парето. Но поскольку число парето-оптимальных вариантов может оказаться значительным, то для их сокращения требуется перейти к следующему этапу, суть которого, несмотря на различия в способах реализации, сводится к получению дополнительной информации о связях между критериями и их оценками. При достаточном количестве информации можно установить связи между всеми критериями и свернуть их в один обобщенный критерий. В этом случае многокритериальная задача сводится к однокритериальной.

Промежуточные принципы оптимальности (между Парето и единым обобщенным критерием) соответствуют случаям, использующим дополнительную по сравнению с принципом Парето информацию о связях между критериями, но в меньшем объеме, чем требуется для построения одного обобщенного критерия. За счет этой дополнительной информации сужается множество несравнимых оптимальных решений. Получение дополнительной информации о связях между критериями обычно является сложной, дорогостоящей и трудноформализуемой задачей. При этом далеко не всегда бывает ясно, насколько наличие той или иной дополнительной информации сократит число несравнимых оптимальных вариантов.

Наибольшее распространение среди промежуточных принципов оптимальности, основанных на использовании дополнительной информации, получили подходы для следующих случаев: с равноценными однородными критериями, с упорядоченными по важности критериями, с доминирующим критерием. Доказательство наличия одного из этих случаев позволяет сократить число несравнимых оптимальных вариантов, но не исключает их полностью.

В соответствии с изложенной классификацией подходов к решению многокритериальных задач рассмотрим некоторые из них, нашедшие практическое применение.

Классической моделью многокритериальной оптимизации является

оптимизация по Парето. В ее основе лежат предположения: один вариант лучше другого, если по всем критериям он не хуже, а (хотя бы по одному) лучше, и оптимальным считается тот вариант, для которого не существует более предпочтительного. Нахождение множества Парето позволяет сократить множество исходных вариантов, т.е. исключить из неформального анализа те варианты решений, которые заведомо будут плохими.

Проиллюстрируем прием выделения множества решений по Парето на примере задачи с двумя критериями: Н – показатель надежности СЦТ

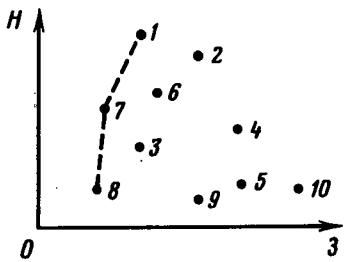


Рис. 10.3. Выделение множества Парето

и З – приведенные затраты по СЦТ. Очевидно, что требуется максимизация критерия Н и минимизация критерия З. В результате решения задачи оптимизации СЦТ найдено n возможных решений $X_1, X_2, \ldots, X_n$. Каждому решению соответствуют определенные значения показателей Н и З. Будем изображать решение точкой на плоскости с координатами Н и З и занумеруем точки соответственно номеру решения (рис. 10.3).

Очевидно, что из всего множества решений X (в данном примере $n = 10$) эффективными будут только решения X_1, X_7, X_8, лежащие на левой верхней границе области возможных решений. На рис. 10.3 эта граница изображена пунктирной линией. Для всякого другого решения существует хотя бы одно более эффективное решение, для которого либо Н, либо З, либо Н и З лучше, чем для данного. Аналогично строится множество эффективных решений и в случае, когда критериев эффективности не два, а больше.

Как видно, оптимизация по Парето не выделяет единственного решения, она только сужает зону неопределенности решений. Окончательный выбор остается за лицом, принимающим решение. Но исследователь, построив множество Парето, конечно, облегчает процедуру выбора решения, поиска компромисса. Изучение множества Парето дает большую информацию для отыскания такого компромисса. Лицо, принимающее решение, видит, в частности, сколько "стоит" увеличение одного из критериев, как оно сказывается на остальных показателях, значения которых непременно ухудшаются.

Весьма часто применяют метод последовательных уступок. Он применим в случае неравнозначности критериев. Пусть все критерии расположены в порядке убывания их важности: $F_1 > F_2 > \ldots > F_m$. Для простоты будем считать, что все они должны иметь максимальное значение. Сначала ищется решение, обращающее в максимум первый (важнейший) показатель $F_1 = F_1^{max}$. Затем назначается, исходя из практических соображений, некоторая "уступка" ΔF_1, которую мы согласны сделать для того, чтобы максимизировать второй критерий F_2. Наложим на критерий F_1 ограниче-

ние $F_1 \geqslant (F_1^{max} - \Delta F_1)$ и при этом ограничении ищем решение, обращающее в максимум F_2. Далее снова назначаем "уступку" в F_2, ценой которой можно максимизировать F_3, и т.д. Такой способ построения компромиссного решения хорош тем, что здесь сразу видно, ценой какой "уступки" в одном критерии приобретается выигрыш в другом и какова величина этого выигрыша.

В тех случаях, когда удается выделить один (главный) критерий F_1, задачу с несколькими критериями можно свести к задаче с одним-единственным критерием. На все остальные критерии $F_2, F_3, \ldots$ накладываются ограничения вида $F_2 \geqslant a_2$, $F_3 \geqslant a_3, \ldots$, где $a_2, a_3, \ldots$ – заданные величины. Тем самым многокритериальная задача сводится к обычной однокритериальной задаче поиска экстремума функции F_1 при наличии ограничений. Результаты решения, очевидно, будут зависеть от того, как выбраны ограничения на $F_2, F_3, \ldots$

Нашел применение способ решения многокритериальных задач, основанный на формировании обобщенного критерия эффективности. Такой критерий представляет собой взвешенную сумму частных критериев, в которую каждый из F_i входит с каким-то "весом" c_i, отражающим его важность:

$$F = \sum_{i=1}^{m} c_i F_i. \qquad (10.20)$$

Предполагается, что коэффициенты c_i есть результат экспертизы; они должны отражать наши представления о содержании компромисса, который мы вынуждены принять. Трудность определения коэффициентов c_i – основной недостаток этого метода.

В [9] приведены следующие негативные замечания о возможности применения экспертных оценок коэффициента c_i в выражении (10.20): 1) опасность выбора "предрешенного решения", которое (быть может, подсознательно) "хотят получить" авторы расчета; 2) неизбежный субъективизм решения ввиду практической невозможности найти относительно большое число действительно объективных экспертов и, что важно, равной квалификации; 3) практическая неизбежность изменения долей "веса" критериев c_i для различных оптимизационных задач, а поэтому необходимость для каждой отдельной задачи осуществления сложных процедур экспертных оценок.

Существует значительное количество модификаций изложенных подходов к решению задачи многокритериальной оптимизации. Их рассмотрение не дает чего-либо принципиально нового. Важно, что при любом способе постановки задачи оптимизации системы по нескольким критериям она остается не до конца формализованной и обоснованность выбора соответствующего подхода остается в значительной степени на совести исследователя, хотя при этом и учитываются определенные свойства задачи. Поэтому окончательный выбор решения по развитию системы остается за человеком. Главная цель многокритериальной оптимизации системы – предоставить в распоряжение лица, принимающего решения, данные, наиболее полно характеризующие преимущества и недостатки каждого варианта решения.

В условиях многокритериальности очень полезным является диалоговый режим выработки решения, который можно представить как итеративный процесс взаимодействия исследователя (проектировщика) и ЭВМ. Каждая итерация состоит из двух фаз: анализа (принятия решения), выполняемого исследователем, и оптимизации, осуществляемой ЭВМ. Для повышения эффективности диалога разработаны специальные процедуры общения человека и ЭВМ. Такие процедуры помогают исследователю и особенно проектировщику понять особенности задачи и осознать необходимость компромисса между значениями, достигаемыми по различным критериям. От итерации к итерации исследователь (проектировщик) ищет лучшее решение и одновременно изучает объективные характеристики задачи, взаимное влияние критериев. Вместе с тем результаты психологических исследований показывают существенные ограничения возможностей человека по переработке сложной многофакторной информации. Поэтому построение диалоговых процедур должно базироваться на разбиении процесса получения информации от человека на простые этапы, включающие элементарные операции по переработке информации, при выполнении которых исключается возможность допущения человеком крупных ошибок.

Учитывая, что для задач оптимизации СЦТ и ее элементов в подавляющем большинстве случаев можно в качестве основного критерия принимать экономический критерий, рекомендуются два достаточно близких метода принятия решений в условиях многокритериальности. В обоих методах исходят из стремления свести к минимуму применение экспертных оценок. Далее принимается предпосылка, что в условиях неполноты исходной информации формализованными методами, как правило, нельзя найти один наилучший вариант решения, а можно выявить лишь несколько (зону) экономически равноценных вариантов. Другие неэкономические критерии предполагается учитывать при выборе среди полученных равноэкономичных вариантов того единственного, который будет приниматься для исполнения [9, 27].

Первый метод [27] предлагает последовательное применение неэкономических критериев, начиная с наиболее важного. Для этого они должны быть проранжированы по своей важности (значимости). Процедуру выбора наилучшего варианта можно представить как повторяющуюся: сначала выявляется множество экономически равноценных вариантов; затем из этого множества отбирается множество наилучших (равноценных) вариантов по наиболее важному неэкономическому критерию; затем среди этого множества выбираются варианты, равноценные по следующему неэкономическому критерию, и т.д. Как правило, после применения одного-двух неэкономических критериев будет получен один вариант, наилучший по последнему критерию и равноценный по предыдущим критериям (включая экономический). Если же после учета всех неэкономических критериев останется несколько равноэкономичных вариантов, то последние должны быть переданы (вместе со всеми результатами оценок) лицам, принимающим решения, которые будут делать выбор интуитивным (эвристическим) путем.

В [9] в качестве наиболее приемлемого для принятия решений в условиях многокритериальности назван метод последовательных уступок,

основная идея которого уже изложена в этом разделе. При $\Delta F_1 = \Delta F_2 = \ldots = \Delta F_m = 0$ он совпадает с первым методом.

Формально первый метод позволяет найти самое наилучшее решение по многим критериям. Однако этот метод предполагает возможность ранжирования критериев, т.е. задания (определения) преимуществ каждого предшествующего критерия перед последующим. В условиях неполноты информации, трудностей соизмерения значимости критериев и неизбежности экспертного их ранжирования чрезмерный формализм первого метода лишает его гибкости. Метод последовательных уступок не имеет этого недостатка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Троицкий А.А., Горин В.И., Мосеев Г.И.* и др. Технический прогресс энергетики СССР/Под ред. П.С. Непорожнего. М.: Энергоатомиздат, 1986. 221 с.
2. *Артюгина И.М., Грачев Ю.П., Давыдова Л.Н.* и др. Технико-экономические основы развития теплофикации в энергосистемах / Под ред. Г.Б.Левенталя, Л.А. Мелентьева. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. 319 с.
3. *Громов Н.К.* Городские теплофикационные системы. М.: Энергия, 1974. 256 с.
4. *Зингер Н.М.* Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 320 с.
5. *Волкова Е.А., Волькенау И.М., Гитман М.И.* и др. / Под ред. В.П.Корытникова. М.: Энергия, 1976. 216 с.
6. *Хрилев Л.С.* Теплофикация и топливно-энергетический комплекс. Новосибирск: Наука, 1979. 277 с.
7. *Шубин Е.П.* Основные вопросы проектирования систем теплоснабжения городов. М.: Энергия, 1979. 350 с.
8. *Соколов Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоатомиздат, 1982. 360 с.
9. *Мелентьев Л.А.* Системные исследования в энергетике. М.: Наука, 1983. 455 с.
10. Энергетический комплекс СССР/Под ред. Л.А. Мелентьева, А.А. Макарова. М.: Экономика, 1983. 263 с.
11. *Меренков А.П., Хасилев В.Я.* Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.
12. Основные положения Энергетической программы СССР на длительную перспективу. М.: Политиздат, 1984. 32 с.
13. *Попырин Л.С., Сидоренко В.А.* Роль атомных источников тепла в централизованном теплоснабжении // Вестн. АН СССР. 1985. № 12. С. 30–42.
14. *Воробьев М.С., Воскресенский Ю.К., Гончаров И.А.* и др. Энергетика СССР в 1986–1990 годах. М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с.
15. *Аршакян Д.Т.* Оптимизация теплоснабжающей системы в различных климатических условиях. Ереван: Айастан, 1980. 284 с.
16. *Петросьянц А.М.* Атомная энергия в науке и промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1984. 448 с.
17. Атомные энергетические установки в системах теплоснабжения (методы исследования) / Под ред. Л.С. Попырина. М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1984. 138 с.
18. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 399 с.
19. *Ван Гиг Дж.* Прикладная общая теория систем: В 2 т. М.: Мир, 1981. 730 с.
20. *Попырин Л.С.* Математическое моделирование и оптимизация атомных электростанций. М.: Наука, 1984. 348 с.
21. *Макаров А.А., Вигдорчик А.Г.* Топливно-энергетический комплекс. М.: Наука, 1979. 280 с.
22. *Гэри М., Джонсон Д.* Вычислительные методы и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 416 с.
23. *Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских В.Е.* Оптимальное развитие систем газоснабжения. М.: Недра, 1981. 294 с.
24. *Смирнов И.А., Хрилев Л.С.* Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения. М.: Энергия, 1978. 264 с.
25. *Попырин Л.С.* Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978. 415 с.
26. *Бонгард М.М.* Проблемы узнавания. М.: Наука, 1967. 320 с.
27. *Гамм А.З., Макаров А.А., Санеев Б.Г.* и др. Теоретические основы систем-

ных исследований в энергетике. Новосибирск: Наука, 1986. 334 с.
28. *Федосов Е.А.* Автоматизация проектирования сложных технических систем // Вестн. АН СССР. 1986. № 10. С. 40–49.
29. Системы автоматизированного проектирования / Под ред. Дж. Аллана. М.: Наука, 1985. 376 с.
30. *Меренкова Н.Н., Сеннова Е.В., Стенников В.А.* Схемно-структурная оптимизация систем централизованного теплоснабжения // Электрон. моделирование. 1982. № 6. С. 76–82.
31. *Свинчар А.Е., Мачерет Р.М., Акименко Г.П.* Решение задач оптимизации систем централизованного теплоснабжения с атомными источниками теплоты // Атомные энергетические установки в системах теплоснабжения (методы исследований). М.: ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского. 1984. С. 47–53.
32. *Юфа А.И.* Оптимизация структуры систем генерирования и транспорта теплоты при перспективном проектировании // Теплоэнергетика. 1982. № 8. С. 55–57.
33. *Скловская Е.Г., Соболь И.Д., Гутман С.Н.* и др. Выбор состава основного оборудования отопительных ТЭЦ при проектировании систем теплоснабжения с помощью ЭВМ // Электрические станции. 1982. № 1. С. 8–12.
34. Строительные нормы и правила. Тепловые сети. СНиП 2.04.07–86. М.: Госстрой СССР, 1988. 48 с.
35. Строительные нормы и правила. СНиП II-35–76. Котельные установки. М.: Стройиздат, 1977. 48 с.
36. *Каганович Б.М.* Дискретная оптимизация тепловых сетей. Новосибирск: Наука, 1978. 88 с.
37. *Попырин Л.С., Светлов К.С., Столярова И.А.* и др. Исследование роли атомных источников теплоснабжения в покрытии тепловых нагрузок // Атомные энергетические установки в системах теплоснабжеиия (методы исследований). М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского. 1984. С. 25–34.
38. *Попырин Л.С., Светлов К.С., Столярова И.А.* и др. Оптимизация состава оборудования и структуры источников теплоты в системах централизованного теплоснабжения при неоднозначности исходной информации // Методы технико-экономических исследований энергетических установок в условиях неполноты информации. М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1987. С. 73–84.
39. *Браилов В.П., Алякринский А.Н.* Модифицированная оптимизационная модель развивающейся системы АЭС // Вопросы технико-экономического обоснования развития электроэнергетики. М.: ЭНИН им. Г.М.Кржижановского, 1981. С.13–23.
40. *Захарин А.Г., Браилов В.П., Денисов В.И.* Методы экономического сравнения вариантов в энергетике по принципу минимума приведенных затрат. М.: Наука, 1971. 170 с.
41. *Браилов В.П., Воронков М.Е., Чаховский В.М.* Математическая модель оптимизации структуры атомных источников тепла // Атом. энергия. 1979. Т. 47, вып. 5. С. 241–244.
42. *Шевелев Я.В., Локшин В.Л., Клименко А.В.* Оптимизация развития топливной промышленности ядерной энергетики // Атом. энергия. 1981. Т. 50, вып. 5. С. 310–314.
43. *Браилов В.П., Мартынова И.А., Мусина Г.А.* Исследование условий экономической эффективности быстрых реакторов при неопределенности исходных данных // Атом. энергия. 1981. Т. 51, вып. 5. С. 297–301.
44. Математические модели для оптимизации развития электроэнергетических систем / Под ред. Л.А. Мелентьева. Иркутск: Сиб. энерг. ин-т, 1971. 90 с.
45. *Некрасов А.С., Борисова И.Н., Кретинина Ю.С.* и др. Оптимизация развития топливно-энергетического комплекса. М.: Энергоиздат, 1981. 240 с.
46. *Кретинина Ю.С., Штейнгауз В.Е.* Моделирование развития электроэнергетики как блока системы задач по оценке уровня электрификации /Моделирование задач электрификации и электроэнергетики. М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1985. С. 33–41.
47. *Волков Г.А.* Оптимизация надежности электроэнергетических систем. М.: Наука, 1986. 116 с.
48. *Митенков Ф.М., Куликов Е.В., Сидоренко В.А.* и др. Реакторная установка атомной станции теплоснабжения АСТ-500 // Атом. энергия. 1985. Т. 58, вып. 5. С. 308–313.
49. *Клемин А.И., Полянин Л.Н., Стригулин М.М.* Теплогидравлический рас-

чет и теплотехническая надежность ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
50. *Полянин Л.Н., Ибрагимов М.Х., Сабелев Г.И.* Теплообмен в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1982. 88 с.
51. *Сидоренко В.А.* Расчет критичности и выгорания решеток со слабообогащенным топливом и легководным замедлителем. Препр. ИАЭ-1434. М., 1967. 87 с.
52. *Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д.* и др. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1979. 288 с.
53. Методика и зависимости для теоретического расчета теплообменника и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС: РТМ.24.031.05–72. М.: Минтяжэнергомаш, 1974. 124 с.
54. *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. 384 с.
55. *Пшеничный Б.Н., Данилин Ю.Н.* Численные методы в экстремальных задачах. М.: Наука, 1975. 319 с.
56. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 518 с.
57. *Попырин Л.С., Самусев В.И., Эпельштейн В.В.* Автоматизация математического моделирования теплоэнергетических установок. М.: Наука, 1981. 236 с.
58. Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций. М.: Министерство энергетики и электрификации СССР, 1981. 122 с.
59. *Соловьев Ю.П.* Проектирование теплоснабжающих установок для промышленных предприятий. М.: Энергия, 1978. 191 с.
60. *Фиакко А., Мак-Кормик Г.* Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации. М.: Мир, 1972. 240 с.
61. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.
62. *Булатов В.П.* Методы погружения в задачах оптимизации // Методы оптимизации (прикладная математика). Иркутск: Сиб. энерг. ин-т, 1974. С. 6–71.
63. *Деканова Н.П., Клер А.М.* Метод нелинейного программирования для оптимизации сложных технических систем // Методы оптимизации и их приложения. Иркутск: Сиб. энерг. ин-т, 1987. С. 27–33.
64. *Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р.* Оптимизация систем транспорта газа. М.: Недра, 1975. 270 с.
65. ГОСТ 27.002–83. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1985. 30 с.
66. ГОСТ 24277–85, ГОСТ 24278–85. Турбины паровые стационарные для атомных и тепловых электростанций. М.: Изд-во стандартов, 1985. 24 с.
67. ГОСТ 24.722–81. Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. М.: Изд-во стандартов, 1981. 8 с.
68. ГОСТ 24005–80. Котлы паровые стационарные с естественной циркуляцией. М.: Изд-во стандартов, 1980. 8 с.
69. *Козлов Б.А., Ушаков И.А.* Справочник по расчету аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
70. *Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В.* и др. Надежность технических систем: Справ. / Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
71. *Королюк В.С., Турбин А.Ф.* Полумарковские процессы и их применение. Киев: Наук. думка, 1978. 120 с.
72. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
73. *Барлоу Р., Прошан Ф.* Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. М.: Наука, 1984. 328 с.
74. *Руденко Ю.Н., Ушаков И.А.* Надежность систем энергетики. М.: Наука, 1986. 251 с.
75. *Емельянов И.Я., Клемин А.И., Поляков Е.Ф.* Методы оценки надежности ядерных реакторных установок // Атом. энергия. 1974. Т. 37, вып. 5. С. 408–416.
76. *Соболь И.Д., Кацовский В.А.* Оценка надежности тепловых схем ТЭЦ при проектировании // Электр. станции. 1973. № 6. С. 41–45.
77. *Иванов Ю.М., Чумакова С.В.* К вопросу оценки надежности технологических схем котельных // Изв. вузов. Энергетика. 1982. № 5. С. 57–61.
78. *Такайшвили М.К., Хасилев В.Я.* Об основных положениях методики расчета надежности и резервирования

тепловых сетей // Теплоэнергетика. 1972. № 4. С. 14–19.
79. *Ионин А.А., Хлыбов Б.М., Братенков В.Н., Терлецкая Е.Н.* Теплоснабжение. М.: Стройиздат, 1982. 336 с.
80. *Монахов Г.В., Красовский Б.М.* Количественная оценка надежности систем теплоснабжения // Системы централизованного теплоснабжения. М.: ВНИПИЭнергопром, 1985. С. 151–166.
81. *Жаворонков С.П., Светлов К.С., Середа О.Д., Столярова И.А.* Математическая модель системы централизованного теплоснабжения // Моделирование задач электрификации и электроэнергетики. М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1985. С. 81–88.
82. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь, 1983. 416 с.
83. Нормы технологического проектирования атомных электрических станций. М.: Теплоэлектропроект, 1981. 140 с.
84. *Нефедов Ю.В., Середа О.Д.* Анализ структурной надежности систем централизованного теплоснабжения с атомными источниками теплоты // Атом. энергет. установки в системах теплоснабжения (методы исследования). М.: ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1984. С. 98–108.
85. *Меренков А.П., Сеннова Е.В.* Развитие методов исследования и обеспечения надежности теплоснабжающих систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1984. № 2. С. 58–85.
86. *Клемин А.И., Емельянов В.С., Морозов В.Б.* Расчет надежности ядерных энергетических установок: марковская модель. М.: Энергоатомиздат, 1982. 208 с.
87. *Гмошинский В.Г., Флиорент Г.И.* Теоретические основы инженерного прогнозирования. М.: Наука, 1973. 303 с.
88. *Янч Э.* Прогнозирование научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1974. 586 с.
89. *Мартино Дж.* Технологическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1977. 591 с.
90. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981. 487 с.
91. Методические положения по выполнению оптимизационных (технико-экономических) расчетов в энергетике при неоднозначности исходной информации. Москва; Иркутск: Научный совет по комплексным проблемам энергетики, 1977. 51 с.
92. *Поспелов Г.С., Ириков В.А.* Программно-целевое планирование и управление. М.: Сов. радио, 1976. 440 с.
93. *Поспелов Г.С., Лен В.Л., Солодов В.М.* и др. Проблемы программно-целевого планирования и управления / Под ред. Г.С. Поспелова. М.: Наука, 1981. 460 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ 6

Глава первая

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В СССР 7

1.1. Условия развития 7
1.2. Задачи развития 23

Глава вторая

ОСНОВЫ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ 26

2.1. Исходные положения 26
2.2. Основные свойства СЦТ и ИТ 30
2.3. Централизованное теплоснабжение как объект системных исследований 37

Глава третья

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ 46

3.1. Общие подходы к построению математических моделей 46
3.2. Методы агрегирования, эквивалентирования, декомпозиции и ранжирования факторов 51
3.3. Построение программно-вычислительных комплексов 58

Глава четвертая

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СЦТ И СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ИТ . . . 65

4.1. Постановка задачи 65
4.2. Оптимизация состава оборудования ИТ и диаметров трубопроводов ТС при заданной конфигурации тепловой сети 67
4.3. Оптимизация конфигурации тепловой сети 74
4.4. Пример использования программно-вычислительного комплекса для исследования СЦТ 77

Глава пятая

МЕТОДЫ УЧЕТА ВЗАИМОСВЯЗИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С СИСТЕМАМИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ 79

5.1. Модель развивающейся системы атомных энергетических установок 79
5.2. Модели электроэнергетических систем 86

Глава шестая

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АСТ И АСПТ 92

6.1. Постановка задачи 92
6.2. Математическая модель реакторной части 97
6.3. Математическая модель теплотехнической части 102
6.4. Методика и алгоритм оптимизации 111

Глава седьмая

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЭЦ 117

7.1. Автоматизация моделирования ТЭЦ 117
7.2. Выбор состава основного оборудования ТЭЦ 127
7.3. Оптимизация параметров серийной паротурбинной установки ТЭЦ 134

Глава восьмая

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА СТРУКТУРУ СЦТ 144

8.1. Общие методические положения. 144
8.2. Динамика развития структуры ИТ в СЦТ 147
8.3. Динамика развития тепловых сетей в СЦТ. 156

Глава девятая

НАДЕЖНОСТЬ СЦТ И ИТ. 160

9.1. Постановка задачи 160
9.2. Методика исследования надежности СЦТ 165
9.3. Оптимизация структурной надежности ИТ. 175

Глава десятая

ИССЛЕДОВАНИЯ СЦТ ПРИ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ 183

10.1. Исходные методические положения. 183
10.2. Оптимизация источников теплоты. 186
10.3. Оптимизация развития систем теплоснабжения. 195
10.4. Методы многокритериальной оптимизации 203

ЛИТЕРАТУРА 210

CONTENTS

PREFACE 3

Part first

THE DEVELOPMENT OF DISTRICT HEATING SYSTEMS /DHS/ IN THE USSR: FUTURE PROSPECTS 7
1.1. Conditions of the development. 7
1.2. Targets of the development. 23

Part second

BASIS OF SYSTEMATIC RESEARCH OF DHS. 26
2.1. General propositions. 26
2.2. Main properties of DHS and heat sources /HS/. 30
2.3. DH as subject of systematic research. 37

Part third

METHODS OF MATHEMATICAL MODELLING OF ENERGY SYSTEMS: THE MAIN ASPECTS. 46
3.1. General approach to modelling. 46
3.2. Methods of aggregation, equivalentation, decomposition and ranging of factors. 51
3.3. Designing of computing complexes. 58

Part fourth

OPTIMIZATION OF DHS STRUCTURE AND HS EQUIPMENT. 65
4.1. Statement of the problem. 65
4.2. HS equipment and tube diameter optimization for a given heat network configuration. 67
4.3. Optimization of heat network configuration. 74
4.4. An example of computing complex application for DHS research. 77

Part fifth

METHODS FOR ACCOUNTING OF INTERRELATION OF DHS WITH NUCLEAR AND ELECTRIC ENERGY SYSTEMS. 79
5.1. Model of the developing system of nuclear energy installations. 79
5.2. Models of electric energy systems. 86

Part sixth

MODELLING AND COMPLEX OPTIMIZATION OF HEAT NUCLEAR POWER PLANTS. 92
6.1. Statement of the problem. 92
6.2. Mathematical model of the reactor system. 97
6.3. Mathematical model of the heat engineering system. 102
6.4. Methods and algorithm of optimization. 111

Part seventh

MODELLING AND OPTIMIZATION OF COGENERATION PLANTS /CP/. 117
7.1. Automatization of CP modelling. 117
7.2. CP main equipment option. 127
7.3. Parameter optimization of DH steam–turbine installation. 134

Part eighth

EFFECT OF HEAT LOAD GROWTH ON DHS STRUCTURE. 144
8.1. General methodical aspects. 144
8.2. HS structure development in DHS. 147
8.3. Heat network development in DHS. 156

Part ninth

DHS AND HS RELIABILITY. 160
9.1. Statement of the problem. 160
9.2. Procedure of DHS reliability study. 165
9.3. Optimization of HS structural reliability. 175

Part tenth

DHS RESEARCH WITH INCOMPLETE DATA 1
10.1. General methodical aspects. 1
10.2. Heat sources optimization. 1
10.3. Optimization of DHS development. 1
10.4. Methods of multi–criterion optimization. 2

REFERENCES 2

Научное издание

ПОПЫРИН Лев Сергеевич, СВЕТЛОВ Константин Сергеевич, БЕЛЯЕВА Галина Михайловна и др.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Утверждено к печати Государственным научно-исследовательским энергетическим институтом имени Г.М. Кржижановского

Художник *А.П. Дегтярев.* Художественный редактор *Н.Н. Михайлова*
Технический редактор *Л.Н. Богданова.* Корректор *Р.Г. Ухина*

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 39975

Подписано к печати 27.04.89. Т – 09841. Формат 60 × 90$^{1}/_{16}$. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная. Усл.печ.л. 13,5. Усл.кр.-отт. 13,9. Уч.-изд.л. 15,5
Тираж 1300 экз. Тип. зак. 1398. Цена 3 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Наука"
117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени 1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

Исправления и опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
67 21	Формула (4.2) 15 сн.	(n_l, D_{sl}) энергетики электроэнер- гетики	$З_l^{тс}$ (n_l, D_{sl}) энергетики и электроэнерге- тики

Зак. 1398