

В.А. ПРИКОВ, В.Н. ТРЕНЕВ

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ
СИСТЕМЫ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ



НАУКА • ФИЗМАТЛИТ

В.А. ИРИКОВ, В.Н. ТРЕНЕВ

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ



МОСКВА
НАУКА • ФИЗМАТЛИТ
1999

УДК 519.816
ББК 22.18
И 80

Ириков В.А., Тренев В.Н. Распределенные системы принятия решений. Теория и приложения. — М.: Наука. Физматлит., 1999.—288 с. ISBN 5-02-015246-3.

Рассматриваются математические методы и модели, применяемые при разработке распределенных человеко-машинных систем формирования проектных и управленческих решений. Основное внимание уделяется технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента. Обсуждаются результаты практического использования систем в энергетике, машиностроении, строительстве и в процессах обучения.

Для научных работников, аспирантов и студентов, занимающихся приложениями методов математического моделирования и вычислительного эксперимента в задачах проектирования и управления.

Табл. 5. Ил. 51. Библиогр. 121 назв.

ТП-99-II
ISBN 5-02-015246-3

© В.А. Ириков, В.Н. Тренев, 1999
© Наука. Физматлит, оформление, 1999

Оцифровано в апреле-мае 2026 г. по разрешению проф. В.А. Ирикова

Оглавление

Предисловие	3
-------------------	---

Часть I. Распределенные системы и процедуры формирования управленческих решений

Глава 1. Распределенные процедуры формирования согласованных решений при управлении развитием организационных систем

1.1. Краткая характеристика рассматриваемых классов систем и задач	7
1.2. Анализ изменений внешней среды	11
1.3. Анализ и устранение узких мест развития организации ..	20
1.4. Конкретизация основных направлений и средств развития	26
1.5. Формирование варианта интенсивного развития	35
1.6. Информационные технологии анализа предельных возможностей развития	38
1.7. Технология реформирования предприятия	41

Глава 2. Научно-методические основы разработки распределенных систем формирования согласованных решений

2.1. Системный и программно-целевой подход к задачам развития	48
2.2. Структуризация показателей и построение информационной модели	57
2.3. Общие требования к человеко-машинной системе поддержки принятия решений	65
2.4. Основные принципы разработки, основные этапы и типовые задачи процедур РСФСР	84
2.5. Структура и функции исполнителей в распределенной системе формирования согласованных решений	95

Часть II. Математические модели и алгоритмы

Глава 3. Модель распределенной системы

3.1. Основные понятия и определения	98
3.2. Основные типы и свойства распределенных систем	109
3.3. Примеры распределенности информации, функций и задач	115
3.4. Координация решений локальных задач	120
3.5. Допустимость распределенного описания сосредоточенных задач	125
3.6. Допустимость использования агрегированных моделей ...	127

3.7. Моделирование системообразующих факторов	131
3.8. Координация и синхронизация решений локальных задач	133
3.9. Принципы функционирования многоуровневой распределенной системы формирования согласованных решений	136
Глава 4. Типовые задачи, модели, алгоритмы и информационные технологии	
4.1. Краткая характеристика комплекса типовых задач, моделей и информационных технологий	139
4.2. Алгоритм формирования согласованных балансов	143
4.3. Комплексный анализ и целенаправленное формирование условий развития (модели и методы системной оптимизации)	157
4.4. Календарное планирование комплексов работ	175
4.5. Многокритериальная оценка и оптимизация	188
4.6. Агрегирование и дезагрегирование	196
4.7. Согласование плановых решений с системой вышестоящего уровня	199
4.8. Координация решений локальных задач	204
4.9. Выделение существенных факторов и связей (формирование модели минимальной сложности)	212
Глава 5. Математические обоснования основных алгоритмов принятия решений	
5.1. Математические модели и алгоритмы распределенной системы поддержки формирования решений балансовых задач	220
5.2. Формальное описание алгоритмов	231
Приложение. Программа «Малая энергетика городов и поселков России»	
	251
Список сокращений	276
Список литературы	277

Предисловие

Книга посвящена вопросам создания прикладных технологий управления организационно-техническими системами, эффективно решающих ключевые проблемы целенаправленного изменения (развития) этих систем. Актуальным примером такой проблемы является улучшение финансово-экономического состояния российских предприятий, большинство из которых находится в зоне банкротства. Возникает вопрос: можно ли такому предприятию без внешних инвестиций в условиях острого дефицита финансов выйти на конкурентоспособное безубыточное функционирование и если да, то за счет чего?

Практика реформирования десятков предприятий, например консультационной фирмой «РОЭЛ Консалтинг», показывает, что это возможно практически для всех российских предприятий, причем в короткие сроки. Через два-три месяца работы с консультантами появляются положительные изменения, через пять-семь месяцев предприятие выходит из зоны банкротства, а через год-полтора, удвоив (а иногда утроив-четырежды) объемы продаж, прибыль и уровень жизни работающих, становится конкурентоспособным, развивающимся.

За счет чего удается так активизировать и эффективно использовать внутренние возможности предприятия? Ответ: за счет повышения эффективности системы управления и, в первую очередь, ее ядра — процессов подготовки, принятия и исполнения решений коллективом управленцев и исполнителей.

Авторами данной книги разработана, экспериментально опробована и массово используется рабочая методика реформирования российских предприятий, эффективно работающая в условиях острого дефицита финансов. Она реализуется по следующей схеме:

- четкая постановка конечной цели как желаемого состояния;
- структуризация промежуточных целей, определяющих траекторию приближения к конечной цели;
- выделение ключевых проблем (лимитирующих факторов, узких мест), возникающих на пути достижения цели;
- формирование и оценка предложений по главным изменениям;
- концентрация всех ресурсов на приоритетных прорывных направлениях изменений и создание условий для их реализации.

Возникающие при этом задачи, ответственность за результаты и полномочия по принятию решений распределяются между руководителями различных уровней, запускаются механизмы координации решений контрольных задач и мотивации на командную работу по достижению общей цели. Это создает эффект «кумулятивного заряда», пробивающего в нужном направлении «броню» мешающих барьеров. Распределенность процесса повышает реализуемость (компания «РОЭЛ Консалтинг», например, взявшая эту методику на вооружение при реформировании предприятий, достигает конечного результата практически в 100 % случаев). Главный фактор практического успеха в такой схеме стратегического управления изменениями — это не ЧТО делать, а КАК принимать решения, правильно определить направления и скоординировать усилия. Именно это требует, в первую очередь, научного обоснования и разработки специальных методов, которым и посвящена данная книга.

С точки зрения приложений, исторически первые теоретические разработки авторов по распределенным системам принятия решений были использованы в середине 80-х годов для создания компьютерной многоуровневой распределенной системы поддержки решений при разработке Энергетической программы страны (Поспелов Г.Е., Ириков В.А., Курилов А.Е. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ.—М.: Наука, 1985), которая успешно работает до сих пор. Затем были сделаны обобщения на все отрасли (с добавлением процедур) и практически использованы при реализации государственной селективной структурной политики в части выделения и реализации критически важных технологий (Миннауки и Минэкономики).

Комплексный анализ с рассмотрением всех, в том числе неформализуемых аспектов распределенных процедур, дал возможность решать проблемы развития предприятий «под ключ» и использовать методики в практике реформирования предприятий. При этом в едином распределенном процессе работает смешанная команда как управленцев-практиков, так и управленцев-консультантов («системщиков», маркетологов, финансистов, психологов, социологов, юристов, программистов и т. д.) В этом случае доля неформальных элементов (работа с персоналом, с законами и т. д.) возрастает, и часто они становятся решающими факторами. Однако общая схема работы, инструментарий подготовки и принятия решений, принципы координации, обеспечивающие получение конечного результата, остаются идеологически теми же.

Сочетание теоретических разработок (на эту тему защищены десятки дипломов и диссертаций на факультете управления и при-

кладной математики МФТИ) с экспериментальными проработками Школы менеджмента МФТИ и практикой компании «РОЭЛ Консалтинг» в реальных организациях (их уже более сотни) дали возможность надежно решать реальные задачи организаций, а консалтинговой фирме «РОЭЛ Консалтинг» резко повысить свою конкурентоспособность, перейдя на оплату своих услуг от «результата»: если нет прироста финансового результата у клиента, то фирма ничего не получает. Это, безусловно, рискованно, однако уже более четырех лет удается работать без неудач.

Рабочие методики и опыт реформирования предприятий описаны в книге «Технология и опыт вывода предприятий из кризисного состояния в конкурентоспособное. Методика и годовой опыт ОАО «Чайковский текстиль», под ред. В.А. Ирикова (М.: Изд-во «Аллегро-Пресс», 1996) и в книге Тренев В.Н., Ириков В.А. и др. «Реформирование и реструктуризация предприятий. Методика и опыт» (М.: Изд-во ПРИОР, 1998). В последней книге опыт реформирования изложен директорами 11 предприятий и представителями региона. В частности, по результатам Нижегородской программы реструктуризации десятка предприятий делается оценка, показывающая, что если бы такую работу провели все регионы, то это дало бы возможность устранить дефицит бюджета и уже в 1998 г. все «бюджетники» получили бы зарплату без задержек. Это показывает, что реформирование предприятий становится серьезным средством выхода из кризиса в масштабах страны.

Данная книга, как отмечалось выше, содержит научное обоснование, являющееся фундаментом рабочих методик. Основное внимание в ней уделено методическим и математическим вопросам, связанным со следующими главными с прикладной точки зрения вопросами:

- особенности распределенных организационно-технических систем;
- основные типовые задачи подготовки и принятия решений, соответствующие методы, процедуры и информационные технологии их решения;
- обеспечение четкой ориентации на общие конечные результаты на всех этапах процедур и на всех рабочих местах;
- создание условий максимального благоприятствования для достижения поставленных целей, включая изменение структуры ограничений (целенаправленную деформацию множества допустимых решений);
- активное целенаправленное использование для решения проблем инноваций (результатов научно-технического прогресса).

Книга состоит из двух частей.

Часть I ориентирована на управленцев, т. е. на лиц, формирующих и принимающих решения, и специалистов, обеспечивающих их работу, — аналитиков и разработчиков типовых информационных технологий, привязанных к конкретным рабочим местам. В главе 1 рассмотрены примеры распределенных процедур управления развитием организационно-технических систем. Основное внимание уделено задачам стратегического управления, возникающим при формировании инновационного варианта развития организации: выбору структурной, инвестиционной и научно-технической политик, обеспечивающих в комплексе желаемые темпы улучшения социально-экономических показателей. В главе 2 изложены научно-методические основы разработки человеко-машинных распределенных систем формирования согласованных решений.

Часть II ориентирована на разработчиков системы. В главе 3 рассмотрены математические модели и подходы к моделированию, методы согласования и координации решений. В главе 4 описаны информационные технологии решения типовых задач, алгоритмы и основные программные средства. В главе 5 изложены доказательства утверждений, формальные описания алгоритмов, справочные материалы.

В Приложение вынесен фрагмент Программы «Малая энергетика городов и поселков России», любезно предоставленной электротехнической корпорацией РОЭЛ (для обоснования этой программы использована методика, изложенная в главе 1).

Главы 1–4 написаны авторами совместно, глава 5 — В.Н. Треневым, § 5.1 — Н.Н. Треневым, Приложение — совместно с В.В. Дорохиным, А.Г. Щегловым, Н.Д. Александровской, Л.В. Игловой.

Авторы выражают благодарность всем коллегам и, в первую очередь, В.В. Дорохину — генеральному директору корпорации РОЭЛ (Российская электротехника), бизнесмену, активно поддерживающему инновации и понимающему, что для совершенствования управления нет ничего практичнее хорошей теории; а также С.В. Ходос и С.И. Ивановой, без которых рукопись не смогла бы превратиться в книгу.

*В.А. Ириков
В.Н. Тренев*

Ч А С Т Ь I

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕДУРЫ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Глава 1

Распределенные процедуры формирования согласованных решений при управлении развитием организационных систем

1.1. Краткая характеристика рассматриваемых классов систем и задач

Цель данной главы — дать общее представление о характере рассматриваемых задач формирования решений; об основных факторах, приводящих к необходимости распределения функций и подзадач между различными исполнителями; о подзадачах и информационных технологиях их решения; об инструментальных средствах решения автономных подзадач и их согласования; о требованиях, предъявляемых к автоматизированной системе поддержки решений в распределенной системе, и т. п.

В связи с этим в данной главе, не требующей у читателя специальной подготовки в области математики и информатики, изложение ведется на содержательном уровне на примере задач стратегического управления развитием объединения предприятий и не претендует на полноту и строгость. Достаточно полные определения и описание свойств распределенных систем, пригодные для разработки моделей и человеко-машинных процедур решения типовых задач, приводятся в гл. 2. Здесь отметим лишь следующие моменты.

Практические процедуры планирования и управления являются *распределенными* в том смысле, что подзадачи общей сложной задачи (например, планирования развития отрасли или производственного объединения (ПО)), компетенция, полномочия, информация и процедуры ее переработки распределены, рассредоточены по многим исполнителям (специализированным рабочим местам). Каждая подзадача решается исполнителем сравнительно автономно с использованием эвристических приемов, помогающих ему содержательно аргументировать результаты. На каждом рабочем месте детально рассматривается лишь часть объектов, показателей и т. п. общей проблемы. Согласованное решение задачи

в целом формируется в процессе итерационного взаимодействия исполнителей.

Примером такой сложной задачи формирования решений является задача разработки планов и программ развития объединения, например плана реформирования предприятия. Примером подзадач стратегического управления являются подзадачи выбора: структурной политики (номенклатура и объем продукции, пропорции развития мощностей), инновационной политики (определение приоритетных направлений изменений), инвестиционной политики (доли накопления и потребления, распределение ресурсов между производством, воспроизводством, наукой, основными программами работ) и т. п. Эти подзадачи в свою очередь разбиваются на типовые подзадачи формирования плановых и управленческих решений (формирования балансов, календарного планирования и др.), для каждой из которых имеются отработанные процедуры их решения и технология обработки информации. Введем определения информационной технологии формирования решений.

Информационная технология (ИТ) есть способ организации процесса и средств получения сведений, уменьшающих степень неопределенности знаний, необходимых для решения поставленной задачи. ИТ — регламентированный информационный процесс (процедура), определяющий формы представления данных и порядок выполнения элементарных операций (поиск, хранение, группировка и т. п.) по обработке информации людьми и техническими средствами и приводящий к решению задачи.

Комплексная информационная технология (КИТ) — информационная технология, дающая решение общей исходной задачи. Она состоит из типовых информационных технологий, под которыми мы понимаем комплекс элементарных операций, известных данному пользователю и обеспечивающих решение определенной типовой подзадачи.

Человеко-машинная информационная технология (ЧМ ИТ) — ИТ, при которой часть операций по переработке информации выполняется на ЭВМ.

Рассматриваемые нами сложные задачи не могут быть удовлетворительно решены вручную, поэтому далее под ИТ будем понимать только распределенные ЧМ ИТ.

В таких ИТ можно выделить две основные части:

- неформально спроектированную процедуру решения задачи, являющуюся логической основой ИТ;

- систему поддержки решений, состоящую из автоматизированных рабочих мест на ЭВМ и являющуюся средством автоматизации ИТ.

Имеющийся опыт разработки распределенных систем поддержки решений показывает, что рациональное использование такой системы связано с распределением функций между четырьмя группами специалистов: управленцами (конечными пользователями), проектантами ИТ, аналитиками и разработчиками программных средств.

Для целей данной главы, связанной с процедурами решения задач управленцами, на наш взгляд, наиболее подходящим является изложение в форме описания хода реализации деловой игры по формированию ключевых задач стратегического управления развитием организационной системы (отрасли, объединения) и процедур их решения.

Основными целями игры являются:

- ознакомление с основными задачами стратегического управления и методическими подходами к выявлению проблем и их решению;
- анализ конкретной проблемной ситуации и поиск путей решения возникающих проблем;
- активное использование возможностей моделирования и ЭВМ.

Рассмотрим сначала упрощенную условную ситуацию¹⁾. Задается вариант прогноза изменений внешней среды организационной системы (данные о рынке, о потребности в продукции, о рынках трудовых, финансовых, материальных ресурсов и т. п.). Имеются данные о ретроспективе и текущем состоянии организации. Требуется:

1) проанализировать ситуацию и выявить проблемы, с которыми организация может столкнуться в перспективе, выделив возможные экстремальные ситуации;

2) наметить пути и программы своевременного решения этих проблем и стратегию развития организации (включая выбор социально-экономической, структурной, инновационной и инвестиционной политики);

3) сформировать предложения по основным показателям плана развития: изменениям в составе и объемах производства продукции, развитию мощностей, требуемым ресурсам, показателям эффективности производства и социального развития и др.

¹⁾ Реальный прототип игровой ситуации — инновационная программа «Малая энергетика городов и поселков России» (см. Приложение).

Позаппную схему процедуры анализа и формирования варианта развития организации рассмотрим на примере электроэнергетического объединения.

Этап 1. Прогнозируется спрос и определяются цели объединения, требования по уровням производства продукции (например, электроэнергии) и необходимые для этого уровни производственных мощностей и их вводов.

Этап 2. Оцениваются возможности ввода мощностей с учетом имеющихся данных по наиболее существенным факторам.

Этап 3. Анализируются различия между требуемым и возможным конечным результатом, оцениваются возможные потери.

Этап 4. Выявляются главные лимитирующие сдерживающие факторы (проблемы, «узкие места» развития) и формируются требования по их изменению, обеспечивающие покрытие потребностей.

Этап 5. Формируются мероприятия по устранению узких мест.

Этап 6. Анализируются предельные возможности устранения узких мест, корректируются требования (целевые установки).

Этап 7. Формируются сбалансированный вариант программы развития и мероприятия по ее реализации и с учетом критериев эффективности выбирается рекомендуемый вариант предложения к плану развития (в укрупненных показателях).

Приведенную выше схему положим в основу будущей ИТ, детализируя или изменяя ее этапы с учетом конкретной ситуации.

Для решения задач описанной выше процедуры могут быть использованы различные подходы. Будем считать, что главное назначение анализа — проверка возможности удовлетворения спроса и формирование экономически эффективного варианта развития. Если эта возможность реализуема несколькими способами (различающимися структурой мощностей, использованием инноваций и т.д.), то в качестве опорного рассматривается наиболее надежный по реализации вариант. Далее возможны два случая: если опорный вариант недостаточно эффективен, то он последовательно улучшается; если опорный вариант не обеспечивает выполнения заданий по конечному продукту, то последовательными уступками формируются варианты, все менее надежные по реализации (из-за включения все более рискованных мероприятий), но более близкие к требуемому варианту.

Процедура начинается и ведется сводной группой, отвечающей за задачу в целом, во главе с руководителем организации, который по мере возникновения проблем и подзадач привлекает для их ре-

шения рабочие группы (руководителей других уровней и специалистов). При этом он делегирует им соответствующую часть функций и полномочия, оставляя за собой функции координации автономно решаемых подзадач, а также решение сводных подзадач, обеспечивающее решение исходной задачи. В свою очередь при решении сводных подзадач руководитель сводной группы может использовать помощников (лиц, формирующих решение в сводной группе), оставляя за собой функции принятия принципиальных решений (выбор) и формирование заданий помощникам. Аналогично со своей задачей поступает каждый привлеченный руководитель и специалист вплоть до рабочих мест нижнего уровня.

Таким образом, одновременно формируется и логическая схема процедуры (распределенной комплексной информационной технологии) решения исходной задачи, и прототип реализующей эту технологию распределенной организационной системы.

Одной из главных целей стратегического управления является обеспечение своевременной реакции организационной системы на изменения внешней среды. Рассмотрим процедуры анализа изменений внешней среды на примере задач развития регионального объединения.

1.2. Анализ изменений внешней среды

1.2.1. Определение потребности в продукции. Пусть сформирован вариант концепции развития отраслей народного хозяйства и предприятий (потребителей электроэнергии в регионе. По этим данным и средней энергоемкости определяется прогноз потребности в электроэнергии (кривая E_2 на рис. 1.1 а). на период t_n (время достижения требуемого уровня). Для этого привлекается рабочая группа из специалистов отраслевых институтов и определяется представитель руководства, курирующий маркетинг и сбыт продукции. Параллельно с другими специалистами в той же группе выполняется прогноз возможностей энергосбережения, с учетом которого потребность в производстве электроэнергии снижается (кривая E_1 на рис. 1.1 а).

Подразделением, специализирующимся на балансах продуктов и мощностей рассчитывается уровень установленных электрогенерирующих мощностей, необходимых для обеспечения требуемого уровня производства электроэнергии (кривая M_1 на рис. 1.1 б).

1.2.2. Прогноз выбытия мощностей. Рабочей группой специалистов из технического и других отделов, с учетом сроков ввода и сроков службы оборудования, прогнозируется выход мощностей из

эксплуатации и уровень оставшихся мощностей (кривая M_2 на рис. 1.1 б).

Разница между требуемым уровнем мощностей и уровнем, остающимся после вывода части существующих мощностей из эксплуатации, определяет требования, предъявляемые к вводу мощ-

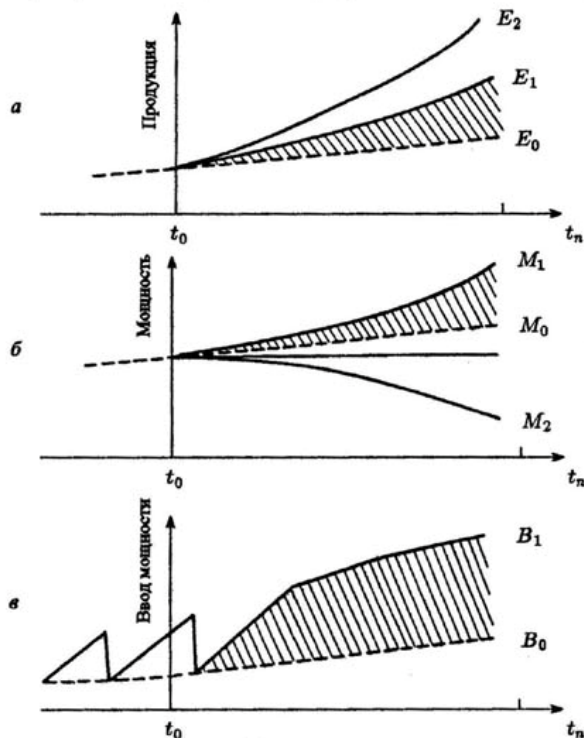


Рис. 1.1

ностей (кривая B_1 на рис. 1.1 в). Слева от текущего момента времени t_0 на рис. 1.1 в показана ретроспектива: типичная «пила» соотношения «план-факт» ввода мощностей.

Штриховые кривые E_0 , M_0 , B_0 на рис. 1.1 соответствуют факту в ретроспективе и сохранению (экстраполяции) тенденций на перспективу.

Данные, приведенные на рис. 1.1, в совокупности представляются в сводную группу для сопоставления и предварительного комплексного анализа.

1.2.3. Качественный анализ результатов прогноза. В результате анализа данных, представленных на рис. 1.1, сводная группа делает предварительную оценку ситуации по следующим разделам.

1. Сопоставление с ретроспективой. Несмотря на резко повышаемые темпы энергосбережения, компенсирующего около трети прироста потребности, необходимость выхода из кризиса за счет развития народного хозяйства региона при одновременном массовом выбытии мощностей (кривая M_2 на рис. 1.1 б) по истечению срока их службы (около половины к концу периода) резко увеличивают требования к вводам мощностей.

Фактически достигнутые уровни ввода мощностей в течение пятнадцати лет до 1995 года не менялись (около 10 млн кВт в год), а за последние годы (1995–1998) снизились в 10 раз. Необходимо резко (примерно вдвое) увеличить вводы уже в ближайшие 2–3 года и устроить их после 2000 года.

2. Сопоставление спроса (потребностей) и возможностей. Ориентировочная оценка возможных уровней ввода мощностей при сохранении сложившихся тенденций приведена на рис. 1.1 в (кривая B_0). Эта оценка получена экстраполяцией на перспективу фактических вводов в ретроспективе.

Сравнение требуемых уровней вводов с полученной оценкой возможных вводов (соответственно кривые B_1 и B_0 на рис. 1.1 в) показывает, что при отсутствии специальных мер возможно очень существенное (более чем наполовину) невыполнение требований по вводам. Эти вводы не могут компенсировать выбытие мощностей (кривая M_2 на рис. 1.1 б). Видно, что целевые установки не могут быть выполнены ни по вводу мощностей, ни по приросту выработки энергии (соответственно кривые M и E на рис. 1.1) Это приводит к дефициту мощности и энергии, выделенному на рис. 1.1 штриховкой.

3. Экономическая оценка. В связи с неполным удовлетворением спроса уровень выручки и прибыли объединений снизится. Кроме того, возможна выплата штрафов за потери у потребителей. Аналогичная дефицитная ситуация возникает для большинства региональных объединений, и в целом потери национального дохода могут достигать величин, сравнимых с национальным доходом.

4. Социально-политическая оценка. Общая оценка практической ситуации в электроэнергетике приведена в Приложении. Учитывая, что потери могут превзойти прирост национального дохода за тот же период времени, можно сделать следующие заключе-

ния:

- проблема развития электроэнергетики при сохранении сложившихся тенденций приобретает общегосударственный уровень и требует специального рассмотрения;
- сохранение сложившихся тенденций развития отрасли недопустимо, поскольку создает угрозу снижения темпов роста национального дохода, а значит, и уровня жизни населения, что, в свою очередь, может сделать нереальной реализацию принятых в регионе и стране социальных и политических целей.

5. Общая оценка. Сопоставление со сложившимися тенденциями развития объединения (отрасли) позволяет сделать вывод о существенности изменений внешних требований и возможности возникновения экстремальной ситуации, которая может привести к крупномасштабным социально-экономическим потерям государственного уровня. В этих условиях необходимо принятие стратегических решений, кардинально меняющих сложившиеся тенденции развития и, скорее всего, выходящих за рамки объединения. Такой вывод, учитывающий специфику конкретной ситуации, предполагает уточнение или изменение дальнейшего хода описанной выше стандартной процедуры.

Для заключения руководителем сводной группы привлекается организационно-методическая группа, отвечающая за информационную технологию формирования решений и ее адаптацию к новым ситуациям. Даже если эта группа придет к заключению о том, что принимать решения о стратегии развития объединения и отрасли пока преждевременно, так как полученные оценки носят предварительный характер и могут оказаться неадекватными реальности, уже можно сделать, по крайней мере, два вывода относительно процесса (технологии) формирования управленческих решений:

1) в формируемом варианте решения сохранение сложившихся темпов ввода мощностей абсолютно неприемлемо, поскольку необходимо беспрецедентное увеличение среднегодового ввода примерно в 3 раза, для чего требуется тщательный анализ и использование всех предельных возможностей инвестиционного цикла;

2) необходим по возможности полный прогноз ожидаемых изменений всех существенных внешних факторов, и, в первую очередь, ресурсных ограничений, и комплексный анализ новых требований к развитию отрасли, для чего необходимо создать рабочую группу, включающую плановиков, занимающихся капиталовложениями, трудовыми ресурсами, материально-техническим снабжением.

Далее осуществляется возврат к разделу 2 описанной выше процедуры (оценка ресурсных возможностей ввода мощностей и сопоставление их с потребностью), но при более полной и точной оценке показателей.

1.2.4. Анализ возможностей обеспечения ресурсами. Прогноз ресурсных ограничений выполняется прежде всего для трудноуправляемых (например, связанных с природными ограничениями) и дефицитных видов ресурсов. Из них, в первую очередь, выделяются те, по которым наблюдается изменение тенденций.

Результаты прогноза, а также данные по ретроспективе представлены на рис. 1.2 (топливообеспечение газом T_1 , углем T_2 , мазутом T_3 , капиталовложения K , металлы ME , численность $Ч$). По

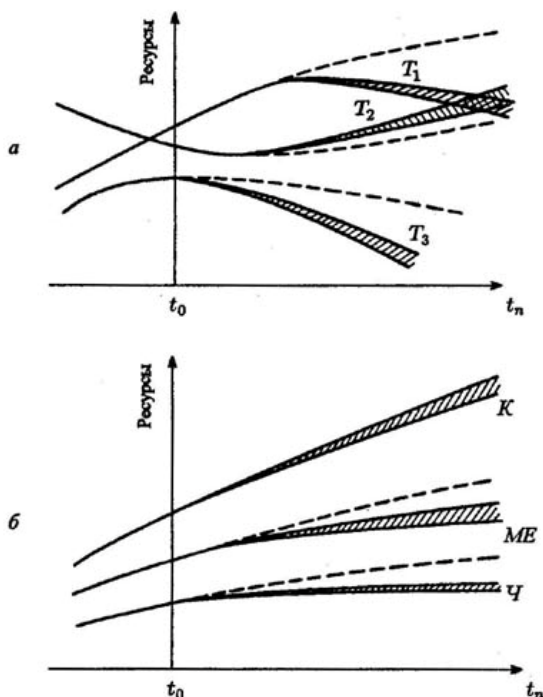


Рис. 1.2

сравнению со сложившимися тенденциями (их сохранению на перспективу соответствуют штриховые кривые) заметные изменения

наблюдаются по следующим видам ресурсов:

- снижение по газу и мазуту (кривые T_1 и T_3 на рис. 1.2 а), что ведет к необходимости перестройки структуры генерирующих мощностей с заменой дешевых газомазутных электростанций более дорогими угольными, атомными и гидростанциями;
- по металлу и численности (кривые ME и $Ч$ на рис. 1.2 б) прирост практически прекращается (10–15 % на конец периода).

На рис. 1.3 а, б показаны более удобные для анализа прирост-

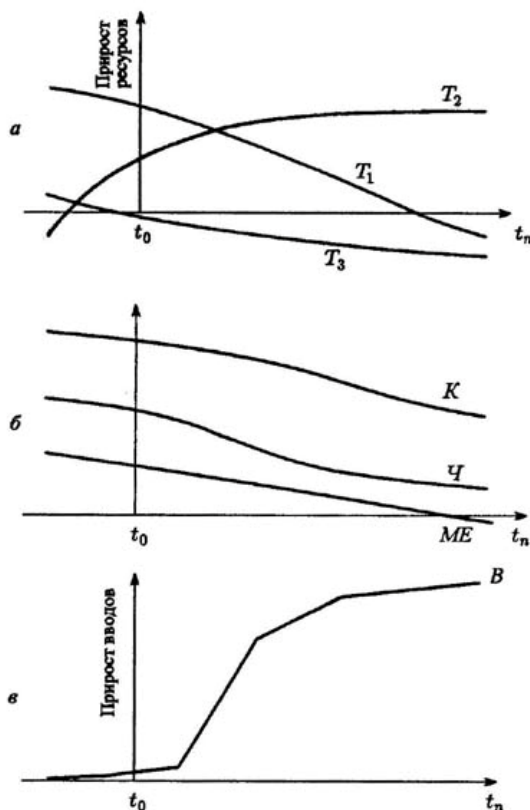


Рис. 1.3

ные показатели, соответствующие данным, представленным на рис. 1.2 а, б. Видно, что почти по всем видам ресурсов ожидается снижение их прироста вплоть до нуля (и даже ниже нуля). В

то же время требуемые приросты ввода мощностей (кривая B на рис. 1.3 ϵ) быстро растут (в 5–7 раз).

Из сопоставления с прошлым периодом (при $t_0 < 0$), в котором при значительно более благоприятных ресурсных возможностях имелся почти нулевой прирост вводов мощностей, можно сделать следующие выводы.

Для реализуемости необходимого уровня вводов мощностей требуется резкое повышение эффективности использования перечисленных ресурсов. Вариант развития должен быть интенсивным даже в том случае, если возможности экстенсивного развития не исчерпаны.

В формируемом новом варианте интенсивного развития эффективность использования ограниченных ресурсов должна быть повышена настолько, чтобы не только нейтрализовать негативную тенденцию к снижению прироста мощности, но и обеспечить в этих условиях быстрый рост вводов и производства.

В связи с этим организационно-методическая группа рекомендует руководителю сформировать рабочую группу по инновациям и дать ей задание на специальную проработку обзора нетрадиционных предложений по направлениям, обеспечивающим кратное снижение капиталоемкости, металлоемкости, трудоемкости, сроков ввода мощностей. Параллельно рекомендуется продолжить реализацию процедуры анализа в направлении получения количественной оценки ситуации (требуемые ресурсы, ранжирование узких мест) и требований к инновациям.

Оценка потребностей в ресурсах требует трудоемких расчетов, поэтому в рабочую группу включаются специалисты по человеко-машинной системе поддержки решений.

Сначала делается грубая оценка удельных расходов и расчет потребности в ресурсах, необходимых для выполнения заданий по требуемому вводу мощностей. Естественно начать расчеты в предположении сохранения достигнутых на данный момент их средних удельных расходов. Результаты приведены на рис. 1.4 (сплошные кривые). Понятно, что в этом случае эксплуатационные расходы на топливо и численность эксплуатационного персонала (соответственно кривые T и $\dot{C}$ на рис. 1.4) растут пропорционально выпуску продукции и удваиваются в конце периода удвоения выработки (кривая E_1 на рис. 1.1). Потребности в капиталовложениях, металле (соответственно кривые K и ME на рис. 1.4), строительных материалах, оборудовании, численности строителей растут пропорционально вводам мощностей с некоторым их опережением и утраиваются к концу периода.

Прогнозируемые верхние уровни ограничений показаны штриховыми кривыми K_0 , $\mathcal{C}_0$, ME_0 , T_0 на рис. 1.4, штриховкой выде-

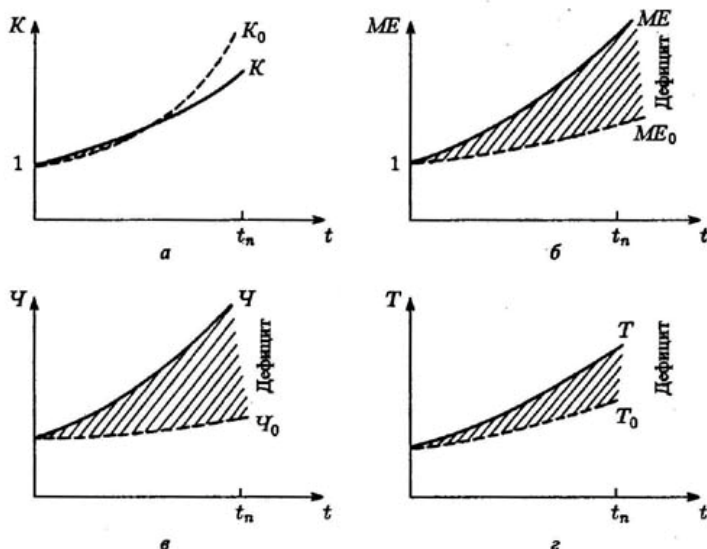


Рис. 1.4

лен дефицит ресурсов. Для сопоставления различных видов ресурсов удобнее использовать степень дефицитности (отношение ограничения к потребности, в процентах). Эти оценки по капиталовложениям, топливу металлу,

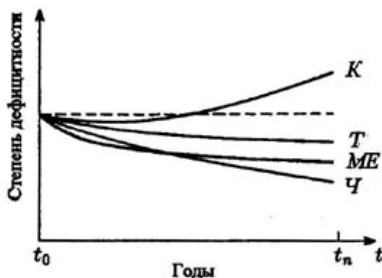


Рис. 1.5

численности (соответственно кривые K , T , ME , $\mathcal{C}$ на рис. 1.5) дают возможность предварительно соотнести существующее состояние с желаемыми будущими состояниями. Например, для достижения намеченных уровней производства к концу планового периода требуется снизить удельную численность примерно до 0,5 (т. е. увеличить

производительность труда в 2 раза) от существующего уровня, металлоемкость — до 0,6 (в 1,7 раза) и т. п.

Влияние ресурсных ограничений на выработку энергии показано на рис. 1.6. Кривая E соответствует исходной потребности,

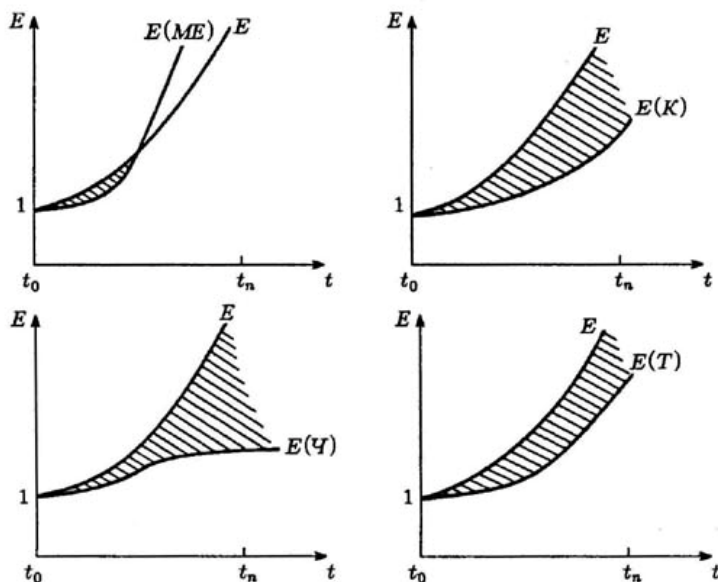


Рис. 1.6

остальные кривые — максимально возможной выработке электроэнергии с учетом каждый раз только одного ограничения: по капиталовложениям $E(K)$; по металлу $E(ME)$; по численности $E(\Psi)$; по топливу $E(T)$.

Совокупное влияние на выработку продукции двух ограничений — по капиталовложениям $E(K)$ и численности $E(\Psi)$ показано на рис. 1.7. В любой момент времени реализуемым будет уровень выработки, удовлетворяющий одновременно всем ограничениям. Соответственно, максимально допустимый уровень выработки будет определяться самым существенным ограничением, дающим в данный момент времени наихудший результат.

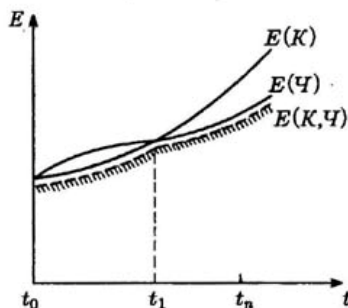


Рис. 1.7

Графически этому соответствует самая нижняя кривая. Таким образом, реализуемая с учетом совокупности ограничений выработка определяется нижней огибающей кривых $E(K)$ и $E(\mathcal{U})$, выделенной на рис. 1.7 штриховкой. Она состоит сначала (до момента t_1) из участка кривой $E(K)$ и определяется ограничением по капиталовложениям, затем из участка кривой $E(\mathcal{U})$ и определяется ограничением по численности.

1.3. Анализ и устранение узких мест развития организации

На рис. 1.8 а показано влияние на выработку энергии всей совокупности рассмотренных факторов. Максимально возможный уровень выработки определяется нижней огибающей, выделенной штриховкой.

На рис. 1.8 б приведена соответствующая динамика степени достижения конечной цели (отношение ограниченного из-за лимитированного ресурса уровня выработки к требуемому уровню), а на рис. 1.8 в приведены значения в фиксированные моменты времени

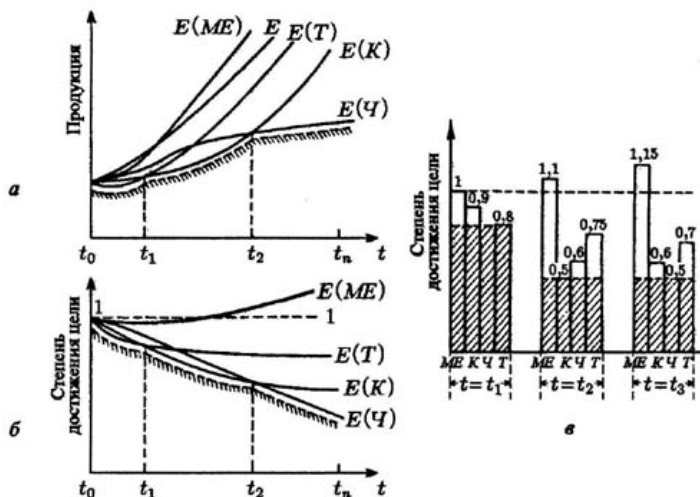


Рис. 1.8

t_1 , t_2 , t_3 . Кривая E соответствует потребности, остальные кривые — ограниченным возможностям производства из-за ограничений на капиталовложения $E(K)$, на металл $E(ME)$, на численность $E(\mathcal{U})$, на топливо $E(T)$. Эти данные позволяют сводной

группе выделить «узкие места» развития, вызывающие их причины и проранжировать их по влиянию на конечный результат по единому показателю степени достижения цели.

Как отмечалось выше, самым существенным ограничением (наиболее «узким местом») в данный момент времени является то, которое ведет к наихудшему результату, т. е. наименьшему значению конечного результата (уровня выработки) и соответственно минимальной степени достижения цели.

На интервале времени от начала планового периода t_0 до момента t_n наиболее существенным узким местом является ограничение на топливо $E(T)$. В момент времени t_1 (последний столбец в первой группе столбцов на рис. 1.8 в) оно определяет степень достижения цели: из-за него выработка снижается до 80 % от требуемого уровня. Следующей по степени достижения цели (90 %) причиной узкого места (снижения выработки) является ограничение $E(K)$ на капиталовложения, остальные ограничения: $E(ME)$ по металлу и $E(Ч)$ по численности — не существенны (степень достижения цели 100 %) в этот момент времени. На интервале времени от t_1 до t_2 наиболее существенно влияет на результат ограничение по капиталовложениям $E(K)$, из-за которого выработка снижается в момент t до 50 % от требуемой, затем ограничение $E(Ч)$ по численности (60 %), затем $E(T)$ по топливу (75 %) и несущественное $E(ME)$ по металлу (110 %) (избыточное по рассматриваемому варианту данных).

На третьем интервале времени (больше t_2) наиболее существенным является ограничение $E(Ч)$ по численности (в момент t_3 степень достижения цели 50 %), затем $E(K)$ по капиталовложениям (60 %), $E(T)$ по топливу (70 %), при несущественном ограничении $E(ME)$ по металлу (115 %).

Очевидно, что для повышения конечного результата средства нужно вкладывать только в наиболее узкие места, имеющие одинаковые значения показателя степени достижения цели. Принцип построения рациональной процедуры выявления и устранения узких мест, дающей наиболее результативное и экономичное решение при использовании минимально необходимого перечня показателей приводится в гл. 4.

По рекомендации организационно-методической группы схема устранения узких мест принимается за основу для определения приоритетных направлений (стратегии изменений) и при координации решения частных задач в распределенной системе.

На рис. 1.9 показаны результирующие кривые, характеризующие влияние ресурсных факторов на конечный результат: выра-

ботку энергии (кривая *а*), степень достижения цели (кривая *б*) и потери дохода (кривая *в*). Как видно, прогнозируемая неполная обеспеченность ресурсами (рис. 1.4) дополнительно ухудшает ко-

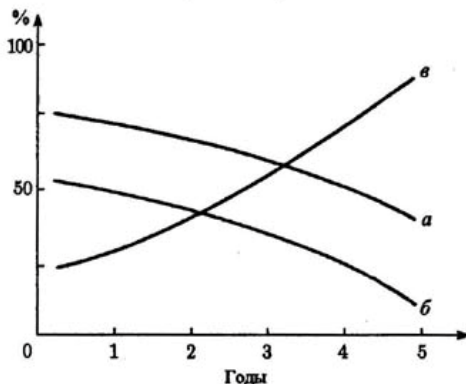


Рис. 1.9

нечные результаты еще на 10–15 %. Это не удивительно, так как выявленные тенденции к резкому ухудшению ресурсного обеспечения (рис. 1.3 *а, б*) при встречном возрастании требований в рассматриваемом экстенсивном варианте развития не компенсируются повышением эффективности использования ресурсов. Можно сделать следующие выводы:

1) характер изменений внешней среды при сохранении сложившихся тенденций развития отрасли ведет к возникновению на всем рассматриваемом периоде времени острых проблем, нерешенность которых может привести к экстремальной ситуации в масштабе региона и народного хозяйства в целом с крупными социально-экономическими потерями;

2) проблема может быть полностью решена только посредством формирования варианта интенсивного развития.

Вариант интенсивного развития должен удовлетворять следующим целевым установкам: *по темпам развития* годовые вводы мощностей должны удвоиться, а затем утроиться; *по повышению эффективности использования ресурсов к концу периода* производительность труда должна вырасти примерно в 2,5–2,6 раза; средняя удельная капиталоемкость снизиться в 2–2,3 раза; средний удельный расход топлива снизиться в 1,2–1,4 раза.

Важно подчеркнуть, что численные расчеты на данном этапе носят вспомогательный характер, а количественные результаты

пригодны только при условии добавления фразы: «если в будущем сохранятся достигнутые средние удельные показатели эффективности использования ресурсов и мощностей».

Необходима структуризация процесса развития и разбиение производственной системы на две подсистемы (рис. 1.10), состоящие на каждый момент времени из существующих мощностей



Рис. 1.10

$x_t^{сущ}$ с показателями эффективности $a_t^{сущ}$ и из новых мощностей $x_t^{нов}$ с эффективностью $a_t^{нов}$. Показатели подсистем связаны с показателями системы в целом a_t , x_t (объединения, отрасли) простыми уравнениями:

$$\begin{aligned} x_t &= x_t^{нов} + x_t^{сущ}, \\ a_t &= k_t^{сущ} a_t^{сущ} + k_t^{нов} a_t^{нов}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где a_t — средние удельные показатели объединения (отрасли), $k_t^{сущ}$ и $k_t^{нов}$ — доли существующей $x_t^{сущ}$ и вновь вводимой $x_t^{нов}$ мощностей в общей мощности системы x_t в момент времени t ;

$$k_t^{сущ} = \frac{x_t^{сущ}}{x_t}, \quad k_t^{нов} = \frac{x_t^{нов}}{x_t}. \quad (1.2)$$

Из условий (1.2) и (1.1) следует, что сумма долей равна единице:

$$k_t^{сущ} + k_t^{нов} = 1. \quad (1.3)$$

Отметим, что все эти данные известны для любого периода в прошлом, включая текущий период времени. На перспективу в качестве начального приближения (опорного варианта) можно рассмотреть наиболее легко реализуемый вариант, в котором не меняются номенклатура и доли вводимых типов технологий, а также их показатели эффективности, а при изменении требований к уровню ввода мощности меняется масштаб использования

каждого типа технологии, причем одинаково. Это предположение типично для планирования «от достигнутого»: например, при увеличении потребности ввода в 1,3 раза ввод каждого вида технологии увеличивается в 1,3 раза от достигнутого. В этом случае значение любого удельного показателя эффективности вновь вводимых мощностей остается неизменным и равным достигнутому в последнем плановом периоде значению.

Уровни существующих $x_t^{\text{сущ}}$ (после вывода физически и морально устаревших мощностей) и новых $x_t^{\text{нов}}$ мощностей в рамках рассматриваемой процедуры известны, и по формулам (1.1)–(1.3) легко вычисляются значения показателя эффективности a_t системы в целом на любые моменты времени.

Если бы полученные оценки отклонения от желаемого варианта оказались приемлемыми, то на этом часть процедуры, связанная с принятием стратегического решения о выборе варианта развития, была бы завершена выбором опорного варианта и переходом к следующему этапу — детальной проработке программы работ.

Однако несмотря на положительные количественные сдвиги, качественного изменения в вышеизложенном выводе не произошло: опорный вариант неприемлем. Налицо проблемная ситуация с поиском рабочего (реального, конкретного, проработанного) варианта развития, который по сравнению с опорным должен иметь улучшенные удельные показатели (к концу периода): по темпам ввода мощностей в первом периоде в 1,9–2 раза (до уточнения было в 2 раза); по снижению удельных капиталовложений в 1,9–2,1 раза (было в 2–2,3 раза); по повышению производительности труда в 2–2,3 раза (было в 2,5–2,6 раза); по снижению среднего расхода топлива в 1,1–1,2 раза (было в 1,2–1,4 раза).

Для решения этой задачи необходим анализ и отбор конкретных мер по развитию. Для того чтобы обойтись минимально необходимой информацией, целесообразно сначала выделить наиболее существенные факторы и рычаги управления.

В части оценки эффективности можно рассмотреть второе простое соотношение (1.1). Из него следует, в частности, что для улучшения средних показателей эффективности достаточно изменения долей и эффективности отдельных технологий.

В каждый момент времени изменение долей (т. е. структурные преобразования) определяется границами $\underline{x}_t$, $\bar{x}_t$ предельных возможностей прироста мощностей данной технологии:

$$0 \leq \underline{x}_t^{\text{нов}} \leq x_t^{\text{нов}} \leq \bar{x}_t^{\text{нов}} \quad (1.4)$$

и ограничивается в первую очередь возможностями строительства.

Границы $\underline{a}_t$ и $\bar{a}_t$ изменения $a_t^{\text{нов}}$ определяются возможностями замены одной технологии на другую, более прогрессивную:

$$\underline{a}_t^{\text{нов}} \leq a_t^{\text{нов}} \leq \bar{a}_t^{\text{нов}} \quad (1.5)$$

Из соотношений (1.1)–(1.3) можно сделать следующие выводы.

1. При оценке и выборе направлений инноваций по их конечным результатам (эффективности) не достаточно учитывать только удельные показатели конкурирующих технологий. Для оценки по конечному результату необходимо также учитывать максимально возможную долю использования каждой технологии. Пусть конкурируют две технологии: при прочих равных показателях первая имеет удельную численность на 50 % лучше существующей, вторая — на 10 %. При этом предельные возможности ввода мощностей, использующих первую технологию, дают возможность покрыть 10 % прироста потребностей, использующих вторую технологию, — 95 %. Тогда в соответствии со вторым соотношением (1.1) снижение средней удельной численности (а значит, и потребности в трудовых ресурсах и повышении выработки) составит при выборе первой технологии примерно 5 %, при выборе второй — 9 %. В итоге выигрывает вторая технология с худшим удельным показателем. Если же возможно использование обеих технологий, то максимальный эффект (12–13 %) получается при покрытии 10 % потребности первой технологией и 90 % — второй, причем основной вклад дает вторая технология.

2. Вариант развития с неизменными долями мощностей и эффективностями технологий (экстенсивный рост, к которому приводит широко используемое планирование «от достигнутого») может приводить только к сохранению сложившейся эффективности. В частности, принятие такого варианта в принципе не может увеличить уровень жизни трудящихся (прибыль и потребление на одного работающего), а может только снизить его при ухудшении внешних условий, например при повышении себестоимости металла, топлива, при наличии инфляции и т. д.

Заключения, полученные рабочей группой аналитиков, использующих расчеты на ЭВМ, передаются в сводную группу. После их рассмотрения руководством даются поручения: аналитикам — сделать оценку тенденции изменений удельной прибыли и уровня жизни работающих в случае сохранения сложившихся тенденций экстенсивного развития организации; методической группе — предложить процедуру (информационную технологию) разработки интенсивного варианта развития с максимальной эффектив-

ностью по конечным результатам: прибыли, выработке электроэнергии, повышению уровня жизни.

1.4. Конкретизация основных направлений и средств развития

Методическая группа предлагает сначала сформулировать и утвердить основные задачи, которые требуется решить на данном этапе процедуры с учетом результатов вышеизложенного обсуждения. Главной целью данного этапа является формирование нового реализуемого варианта развития, отвечающего сформированным требованиям повышения эффективности. Для достижения этой цели могут быть использованы два главных рычага улучшения опорного варианта — это изменение продуктовой политики и технологической структуры мощностей за счет использования мероприятий по строительству и демонтажу; изменение удельных показателей эффективности за счет инновационных мероприятий по техническому перевооружению действующих производств, разработки и создания новых эффективных технологий производства, создания новых технологий управления, включая новые хозяйственно-экономические механизмы, и т. д.

Соответственно, в процедуре необходимо решение следующих задач.

1. Детальное рассмотрение системы с разбиением ее на подсистемы по технологическому признаку (построение технологической структуры) с выделением новых и существующих мощностей.
2. Формирование и оценка реализуемого рабочего варианта с учетом инновационных возможностей.
3. Оценка предельно возможных границ $\underline{x}_t$, $\bar{x}_t$ ввода мощностей по каждой технологии и в целом по системе.
4. Оценка предельно возможных границ $\underline{a}_t$, $\bar{a}_t$ изменения показателей эффективности по каждой технологии и в целом по системе.
5. Выделение главных направлений и ключевых программ работ, способных дать основной вклад в конечный результат.
6. Формирование нового сбалансированного варианта развития.

Для решения этих задач формируются новые рабочие группы, компетентные по конкретным технологиям производства (ГЭС, АЭС, ТЭС и др.) и строительства. Эти группы работают параллельно (ниже приводятся примеры процедур решения этих авто-

номных задач), но по единой методике, разрабатываемой сводной методической группой.

Системообразующие задачи, связанные со структуризацией целей и задач, сводным балансом и выделением ключевых проблем (задачи 1, 6), комплексной оценкой (задачи 5, 6), выбором нового варианта (задача 6) и т. п., должны решаться сводной группой. Рассмотрим детально каждую из задач.

Задача 1. Построение технологической структуры (исполнитель — группа технологов).

Основной целью построения технологической структуры является согласованное решение задач оценки вклада новых технологий, для чего требуется увязка укрупненных средних показателей эффективности объединения с выбором конкретных технических средств, объемов их использования и т. д. На рис. 1.11 показан пример пятиуровневой технологической структуры.

На нижнем уровне находятся *конкретные технологии* (КТ) — установки производства электроэнергии (типы энергоблоков). Именно они и являются в данном рассмотрении конкретной элементарной производственно-технологической единицей, на уровне которой осуществляется реальная производственная деятельность по эксплуатации и развитию.

На рис. 1.12 условно показаны этапы жизненного цикла такой производственно-технологической единицы: исследование, проектирование, испытания, эксплуатация.

По каждому жизненному циклу имеется информация о его состоянии, продолжительности этапов, проектируемых результатах и требуемых ресурсах. Поток жизненных циклов и составляет информационную основу решения задач управления развитием. Собственно любой конкретный вариант (базовый, рабочий и т. д.) развития описывается фиксацией перечня жизненных циклов, значений их показателей и масштабов использования. Значения средних показателей и границ их изменения рассчитываются снизу вверх по структуре (рис. 1.11) по формулам типа второго соотношения (1.1). На вышележащих уровнях рис. 1.11 показаны *укрупненные технологии* (УТ).

Перекрестные связи на рис. 1.11 между нижним и следующим уровнями указывают, для выполнения какой производственной функции создается или может использоваться конкретная технология. Таким образом выделены группы существующих (прямоугольники) и новых (треугольники) технологий, конкурирующих по каждой производственной функции. Например, видно, что по УТ-3.1 конкурируют шесть конкретных технологий.

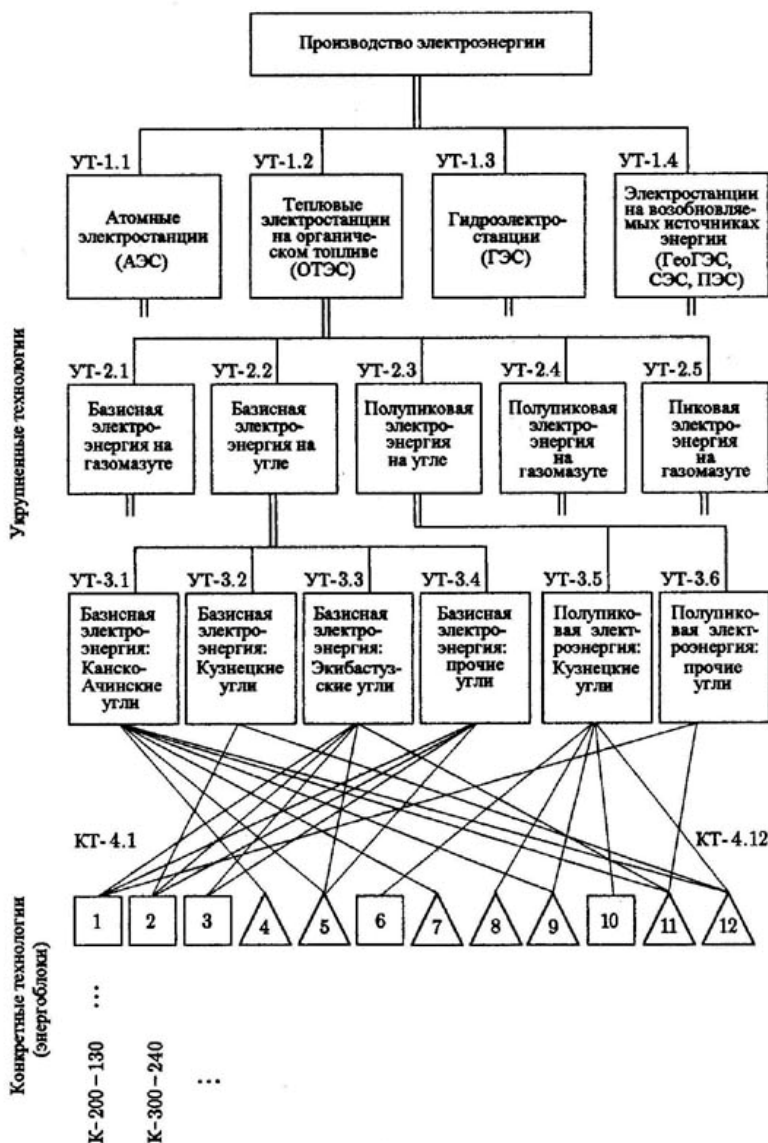


Рис. 1.11

Сверху вниз по структуре принимаются решения о распределении заданий по производству, вводу мощностей, распределению ресурсов. Представленная рабочей группой технологов полная технологическая структура, фрагмент которой приведен на рис. 1.11, включает сотни технологий. Поэтому сводная группа приходит к выводу, что проведение полного анализа за ограниченное время



Рис. 1.12

невозможно и, главное, что эту функцию явно не рационально осуществлять руководству верхнего уровня. На его уровень целесообразно выносить минимум наиболее существенных технологий и их показателей.

Методическая группа предлагает сформировать этот минимальный набор с участием всех групп (в том числе сводной) по следующей схеме:

- 1) уточнение (сверху вниз) требований, которым должны удовлетворять отбираемые технологии;
- 2) выбор и оценка (снизу вверх) технологий и формирование основных направлений.

Задача 2. Оценка рабочего варианта развития (исполнитель — сводная группа).

В реальных процедурах в любой момент времени имеется хотя бы один сквозной рабочий вариант развития организационной системы на перспективу. Необходимо сформировать улучшенный вариант, максимально использующий потенциальные возможности новых технологий и структурных изменений.

Для ориентировки рабочих групп в выделении главных направлений сводная группа передает им уточненные целевые установки (требования к улучшению средних удельных показателей рабочего варианта). При уточнении требований учтена новая информация о резком (на 30–40 %) снижении капиталовложений на производственные нужды. Это делает финансовые ресурсы наиболее дефицитными в ближайшем периоде.

Задача 3. Оценка предельно возможных границ ввода мощностей (исполнитель — группа аналитиков).

Пусть выполненные соответствующими рабочими группами оценки по укрупненным технологиям представлены в сводную группу. На рис. 1.13 показаны результаты для укрупненных технологий верхнего уровня. На графиках представлены верхняя граница вводов $B_{\max}$, предельные технологические возможности вводов B и нижняя граница вводов $B_{\min}$, соответствующая сохранению тенденций. Штриховыми кривыми в нижней части рисунка

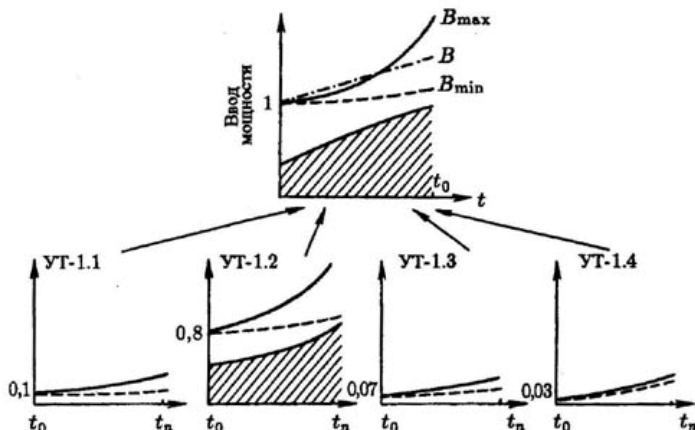


Рис. 1.13

выделена часть (доля) мощностей, которая может быть обновлена за счет использования новых, не вошедших в рабочий вариант технологий и за счет технического перевооружения существующих предприятий. Рабочая группа считает этот последний показатель существенным, так как почти все показатели эффективности технического перевооружения (удельные капиталовложения, трудовые ресурсы, металлоемкость, продолжительность работ и т. д.) значительно лучше, чем у нового строительства или продления срока службы физически и морально устаревшего оборудования (данные рабочего варианта представлены заштрихованной областью).

Анализ данных, представленных на рис. 1.13, показывает, что в целом (верхняя часть рисунка) в первый период времени даже технологически максимально возможный ввод мощностей не обеспечивает требуемого уровня из-за отсутствия необходимых заде-

лов. В связи с этим необходима корректировка исходных целевых установок по вводам мощностей и, возможно, по производству энергии.

По отдельным технологиям (нижняя часть рис. 1.13) сопоставление возможностей покрытия потребности показывает, что наименьший вклад в удовлетворение спроса (3–5 %) может внести УТ-1.4 (возобновляемые источники и прочие). В условиях дефицита финансов эта технология, требующая высоких удельных капиталовложений, не может дать сколько-нибудь заметного (более 10 %) вклада в повышение эффективности в целом на рассматриваемый период, но хорошие экологические показатели УТ-1.4 обуславливают форсирование разработок в этом направлении. Сводная группа приходит к следующему выводу: включить создание технологий УТ-1.4 в число важнейших научно-исследовательских разработок с целью максимального ускорения создания и опытно-промышленных испытаний, по завершении которых (через 3–5 лет) вернуться к переоценке масштабов промышленного использования. Пока же в рамках главных направлений массового использования эту укрупненную технологию можно не рассматривать (что даст погрешность в оценках эффективности около 1–2 %).

Технологические возможности ввода гидроэлектростанций и атомных электростанций ограничены в рассматриваемом периоде из-за высокой инерционности. Кроме того, в этом периоде у них практически нулевая доля новых технологий, и дать сколько-нибудь заметного улучшения эффективности по сравнению с опорным вариантом они не могут.

Основной вклад (до 80–90 %) в повышение эффективности может дать технология УТ-1.2 — тепловые электростанции. Они могут обеспечить большую часть вводов, причем значительную часть из них за счет технического перевооружения. К тому же они имеют наиболее благоприятные удельные показатели среди существующих мощностей и значительную долю новых, не рассмотренных в рабочем варианте технологий. Главным ограничением является ограничение по топливу, и прежде всего по газу. Поэтому первоочередное внимание необходимо уделить поиску новых технологий, повышающих эффективность использования топлива и пригодных для использования в зданиях.

Задача 4. Оценка предельных границ изменения показателей эффективности укрупненных технологий.

При наличии системы поддержки решений и базы данных по новым и существующим технологиям производятся вычисления

в автоматическом режиме, а затем идут целенаправленные уточнения. В противном случае сначала дается быстрая грубая экспертная оценка тенденций и порядка величин, затем выделяются ключевые инновационные направления и целенаправленно создается база данных по наиболее приоритетным разработкам.

Предварительные результаты деятельности рабочих групп, составленных из представителей научно-исследовательских и строительных институтов по подотраслям (УТ-1.1–УТ-1.4), представлены на рис. 1.14. Оценки укрупненных технологий даны относительно среднего значения показателя (K — удельные капита-

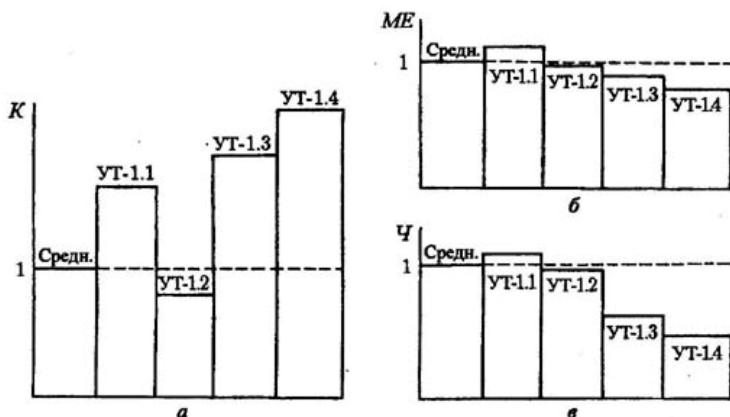


Рис. 1.14

ловложения, ME — удельная металлоемкость, $Ч$ — удельная численность) по отрасли, принятого за единицу (пример носит условный характер).

Задача 5. Выделение главных направлений и ключевых программ работ, вносящих основной вклад в конечный результат.

Анализ рис. 1.14 показывает, что первые две технологии в среднем сохраняют металлоемкость и удельную численность, ухудшая удельные капиталовложения. Тем не менее в целом есть возможность существенного улучшения показателей эффективности на 20–30 %.

Основной вклад (до 80–90 %) может дать третья технология (УТ-1.3 — тепловые электростанции). Причем вклад более 90 % может дать использование на ТЭЦ новых высокотемпературных технологий с парогазовыми установками (ПГУ), газотурбинными установками (ГТУ) и утилизацией тепла. Остальной вклад

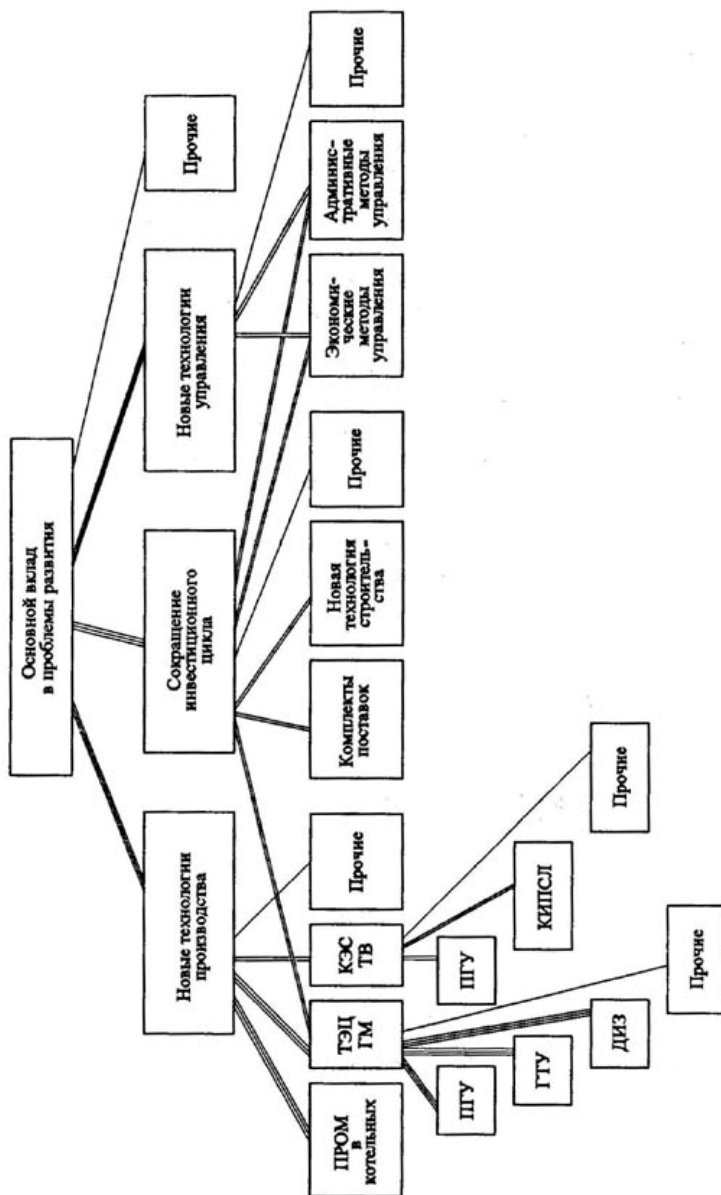


Рис. 1.15

(около 10 %) обеспечивается прочими новыми технологиями (в том числе ПГУ с газификацией угля, малогабаритными котлами с интенсификацией теплообмена в кипящем слое и др.). Особенно выгодны новые паросиловые энергоустановки.

Таким образом, выделено главное по конечному результату направление технической политики, которое может обеспечить к концу рассматриваемого периода решение проблемы устранения узких мест, связанных с ресурсными ограничениями.

На рис. 1.15 показана часть технологической структуры, соответствующая основным направлениям технологической перестройки, которые следует довести до конкретных технологий на следующем этапе.

Возможности ввода мощностей в первом, переходном периоде прежде всего определяются инерционностью мероприятий по развитию, в частности, сроками завершения строек. Соответственно главным направлением изменений, обеспечивающим повышение степени достижения конечной цели в этом периоде, является *сокращение продолжительности инвестиционного цикла*. Ретроспективный анализ показывает, что срывы вводов крупных блоков

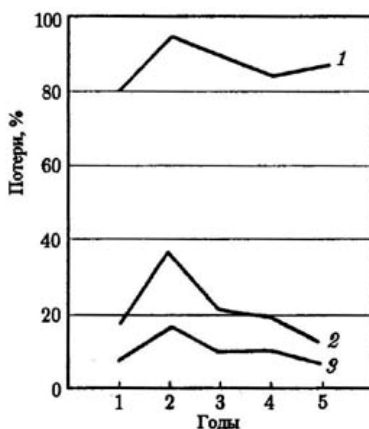


Рис. 1.16

(кривая 1 на рис. 1.16) в 3–4 раза больше, чем на прочих (кривая 3), и в 2–2,5 раза больше, чем в среднем (кривая 2) по отрасли.

Существенно сократить инвестиционный цикл в среднем можно только замещением объектов с длинным циклом на объекты с коротким циклом посредством внедрения *новых технологий производства*. В этом плане наиболее выгодны паросиловые энерго-

установки типа ПРОМ (см. Приложение), срок установки которых в 7–10 раз меньше, чем у ТЭС.

Наконец, третье направление, от которого можно ожидать крупных результатов, — *совершенствование технологий управления*. К новым технологиям управления относятся в первую очередь: технология реформирования предприятий; интенсивные варианты развития; методы принятия наиболее выгодных решений; противозатратные механизмы, снимающие проблему дефицита ресурсов (налоговый, конкурсный и другие механизмы); системы стимулирования работ по конечному результату и др.

Итак, первый этап анализа узких мест и возможных средств их устранения завершается выделением главных конкретных направлений изменений, дающих до 80–90 % вклада в решение проблем развития (тройные линии на рис. 1.15):

- массовое использование паросиловых энергоустановок (типа ПРОМ), ПГУ-ТЭЦ и ГТУ-ТЭЦ;
- сокращение продолжительности инвестиционного цикла;
- совершенствование хозяйственного механизма.

1.5. Формирование варианта интенсивного развития

После принятия предложенных основных направлений решения проблем развития начинается этап формирования сбалансированного варианта развития, являющегося корректировкой рабочего варианта с учетом инновационных возможностей.

Для этого по рекомендации методической группы сначала формируется максимально широкий перечень проектов по созданию конкретных технологий по направлению, делается отбор конкурентоспособных технологий, затем по их удельным показателям эффективности уточняются средние удельные укрупненные технологии. Далее определяется рациональная степень замещения одних УТ другими с постоянным контролем комплексного сводного баланса продуктов, мощностей и ресурсов. Процедура носит распределенный и итерационный характер: автономные задачи по УТ решаются специалистами-технологами и руководством производственных подразделений; частные балансы — специалистами и руководителями функциональных подразделений; координация частных решений, сводный баланс, комплексная оценка по конечному результату осуществляются сводной группой. Вручную эти задачи практически неразрешимы, и все группы используют человеко-машинную распределенную систему формирования согласованных решений, описанную в следующих главах.

Приведем лишь краткое описание некоторых фрагментов этой сложной процедуры, соответствующих главному направлению связанному с паросиловыми установками ПГУ, ГТУ. При их использовании, как показывает многолетний опыт, решение перечисленных ниже сложных задач ускоряется в десятки раз.

Выделим в технологической структуре (рис. 1.15) группы технологий, разделив тепловые электростанции: по топливу — на использующие газ (ТЭС газ.) и твердое топливо (ТЭС тв.); по видам продукции и конструкции — на конденсационные электростанции (КЭС), производящие электроэнергию, и на ТЭЦ, производящие теплоту и электроэнергию.

В полученных укрупненных технологиях выделим конкретные типы, учтенные в базовом варианте (ТЭЦ газ., базисная и т. п.) и новые, рассматриваемые дополнительно. Результатом является технологическая структура, показанная на рис. 1.17.

На этом фрагменте технологической структуры возможно расширение перечня альтернативных проектов, которое осуществляется экспертами в данной области технологий (например, ТЭЦ газ.) на основе базы данных, включающей все известные сведения (данные об изобретениях, лицензиях, отечественных и зарубежных НИОКР, опытных образцах и т. п.). В результате определяется перечень технологий нижнего уровня, в который входят газотурбинные (ГТУ) и парогазовые (ПГУ) установки для КЭС и ТЭЦ (ГТУ-ТЭЦ, ПГУ-ТЭЦ, дизель-ТЭЦ и др.), паросиловые энергоустановки для котельных (ПРОМ) и др.

Далее проводится анализ конкурентоспособности выделенных технологий. Например, ГТУ имеют в 2–3 раза лучшие удельные показатели по численности, металлоемкости, капиталовложениям, срокам строительства. Кроме того, ГТУ при одинаковой мощности занимают в несколько раз меньший объем, чем ПГУ, что удобно при техническом перевооружении старых электростанций.

Особый интерес представляют комбинированные установки ТЭЦ, у которых при том же расходе газа и выработке теплоты, что и у традиционных паротурбинных ТЭЦ, выработка электроэнергии может быть выше: у ПГУ-ТЭЦ примерно в 2 раза; у дизель-ТЭЦ в 1,7 раза; у ГТУ-ТЭЦ в 1,5 раза. Такой эффект достигается за счет перехода газовой турбины на более высокие начальные температуры газов, которые после турбины сбрасываются в котел-утилизатор для получения теплоты. При этом прогнозируется увеличение КПД ГТУ в 1,5–2 раза (включая керамические ГТУ). Еще более выгодны энергоустановки типа ПРОМ (см. Приложение).

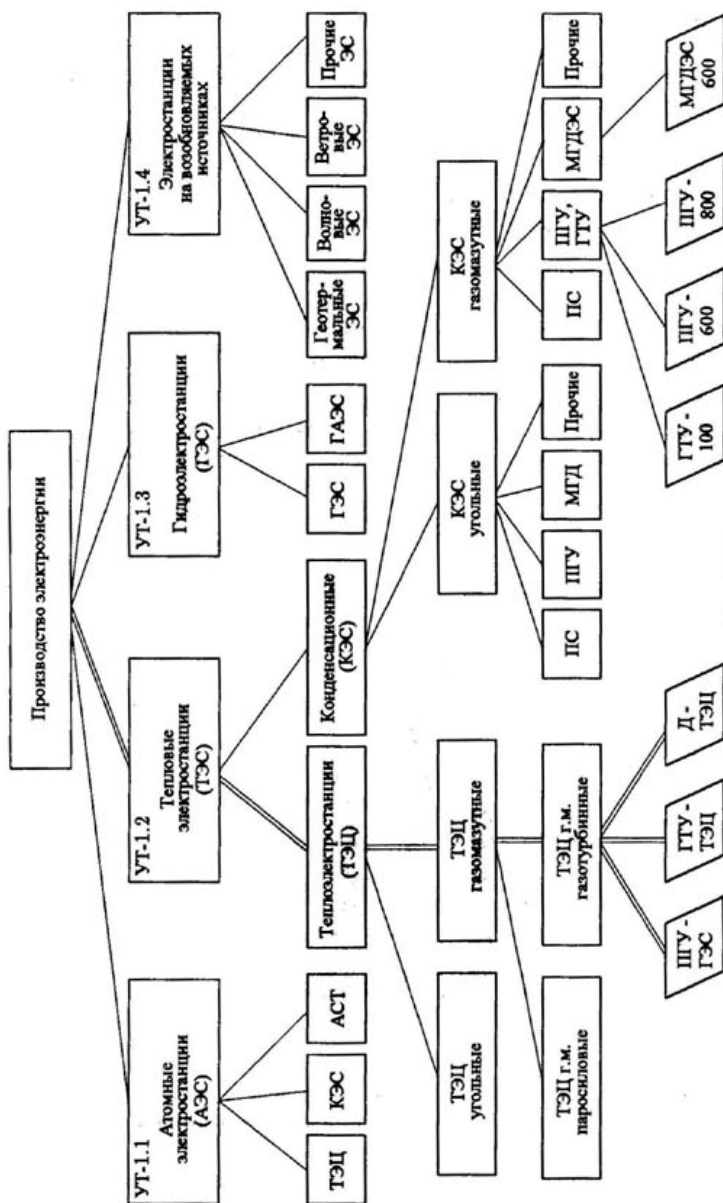


Рис. 1.17

Итак, можно сделать вывод о целесообразности принятия стратегии приоритетного и максимально возможного использования установок типа ПРОМ в котельных, ГТУ-ТЭЦ и ПГУ с доведением до этапа разработки программы работ, календарного плана их выполнения и выбора системы управления реализацией.

1.6. Информационные технологии анализа предельных возможностей развития

Рассмотрим второе направление (см. рис. 1.15) решения проблем развития — сокращение инвестиционного цикла энергоблоков, ограничившись типовыми задачами формирования инвестиционной программы в части строительства.

1.6.1. Анализ сложившихся тенденций. Из рис. 1.18 видно, что плановые бюджетные ресурсы (заштрихованные колонки) осваиваются практически полностью, тогда когда результаты (черные

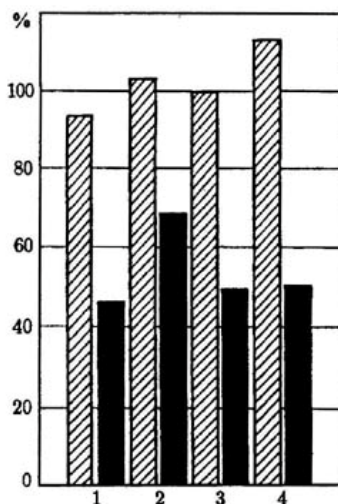


Рис. 1.18

колонки) составляют 50–70 % от плановых, что требует объяснений и мер по устранению существенного снижения использования ресурсов.

Пусть ретроспективный анализ фактической продолжительности строительства показывает, что средняя продолжительность

строительства при размахе от нормативной до более чем двойной нормативной составляет примерно 1,7–1,8 от нормативной.

На рис. 1.19 показано соотношение нормативных (вверху) и средних фактических (внизу) продолжительностей по этапам строительства: 1 — нулевой цикл, 2 — строительные работы, 3 — монтаж оборудования, 4 — пусконаладка. Видно, что завершающие этапы 3 и 4 практически не отличаются от нормативных, и основное отставание (примерно вдвое) происходит на первых двух

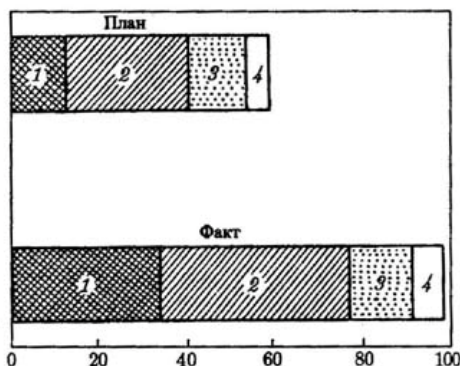


Рис. 1.19

этапах. Соответственно, максимальный выигрыш получается при исключении нулевого цикла и строительных работ. Это происходит, например, если для прироста электрогенерирующих мощностей выбираются энергоустановки типа ПРОМ (см. Приложение), монтируемые в действующих котельных и не требующие строительных работ.

1.6.2. Анализ влияния продолжительности строительства на вводы мощностей. На текущий момент известны состояние работ, оставшиеся объемы и нормативная продолжительность строительства каждой переходящей или вновь начинаемой проектируемой стройки. Это дает возможность, меняя продолжительность строительства, получить оценку динамики вводов мощностей по годам.

На рис. 1.20 показана типичная зависимость (кривая 1) суммарных вводов (степень достижения цели в долях от требуемого уровня) на ближайшие годы от средней продолжительности строительства. Верхний предел (1,6) изменения этого фактора (в долях от нормативной продолжительности) взят из анализа средней

фактической продолжительности, нижний предел (0,6) соответствует лучшим мировым достижениям. Результаты количественно подтверждают сделанное ранее качественное предположение о том,

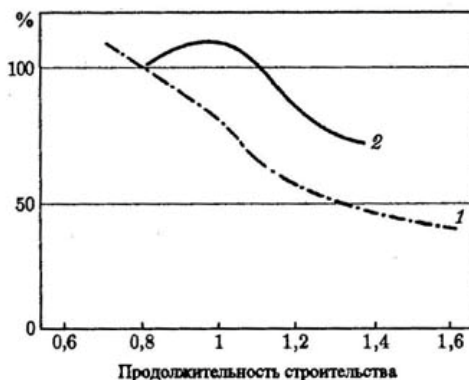


Рис. 1.20

что продолжительность строительства является очень существенным показателем. При этом можно сделать следующие выводы:

1) сохранение сложившейся средней продолжительности строительства (1,6 от норматива) неприемлемо, так как ведет в данном условном примере (рис. 1.20) лишь к 30–40 % выполнения требуемых вводов;

2) переход на нормативную продолжительность является недостаточной мерой для обеспечения требуемых вводов (степень достижения цели 0,7–0,8 %);

3) достижение поставленной цели возможно при сокращении фактически сложившейся продолжительности примерно вдвое.

Сплошной кривой 2 на рис. 1.20 показан результат расчета требуемых финансов. Видно, что при сокращении сроков требуемые финансы (в долях от максимума) сначала растут примерно с тем же темпом, что и вводы, затем в районе нормативной продолжительности стабилизируются и далее даже несколько снижаются, что является неожиданным эффектом (увеличение вводов при снижении капиталовложений и строительно-монтажных работ) и требует более подробных объяснений. Необходимую структуризацию дает рис. 1.21, на котором показана зависимость во времени требуемых объемов строительно-монтажных работ для двух вариантов: с нормативной продолжительностью (кривая 1) и с продолжительностью 0,8 от норматива (кривая 2). Видно, что при сокращении

продолжительности строительства сначала значения требуемых объемов на кривой 2 примерно на 5–7 % больше, чем на кривой 1,

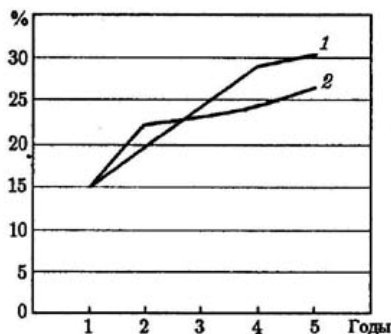


Рис. 1.21

но затем рост замедляется и к концу периода становится меньше примерно на 15–20 %. Происходит это за счет быстрого сокращения доли затрат на задельные стройки (сектор А на рис. 1.22) и резкого (вдвое) увеличения доли затрат на пусковые стройки

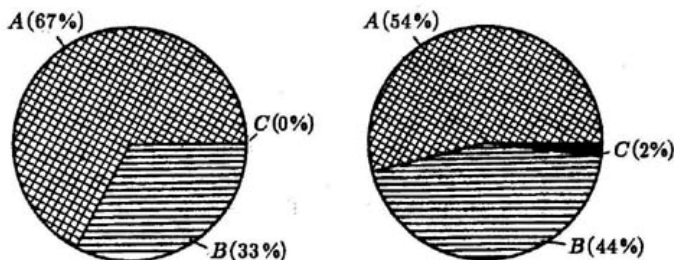


Рис. 1.22

(сектора В и С на рис. 1.22), что неудивительно, так как при фиксированных сроках ввода увеличиваются сроки начала задельных строек.

1.7. Технология реформирования предприятия

1.7.1. Основные факторы успеха. Анализ множества практических примеров улучшения финансово-экономической эффективности российских предприятий и рассмотренного выше условного примера дает возможность выделить некоторые общие для всех

факторы успеха и построить типовую технологию их реализации. В результате теоретических исследований (см. гл. 3 и 5) и глубокого анализа моделей и методов управления «от желаемого результата» сделан ключевой вывод о возможности регламентирования процедуры принятия решений на основе схемы выявления и устранения «узких мест».

Главным условием конкурентоспособности организационной системы является экономическая эффективность использования

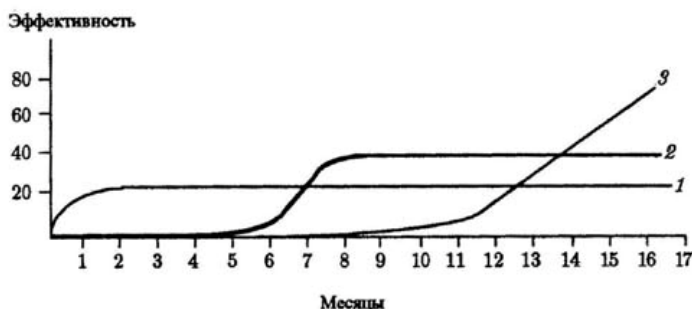


Рис. 1.23

имеющихся ресурсов. Основными показателями при этом являются рентабельность, увеличение выручки, производительность труда, снижение материало- и энергоемкости.

Можно выделить всего три группы основных средств повышения эффективности любой организационной системы (рис. 1.23).

1. Выявление и использование имеющихся резервов за счет формирования заинтересованности людей в полной отдаче и повышении эффективности *быстрореализуемых управленческих решений* по устранению «лежащих на поверхности узких мест».

Основным средством здесь является создание и практическое использование эффективного (по конечным результатам) комплексного механизма управления, который должен включать механизмы мотивации, активизации и стимулирования труда, противозатратные механизмы, механизмы ценообразования, технологию управления по конечным результатам, человеко-машинные технологии принятия рациональных решений, повышение профессионального уровня руководителей в области управления и т. п. Эта группа средств может дать быстрый (за месяцы) прирост с минимальными затратами эффективности с выходом на предел, определяемый исчерпанием существующих производственно-технологиче-

ческих возможностей предприятия (кривая 1 на рис. 1.23). Совершенствование механизмов управления продолжается непрерывно и является залогом успеха в последующий период за счет коренных изменений системы управления.

2. *Структурные изменения* за счет снижения доли неэффективных технологий и низкорентабельных видов продукции (из числа существующих).

Основными средствами реализации подобных структурных изменений являются техническое перевооружение, реконструкция с выбором рациональной ассортиментной политики, сформированной с учетом маркетинговой информации. Эта группа мер может быть в 2–3 раза более эффективной и более инерционной, чем первая. Она может дать основной прирост эффективности на несколько кварталов с выходом на предел, определяемый исчерпанием возможностей существующих технологий (кривая 2 на рис. 1.23).

3. Создание и рациональное использование новых видов продукции, услуг и новых технологий за счет активизации *инновационных процессов*.

Основным средством является подготовка и проведение программ по внедрению разрабатываемых мероприятий (инновационные программы) по новой продукции, новым технологиям, новым методам управления (кривая 3 на рис. 1.23).

Первые две группы средств имеют разовый характер, и достигнутый результат может быть со временем сведен к нулю. Главное отличие третьей группы средств, основанных на использовании инноваций, — это постоянно растущие со временем возможности многократного повышения эффективности. Результатом применения этой группы средств является создание совершенной системы управления, обеспечивающей конкурентоспособное саморазвитие организаций без участия консультантов.

Рассмотрим более подробно структурные изменения, которые могут привести к изменению эффективности функционирования и развития предприятия в целом. При этом имеется всего лишь два основных способа управления структурой:

- 1) создание новых видов продукции и технологий ее производства, обладающих лучшими удельными технико-экономическими показателями, чем существующие;
- 2) изменение пропорций (долей) выпуска продукции, мощностей и технологий ее производства.

Структурные решения (выбор пропорции развития ключевых инновационных направлений), дающие главный вклад в повыше-

ние эффективности производства, относятся к стратегическим и входят в компетенцию высшего руководства, остальные — к тактическим и решаются автономно руководителями подразделений. Как правило, реализация стратегических решений требует координации многих служб, значительных затрат времени и средств и осуществляется в рамках долгосрочных комплексных программ.

Таблица 1.1

Наименование средств	Принятая оценка, %	Исходные экспертные оценки, %
Быстро реализуемые резервы (за счет управленческих решений)	15–20	5–7, 20–30, 40
Структурные изменения при существующих технологиях и продуктах	20–25	10, 25, 40, 50
Инновационные проекты (новые продукты и технологии)		
1-й год	15–20	10, 25, 30
2-й год	50–60	40, 50, 60–65
ИТОГО		
1-й год	50–65	
2-й год	50–60	
Всего за 2 года	100–125	

Разработка последних ведется от «конечных целей» и должна предшествовать разработке среднесрочных и краткосрочных планов.

В табл. 1.1 приведен пример оценок резервов повышения экономической эффективности для ОАО «Чайковский текстиль». Эти оценки являются типичными для российских предприятий.

Как отмечалось, основной вклад в улучшение финансово-экономического состояния предприятия связан с переходом на технологию управления по результатам, которая обеспечивает повышение эффективности использования собственных ресурсов организации, включая активизацию и развитие имеющегося инновационного потенциала, а также укрепление «боевого духа» коллектива.

Рабочая методика основана на *комплексной схеме стратегического управления изменениями*, координирующей усилия всех подразделений и фокусирующей их на решении ключевых вопросов, дающих основной вклад в конечный результат, в сочетании с усиленной работой с персоналом (выработка мотивации на достижение результатов, обучение, эффективную работу в единой команде).

Для улучшения конечного результата необходимо вкладывать средства только в наиболее узкие места, имеющие одинаковые значения показателя степени достижения цели. По рекомендации консультантов схема устранения узких мест принимается на предприятии за основу при координации решения частных задач в распределенной системе.

Программа работ выполняется в две стадии.

Стадия 1. Определение и реализация первоочередных («пожарных») мер, цель которых — предельно быстро остановить процесс ухудшения ситуации и начать создавать условия и заделы для ее улучшения. К таким мерам относятся объявление «чрезвычайного положения», экспресс-диагностика состояния предприятия, укрепление «боевого духа», создание управленческой команды, выработка первой версии стратегии и антикризисной программы. Первая версия антикризисной программы, как правило, включает меры по финансовому оздоровлению, выявлению и быстрому (за 2–3 месяца) использованию уже имеющихся и «лежащих на поверхности» резервов.

Стадия 2. Углубленная проработка главных направлений (таких как изменение ассортиментной политики, изменение организационной структуры, освоение новой системы управления финансами, переподготовка персонала и др.), требующих более продолжительного времени на реализацию (3–4 квартала). Эта стадия начинается параллельно с реализацией первоочередных мер.

Стадия 1 соответствует комплексной оценке состояния предприятия, выработке стратегии и первоочередных мер, на которую обычно отводится месяц. Стадия 2 — ничто иное, как санация предприятия (конкретизация программы работ по выходу из кризисного состояния и ее реализация).

Состав и логическая последовательность этапов технологии работы на этих стадиях в общем похожи и соответствуют логике стратегического анализа, но различаются глубиной проработки, продолжительностью и методами реализации.

Рассмотрим более подробно этапы технологии для стадии 1.

1.7.2. Описание технологии реформирования предприятия. Можно выделить следующие этапы технологии:

- 1) определение целей развития и критериев их достижения;
- 2) анализ сильных и слабых сторон предприятия;
- 3) общая диагностика состояния и тенденций;
- 4) анализ финансового состояния;
- 5) анализ «проблемного поля» и выделение ключевых проблем;

- 6) формирование путей и проектов решения проблемы (с использованием технологии мозгового штурма);
- 7) оценка инновационного потенциала;
- 8) выделение приоритетных направлений деятельности (стратегий);
- 9) прогноз, анализ и оценка вариантов реформирования предприятия;
- 10) разработка программы реформирования;
- 11) оценка источников ресурсов;
- 12) распределение ресурсов;
- 13) выделение первоочередных проектов;
- 14) формирование команд;
- 15) проработка и защита первоочередных проектов;
- 16) выбор и фиксация стратегии и программы реформирования;
- 17) определение первоочередных организационных шагов.

Рекомендуемый порядок выполнения этапов стадии 1 показан на блок-схеме (рис. 1.24). Отметим, что чисто технологически этапы 2–4 можно выполнять параллельно с этапом 1. Но эффектив-

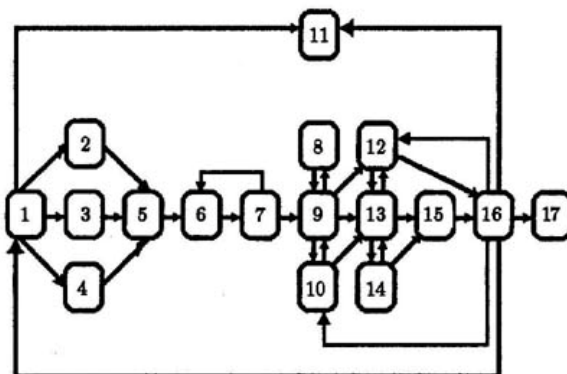


Рис: 1.24

ная реализация намечаемых программ невозможна без формирования единой команды, работающей на общий результат. Поэтому рекомендуется сначала сформировать цели и критерии (этап 1), на котором явно и неявно происходит выработка общей системы ценностей и формируется психологическая мотивация каждого как участника общего нужного дела, а затем переходить к этапам 2–4.

Встречные стрелки означают итерационное взаимодействие в процессе выполнения этапов. Как показывает практика, оценка потенциала в первом приближении не дает существенных результатов, а на втором или третьем цикле возникают новые и оригинальные предложения, удваивающие потенциальные возможности предприятия по повышению его эффективности. Обратная связь между этапом 7 и 6 соответствует повторению двух-трех циклов поиска путей решения проблем.

Обратная связь между этапами 16 и 12, 16 и 11, 16 и 10 возникает в связи с неудовлетворительной оценкой вариантов реализации стратегии при ограниченных ресурсах. Здесь возможны либо поиск новых источников ресурсов и их перераспределение, либо включение в программу ресурсосберегающих работ, мер по поиску и подготовке дефицитных кадров и т. п.

Обратная связь 16 и 1 означает возможность корректировки исходных критериев и целей.

Глава 2

Научно-методические основы разработки распределенных систем формирования согласованных решений

При всем разнообразии рассмотренных в гл. 1 распределенных процедур в них можно увидеть много общего. Это прежде всего — типовые этапы и общие представления (модели) процесса формирования решений, типовые задачи и методы их решения.

Данная глава посвящена не претендующему на методологическую полноту краткому изложению принятых в работе основных методических положений разработки *распределенной системы формирования согласованных решений* (РСФСР). Они включают:

- выбор методологического подхода, определяющего логическую основу;
- сценарий распределенных человеко-машинных процедур (схему управления по результатам, включающую программно-целевой подход в сочетании с экономическими методами управления);
- определение основных понятий; общие требования к инструментарию — к человеко-машинной *распределенной системе поддержки принятия решений* (РСППР), моделям и методам;
- принятый подход, позволяющий удовлетворить эти требования. Основное внимание уделяется вопросам объединения различных средств в единую систему.

В заключение дается краткая характеристика основных инструментальных средств и возможностей их использования для массовой разработки человеко-машинных информационных технологий.

2.1. Системный и программно-целевой подход к задачам развития

2.1.1. Общие положения. Как уже говорилось, данная книга посвящена вопросам разработки и использования человеко-машинных (ЧМ) *распределенных систем формирования согласованных решений* (РСФСР) при управлении *организационно-технически-*

ми системами (ОТС). Поясним кратко каждое из этих понятий и затем раскроем их подробнее.

Распределенность системы (разбиение задач на более простые подзадачи и распределение подзадач по исполнителям, компетентным в их решении) следует из сложности задач и сложной структуры самой ОТС. В качестве ОТС может рассматриваться как народное хозяйство в целом (и его многоуровневая структура как единое целое), так и любой элемент этой структуры: комплекс отраслей, отрасль, подотрасль, объединение (в общем случае научно-производственное), предприятие, подразделение, рабочее место.

Управление ОТС понимается в широком смысле как сложный процесс, включающий прогнозирование, принятие решений при планировании и коррекцию плановых решений (оперативное управление) и т. п. В данной книге из всего комплекса задач управления ОТС, охватывающих функционирование и развитие, основное внимание уделяется управлению развитием (воспроизводственным циклом). В качестве ОТС рассматриваются отрасль, объединение и рабочее место управления.

В любой ОТС выделяются три основных рассматриваемых компонента и их представления (модели): *человек или коллектив, управляемый объект* (процесс, технология материального производства, техническая, машинная часть системы) и *процесс управления* (процедура, информационная технология), объединяемые в целостную *человеко-машинную систему* (ЧМС).

При учете в ЧМС управления человеческого фактора основополагающими являются предположения о целеустремленности и активности индивидуумов и коллективов. Отсюда естественно вытекает принятие в качестве основного подхода к решению сложных задач развития больших ОТС разновидности системного подхода — программно-целевого подхода, делающего главные акценты на цели (управление от конечных результатов) и программы работ, обеспечивающие достижение этих целей. При решении задач на уровне рабочего места учитывается ряд предположений об ограниченности возможностей пользователя по объемам и методам переработки информации, о требованиях к алгоритмам, специализации и др.

Производственные процессы объекта управления описываются по схеме «ресурс–процесс–продукт», где процесс характеризуется двумя основными группами показателей: производственными мощностями (их структурой и уровнями) и их эффективностью. По аналогичной схеме «вход–процесс–выход» описываются и информационные процессы.

При построении формальных моделей (аналитических, имитационных и т. д.) используется аксиоматический подход, который дает возможность корректно включать формальные модели и алгоритмы в неформальные процедуры, описывающие человеко-машинные информационные технологии. При этом в ЧМС не человек должен подстраиваться под формальную модель, а модели и ЭВМ должны быть удобным инструментом пользователя, несущего ответственность за результаты решения задачи.

Процесс управления представляется как совокупность типовых и новых нестандартных задач формирования и принятия решений и соответствующих им типовых или вновь формируемых человеко-машинных информационных технологий (ЧМ ИТ). ЧМ ИТ формируются с использованием алгоритмов и программ на ЭВМ, для обоснования которых используются модели и методы различных областей прикладной математики. Именно процесс моделирования в широком смысле слова и является основой, стержнем распределенных систем формирования согласованных решений.

Остановимся на некоторых понятиях подробнее.

2.1.2. Особенности человеческой деятельности. Отметим некоторые особенности человеческой деятельности, определяемой в философской и психологической литературе как внутренняя и внешняя активность, регулируемая сознаваемой целью. Индивидуальная трудовая деятельность характеризуется следующими свойствами:

- 1) любая индивидуальная деятельность человека, особенно трудовая, по природе своей бывает только целенаправленной;
- 2) цель индивидуальной деятельности обязательно должна быть осознанной, иначе деятельность разрушается, превращаясь в импульсивное поведение;

- 3) результат планирования деятельности (план) является предварительным представлением (моделью) будущей деятельности, одновременно включающим осознанные цели и программы действия для их достижения.

Любая организация создается для решения вполне определенных задач, для выполнения конкретных функций и, таким образом, по своему назначению является целенаправленной. Коллективная деятельность в организации — целостный, упорядоченный, взаимоувязанный и целенаправленный комплекс действий, позволяющий решать качественно новые, недоступные отдельным исполнителям задачи (свойство целостности организации как системы). Для обеспечения результативности коллективной деятельности в достижении общей конечной цели эту цель необходимо раз-

бить на подцели и задачи и довести до целевых установок (заданий) для каждого исполнителя, спланировать его индивидуальную деятельность и согласовать ее с действиями других исполнителей по промежуточным результатам, срокам и ресурсам. Процесс заканчивается формированием программ действий, увязанных по целям, исполнителям, срокам и ресурсам и выборам технологии их выполнения в распределенной системе.

Таким образом, коллективная деятельность, в том числе управленческая, характеризуется следующими свойствами.

1. Организация (трудовой коллектив) как система, специально создаваемая для решения определенных сложных задач, по своей природе (назначению) является целенаправленной и распределенной системой.

2. Необходимыми условиями успешного функционирования организации являются:

1) своевременное выявление проблем и определение целей организаций;

2) согласование индивидуальных целей с конечными целями подразделения и организации в целом;

3) рациональное распределение функций и работ по исполнителям, координация и синхронизация их выполнения, обеспечивающие целостность (т. е. получение общего конечного результата, превышающего сумму результатов отдельных исполнителей);

4) осознанность индивидуальных целей и задач для каждого исполнителя и наличие конкретных технологий их решения.

Нарушение первых трех условий приводит к низкой общественной производительности труда по конечной продукции, даже в случае высокой индивидуальной производительности; нарушение последнего — к низкой индивидуальной производительности труда.

Первые три условия относятся к главным функциям сводного органа управления организации, и их невыполнение свидетельствует о несовершенстве системы управления или некомпетентности руководства. Так, например, известно, что на рабочем месте индивидуальная производительность труда наших специалистов незначительно (менее чем в 1,5–2 раза) уступает западным специалистам, тогда как общественный результат (по уровню жизни) различается значительно (в 5–7 раз). Очевидно, основные потери происходят за счет плохой системы управления, и прежде всего за счет нерациональных решений и плохо согласованных мотивов, целей и действий в распределенной системе.

Разработка научно-обоснованного комплекса информационных технологий управления, включая ЧМ ИТ, и активное участие руководства в разработке комплекса ИТ управления (например, в форме деловых игр с компьютерной поддержкой) и его обучением — меры, направленные на совершенствование системы управления ОТС.

Отметим некоторые важные для дальнейшего особенности процессов решения сложных задач, связанные с их распределенностью.

Столкнувшись с новой задачей, человек пытается сначала использовать уже освоенные приемы и действия или непосредственно для решения задачи (если она проста), или для сведения сложной задачи к подзадачам, каждая из которых решается теми средствами, которыми располагают он или другие члены коллектива. В основе природы распределенности, существующей с древних времен, лежат разделение труда, специализация исполнителей (и сопровождающая ее кооперация и координация), позволяющие повысить качество и эффективность результата. Кроме того, разбиение на однородные подзадачи связано еще и с ограниченностью психофизиологических возможностей человека.

Процесс планирования в любой ОТС завершается формированием программы работ, представляющей собой комплексную модель процесса будущей деятельности. Причем только наличие цели и процесса использования дает возможность выделять ключевые проблемы, наиболее существенные показатели и связи из бесконечного множества возможностей. Эти природные свойства разумно организованной деятельности человека (в том числе плановой) приводят к выводу, что естественной логической, методической основой всех процедур планирования и управления должен быть программно-целевой подход, основанный на управлении по конечным результатам.

2.1.3. Управление по результатам. Программно-целевой подход. Кратко перечислим общие положения и принципы управления по результатам и программно-целевого подхода, которым посвящена обширная литература, уделяя основное внимание конструктивным процедурам, реализующим эти общие положения.

Основополагающим является принцип планирования от конечных целей (результатов) к средствам вплоть до программы конкретных работ, обеспечивающей достижение поставленных целей. Этот принцип должен выполняться при решении и согласовании плановых задач по всем уровням руководства, по всем периодам

времени (долгосрочные, среднесрочные и другие планы), по всем этапам создания и использования новой техники (по циклу «исследование—производство—потребление»).

Комплексное системное решение проблем предполагает учет всех существенных для достижения цели факторов, связей и ограничений. Можно сказать, что программно-целевое планирование является реализацией системного подхода при обязательной конкретизации целей и доведении их до реализуемых программ работ.

Общие принципы широко используются во всем мире и реализуются через регламентацию процедур планирования и управления, через систему целевых программ, т. е. комплексов операций, увязанных технологически, ресурсно и организационно. Целевая комплексная программа определяется как директивный и адресный документ, представляющий собой увязанный по ресурсам, исполнителям и срокам комплекс социально-экономических, производственных, научно-исследовательских, организационно-хозяйственных заданий и мероприятий, направленных на реализацию проблемы наиболее эффективными методами в установленные сроки. Задания и мероприятия целевых комплексных программ обеспечиваются в планах всеми видами ресурсов в первоочередном порядке.

Процедуры формирования программ начинаются с процедур целеобразования: от конечных целей — к средствам. Их результатом является иерархическая система целей и проблем, для решения которых разрабатываются программы реализации. Высшая конечная цель развития любой организационной системы — наиболее полное удовлетворение материальных и культурных потребностей людей. За достижение этих целей несут ответственность организации непроизводственной сферы, долгосрочные планы развития которых являются в то же время социальными программами. Каждая организация (отрасль) непроизводственной сферы формирует программу поставок со стороны производственной сферы продукции, необходимой для достижения ее первичных социально-экономических целей, и технических систем в виде массива жизненных циклов, реализующих процессы (творческая идея—производство). Суммарная по всем непроизводственным отраслям программа этих поставок является одновременно совокупностью средств достижения первичных целей и конкретизацией целей развития производственной сферы (вторичных целей). Ответственность за достижение этих вторичных целей и реализацию научно-технических и строительных программ несут отрасли и организации производственной сферы.

Реализация программ связана в первую очередь со стратегическими решениями по изменению производственной структуры (территориальной или технологической). Изменение технологической структуры в свою очередь может происходить из-за изменения пропорций (долей) использования существующих технологий (ускоренный ввод прогрессивных, демонтаж морально и физически устаревших технологий), а также из-за освоения новых технологий (введение в производственную структуру новых элементов), являющихся результатом инноваций.

Соответственно разрабатываются следующие типы программ.

1. Научно-технические программы, включающие все этапы жизненного цикла создания и освоения новых технологий. Они образуют нижний уровень системы программ.

2. Программы, обеспечивающие структурные технологические сдвиги.

3. Региональные программы, обеспечивающие изменение социально-экономических показателей развития и территориальной структуры производства.

2.1.4. Информационные аспекты процедур формирования программ. Программа должна содержать все данные, необходимые и достаточные для перехода к производственной и управленческой деятельности. Это перечень работ, организаций и лиц, ответственных за их выполнение, необходимые ресурсы, сроки и конечные результаты, сформулированные в измеримых, контролируемых показателях.

Таким образом, на выходе процедур планирования каждая программа должна включать данные по следующим разделам.

1. Система целей и результаты (цели).
2. Комплекс мероприятий и их исполнителей, обеспечивающих достижение целей (мероприятия).
3. Ресурсное обеспечение, необходимое для выполнения комплекса мероприятий (ресурсы).
4. Организационное обеспечение, включая процедуры целевого управления, необходимое для реализации программы (организация управления реализацией).

Данные по этим разделам логически связаны в итерационном процессе их формирования. Сначала формируются цели, затем мероприятия по их достижению. Взаимно согласованный комплекс целей и мероприятий является основой для распределения ресурсов и т. д. (рис. 2.1). Основной функцией комплексных программ развития в процедурах планирования и управления является по-

вышение обоснованности плановых и управленческих решений. Это представляет соответствующие требования к значениям исходных данных и процессам их получения. Состав и содержание

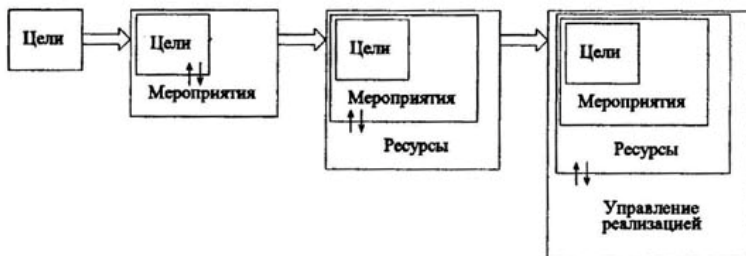


Рис. 2.1

аргументации определяются каждый раз конкретной ситуацией, однако можно выделить следующие общесистемные необходимые условия обоснованности предлагаемых решений (более подробно см. § 2.2).

1. Соответствие решения поставленной конечной цели (соответствие результатов программы четкой формулировке ее цели или определение степени достижения цели).

2. Полнота учета всех доступных средств и путей достижения цели (отсутствие исключенных из рассмотрения вариантов решений).

3. Реализуемость решения (возможность обеспечения решений проблем реальными мероприятиями и исполнителями, полнота учета всех существенных технологических, ресурсных и других связей и ограничений).

4. Возможность контроля процессов получения данных *лицом, принимающим решение* (ЛПР).

Приведенные весьма общие требования к составу и обоснованности данных системы программ в значительной мере структурируют и частично упорядочивают процедуру их формирования.

Выделяются четыре различающиеся по характеру выполнения и результатам группы работ: *прогнозные; по формированию программ; по разработке планов; по управлению реализацией программ и планов*. Прогноз служит для обоснования состава и целей программ, а также для подготовки исходных данных программ и планов. Стратегия и программа развития разрабатываются для обоснования и реализации важнейших плановых решений. Планом комплексно обосновывается конкретный вариант реализации.

2.1.5. Вопросы создания комплексной информационной технологии. Создание комплексной информационной технологии включает: совершенствование процедур планирования и управления, завершающееся созданием конкретных механизмов (процедур) на всех уровнях; выделение задач, полная или частичная алгоритмизация и автоматизация которых возможна и целесообразна; создание математических методов, алгоритмов, учитывающих специфику конкретных практических процедур и задач; создание комплекса технических средств (ЭВМ, терминалов, сетей и т. д.), удовлетворяющих разнообразию сформированных требований; разработку, экспериментальную и практическую отработку методик синтеза единой комплексной информационной технологии из перечисленных элементов.

В данной работе логика целевого подхода от конечной цели к средствам используется так же, как методологическая основа для синтеза технологии из отдельных компонент (от процедур к алгоритмам). Одной из ключевых проблем такого синтеза является объединение неформальных процедур и формальных алгоритмов.

Под *распределенной процедурой* будем понимать такую форму неполной регламентации деятельности (информационного процесса) по формированию решения проблемы, при которой общая задача получения конечного результата разбивается на комплекс подзадач и фиксируется: *кто* (исполнитель), *что* (какую подзадачу), *когда* (к какому сроку), *с каким результатом* (состав и качество выходных данных) решает, а также *кто*, (состав и качество выходных данных) решает, а также *кто*, *кому*, *когда*, *какие данные*, в какой форме передает и от *кого* получает. Описанные таким образом подзадачи назовем *элементами* (блоками) распределенной процедуры, а совокупность элементов и информационных связей между ними — *структурой* (или блок-схемой) процедуры.

При дополнительной детализации еще и конкретных методов решения подзадач (как делать?) процедура превращается в *алгоритм*, т. е. в набор правил и инструкций, полностью определяющих, формализующих состав и порядок выполнения элементарных операций по переработке информации и приводящих к однозначному решению задачи.

Посредством алгоритмов можно описать процессы лишь части задач, поддающихся полной формализации (и автоматизируемых на ЭВМ), процедура же пригодна для всех, в том числе и для не полностью формализуемых задач.

Объединение процедур и алгоритмов, включая математические и технические средства преобразования данных, образует *единую*

информационную технологию сложной задачи. В связи с этим алгоритмы желательно разрабатывать так, чтобы они были естественным продолжением процедур. Удобной формой такого объединения является язык блок-схем, на котором можно описать как процедуры, так и алгоритмы.

2.2. Структуризация показателей и построение информационной модели

Различают два типа моделей — *информационную* и *концептуальную*.

Информационная модель — некоторый образ, отображение объекта управления используемыми средствами. Для рассматриваемых далее задач под информационной моделью имеется в виду перечень показателей и их связей. На основе полученной информации и с учетом уже имеющихся знаний и представлений в сознании человека формируется образ состояния управляемого объекта (представление о реальном объекте, отражаемое в информационной модели). Его обычно называют оперативным образом или концептуальной моделью.

Концептуальная модель — содержательное представление о существенных свойствах объекта и главных связях между этими свойствами. Часто эта модель груба и неточна, но она дает пользователю возможность соотнести части процесса в целом, «охватить ситуацию одним взглядом» и действовать эффективно, что особенно важно в процессах целеобразования. Сравнение этой модели с образом-целью приводит к задаче, определяющей в значительной мере направление поиска решения. Соответственно рассматриваемая система сопровождения процедур обязательно должна включать информационную модель системы комплексных программ в форме, удобной для построения и использования концептуальной модели и решения комплекса возникающих задач.

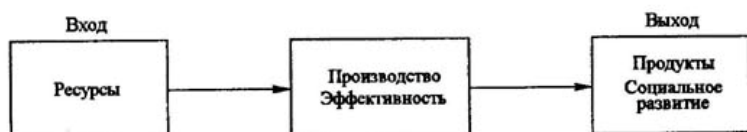
2.2.1. Структуризация объекта и основных показателей. В самом укрупненном представлении развитие организационно-технической системы (ОТС) полностью описывается во времени траекторией трех групп показателей:

- 1) выходные — значения показателей социально-экономического развития и выпуска продукции;
- 2) входные — потребляемые финансовые, трудовые и материальные ресурсы;
- 3) показатели, характеризующие внутреннее состояние системы, — имеющиеся производственные мощности, средние значе-

ния показателей эффективности производственного процесса.

Основные показатели эффективности производственного процесса определяются затратами ресурсов на единицу продукции (отношением входа к выходу). Этими же показателями определяется в основном себестоимость продукции и соответственно прибыль.

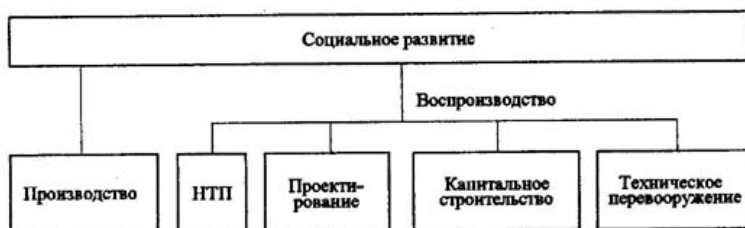
Рассмотрим внешние требования к результатам деятельности ОТС (см. «Выход» на рис. 2.2 а). Конечные цели создания и разви-



а



б



в

Рис. 2.2

тия ОТС, как и других народнохозяйственных ячеек, можно разбить на социальные и производственные.

Цели социального развития ОТС определяются целевыми нормативами обеспечения потребностей на душу населения в продуктах питания, жилище, охране здоровья (медицина, физкультура, экология и т. д.), по соцкультбыту (детсады, школы, магазины, бытовые услуги и т. д.), по среднему и минимальному доходу и др.

Основные мероприятия (средства) по достижении этих целей — рост прибыли и отчислений на социальное развитие, строительство, техническое перевооружение предприятий соцкультбыта и т. д.

Цели производственного развития специфичны и определяются основными функциями, назначением и требованиями к объемам выпуска продукции данной ОТС.

На входе производственной системы (рис. 2.2 а) существенными могут быть ограничения на ресурсы (дефицитными в перспективе могут быть металл, трудовые, энергетические и некоторые другие ресурсы). Эти ограничения могут привести к нереализуемости желаемых объемов и сроков выпуска продукции. Возможной мерой борьбы с этим является повышение эффективности производства: снижение средних удельных расходов дефицитных ресурсов за счет перехода на ресурсосберегающие технологии, перехода на другие материалы и виды продукции, противозатратные экономические механизмы и др.

Соответственно у всех ОТС возникают функции связи с внешней средой, что приводит к необходимости выделения подсистем потребления и снабжения (рис. 2.2), задачи развития которых имеют следующие существенные связи с производственной системой и органом управления развитием.

От блока «Потребление»: связь (1-2)1 — варианты прогноза диапазона потребности выпуска продукции (по составу и объемам) в динамике; (1-0)1 и (1-2)2 — данные о ценах и возможных доходах от реализации продукции; (1-0)2 — общесоюзные нормативы показателей социального развития; (1-2)3 — прямые заказы по средствам развития на строительство и техническое перевооружение служб, обеспечивающих использование продукции у потребителей; (1-0)3 — потребность в ресурсах для функционирования и развития подсистемы «Потребление».

К блоку «Потребление»: (2-1)1 — оценка предельных возможностей развертывания производства различных видов продукции по срокам и объемам; (2-1)2 — оценка удельных затрат по каждому из видов продукции и ресурсов; (0-1)1 — оценка себестоимости продукции; (2-1)3 — оценка сроков реализации заказов

по строительству и техпереворужению; (0-1)2 — выделяемые ресурсы.

Результатом взаимодействия блоков (1) (Потребление), (2) (Производственный процесс) и (0) (Сводный орган управления) является согласованный вариант плана выпуска продукции и развития блока (1). Формируется он в результате итерационной процедуры согласования внешних потребностей с возможностями производства и социальными целями трудового коллектива. Этой процедуре в системе поддержки решений должны соответствовать следующие задачи: отбор проектов новых видов продукции; анализ «затраты-эффективность»; многокритериальный анализ эффективности вариантов развития; разработка сходящейся человеко-машинной процедуры согласования показателей разных систем и решения отдельных задач; проведение имитационного моделирования сквозных вариантов развития ОТС в целом.

К блоку «Снабжение»: (2-3)1 — суммарная потребность в трудовых и материальных ресурсах в динамике; (2-3)2 — требование к комплектности и срокам поставок оборудования, конструкций, материалов и других ресурсов на конкретные объекты строительства и перевооружения.

От блока «Снабжение»: (3-2)1 — ограничение по объемам и срокам внешних поставок; (3-0)1, (3-2)2 — прямые заказы по средствам развития (на строительство и техническое перевооружение складов и др.) служб блока «Снабжение»; (3-0)2 — потребности в ресурсах на функционирование и развитие блока «Снабжение».

Результатом взаимодействия блоков (0), (2), (3) является согласованный вариант плана снабжения и развития его служб. Итерационной процедуре его формирования соответствуют следующие задачи: расчет потребности в ресурсах; ранжирование ресурсов по степени дефицитности и определения требований к НТП; разработка человеко-машинной процедуры согласований; проведение имитационного моделирования вариантов развития ОТС в целом.

На рис. 2.2 в приведено дополнительное разделение на блоки «Производство» и «Воспроизводство», включающее инновации, проектирование, техническое перевооружение и капитальное строительство. Кроме того, выделен блок «Социальное развитие», в который для любого варианта развития попадают данные из всех блоков по требуемым трудовым ресурсам. Эти требования на основе целевых социальных нормативов преобразуются в требования к развитию объектов соцкультбыта и др., затем поступают в блок «Воспроизводство» в форме перечня объектов и в блок «Сводный орган управления» в виде суммарных требований ресурсов.

Отметим следующее, важное для стратегического управления свойство развивающихся организационно-технических систем. Различаются два типа развития: количественный рост без изменения структуры (долей и состава мощностей, технологий, видов продукции и т. д.); структурные изменения и, возможно, количественный рост.

Первый тип (количественный рост) соответствует планированию развития «от достигнутого», «от базы». При таком подходе фиксируются сложившийся состав, доли объемов выпускаемой продукции, типы мощностей, технологий и оборудования. Затем абсолютные значения плановых объемных показателей увеличиваются в одинаковое число раз, при этом в такое же число раз возрастает валовый выпуск и суммарная прибыль. Однако можно убедиться, что все средние удельные показатели эффективности (удельные расходы материалов и энергии, производительность труда и др.) остаются неизменными. Соответственно и потребность в ресурсах (в том числе трудовых) возрастает в такое же число раз. Из этого следует, что прибыль растет, но на одного работающего она остается неизменной, что приводит к отсутствию прогресса развития в социальной сфере, а с учетом роста цен ведет к регрессу в этой области.

Таким образом, при *первом (экстенсивном) типе развития* происходит количественный рост, но показатели эффективности, в том числе и социальные, не улучшаются. В этом случае уровень жизни может только снижаться или в лучшем случае сохраняться.

К изменению эффективности функционирования и развития ведет только *второй тип развития*, предполагающий структурные изменения.

Имеется всего лишь два основных способа управления структурой — это создание новых видов продукции и технологий ее производства, обладающих лучшими удельными технико-экономическими показателями, чем существующие, при этом основной вклад дает использование результатов инноваций; изменение пропорций (долей) выпуска продукции, мощностей и технологий ее производства (основной вклад дает строительство, частично — техническое перевооружение).

Структурные решения (например, выбор пропорций развития ключевых инновационных направлений НТП), дающие главный вклад в повышение эффективности производства, относятся к *стратегическим* и входят в компетенцию высших эшелонов руководства, остальные решения относятся к *тактическим* и принимаются автономно руководителями подразделений.

Как правило, реализация стратегических решений требует координации многих служб, значительных затрат времени и средств и осуществляется в рамках долгосрочных комплексных программ, разработка которых ведется от «конечных целей», и должна предшествовать разработке среднесрочных и краткосрочных планов.

Основная задача системы управления развитием может быть сформулирована в следующем виде: обоснование и выбор вариантов развития, формирование, контроль и коррекция реализации соответствующей программы работ, обеспечивающие улучшение социальных показателей и повышение эффективности производства.

Кроме отмеченных попарных связей между подсистемами имеется ряд общесистемных (системообразующих) связей.

1. Связи по этапам воспроизводственного и производственного циклов. Типовая цепочка этапов жизненного цикла каждого объекта — научно-исследовательские, проектные работы, подготовительный период, строительство, монтаж и испытание оборудования, освоение проектных показателей, эксплуатация с капитальными ремонтами, модернизация (техпереворужение), демонтаж.

2. Согласование по периодам планирования и срокам выполнения работ (непрерывность во времени). Эта связь конкретизируется в форме разработки сквозной долгосрочной программы с «вырезанием» из нее среднесрочного и краткосрочного периода.

3. Связи по уровням «системы-подсистемы», согласующие значения плановых показателей на различных уровнях руководства, конкретизируемые в виде единых методик расчета и процедур «агрегирование-деагрегирование».

4. Связи по общим ресурсам: трудовым, финансовым, материальным, конкретизируемые в форме балансовых соотношений (частные финансовые балансы, соотношения по численности, материалам, оборудованию и др.) и представляемые в виде конкретных алгоритмов распределения этих ресурсов.

В системе управления развитием можно варьировать правилами распределения ресурсов (по приоритетам, со сменой приоритетов, пропорциональное деление с варьированием пропорций и др.). Смена правила соответствует смене стратегии управления и существенно влияет на сроки реализации проектов, объема выпуска определенных видов продукции, которые могут изменяться кратко.

5. Согласование частных решений, ориентированное на конечный результат. В этой процедуре системообразующие связи конкретизируются в форме:

- общего перечня критериев (показателей) для оценки вариантов решений в различных подсистемах и на различных этапах процедур;
- полного перечня уравнений сводного баланса (баланса ресурсов мощностей и продуктов), согласующих потребности с возможностями, и итерационных процедур их решения (например, по схеме выявления и устранения «узких мест» развития);
- обеспечения комплектности поставок оборудования, конструкций и т. д. на конкретные объекты с учетом связи перечня видов оборудования со сроками строительства и с ограничениями по ресурсам.

6. Связь всех подсистем через прибыль и социально-экономические показатели, характеризующие уровень жизни. С одной стороны, прибыль зависит от дохода, от затрат по видам продукции и объемам производства, из которых складывается себестоимость продукции. С другой стороны, эти показатели динамично зависят от реализуемых инновационных проектов и строительства и уровня выделяемых на развитие ресурсов.

Таким образом, при разработке программ и планов развития объективно необходимы (иначе планы будут нереализуемы и неуправляемы) сквозные согласования частных решений с проверкой перечисленных связей по целевой направленности; по ограничениям на общие ресурсы; по периодам времени; по этапам жизненных циклов и комплектности поставок; по иерархии; по сводным балансам (продукции, мощностей, ресурсов, а также «ресурсы–продукты», «затраты–эффективность»); по хозяйственно-экономическим связям (прибыль, статьи расходов и др.).

Дальнейшая детализация показателей и связей приводит к построению многоуровневой информационной модели структуры ОТС.

2.2.2. Информационная структура. В литературе описываются самые различные системы показателей, берущихся за основу информационной структуры ОТС. Чаще всего это структура продуктов или ресурсов (рис. 2.3), или организационная структура, или структура мероприятий, реже — структура проблем. В распределенной же системе формирования согласованных решений для полноценного описания информационной модели программы должна быть взята не какая-либо отдельная структура показателей, а их комплекс, включающий все эти структуры. Таким образом обеспечивается один из основных принципов — комплексный, системный подход.

К комплексной информационной структуре, являющейся основной информационной моделью, приводят комбинации (математически — подмножества декартова произведения разрезов графов

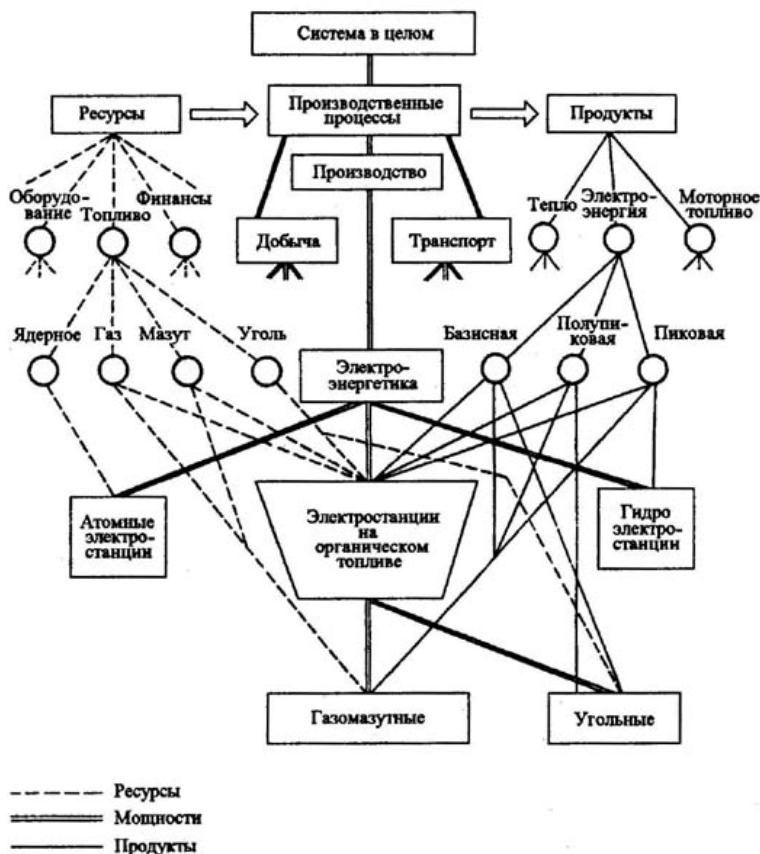


Рис. 2.3

элементарных структур) наборов элементарных структур: продуктов, ресурсов, исполнителей, технологий, территорий и временных этапов. Причем эти элементарные наборы формируются или берутся из прежнего планового периода.

Основой, или «несущей конструкцией», информационной модели является структура производственных процессов, описываемых полным комплексом показателей по схеме «вход (ресурсы,

средства)–выход (продукты, результаты)». Причем эта структура является наложением трех структур типа «ресурс–продукт» (технологической, территориальной и структуры проблем и программ), каждая из которых может использоваться и отдельно.

Таким образом, информационной моделью программы развития является рассмотренная комплексная информационная структура, включающая все показатели, на которой заданы (конкретизированы) ограничения и соотношения между показателями. Ее нижним уровнем (информационной базой) служат данные по этапам жизненных циклов технических систем.

На этапе целевого управления реализацией программ роль основной «несущей конструкции» играет структура проблем и программ — граф «цели–средства», окончательное построение которого завершается лишь на заключительных этапах итерационных процедур, описанных выше.

На этапе реализации основной является технологическая структура, на этапе формирования схем развития и размещения — территориальная производственная структура. На этапах планирования и управления используются все элементарные структуры, т. е. вся комплексная информационная структура.

Многоуровневая информационная структура только в простейшем случае имеет структуру дерева, в общем случае эта структура является сетевой (рис. 2.3). Для моделирования такой структуры необходимо специализированное сетевое программное обеспечение.

2.3. Общие требования к человеко-машинной системе поддержки принятия решений

2.3.1. Общие положения. Остановимся подробнее на вопросах включения в процедуры решения сложных задач математических моделей и алгоритмов. Основные возникающие при этом проблемы связаны с необходимостью объединения, сопряжения в единой человеко-машинной системе столь разнородных элементов, как неформализуемая деятельность человека, математические модели и формальные алгоритмы.

Известны различные подходы к решению этих проблем: от использования существующих оптимизационных моделей с «приспособлением» к ним человека (подход типа «от машины к человеку», почти не оставляющий места для проявления активности человека и неудобный для него) до обратного подхода, использующего эвристические алгоритмы, имитирующие действия человека (подход,

который почти не оставляет возможности использования мощного научного потенциала математики и нередко приводит лишь к автоматизации существующего беспорядка).

Мы будем опираться на схему используемого при построении формальных моделей аксиоматического подхода: формулировка содержательных предположений и соответствующих им требований, затем формальных аксиом, позволяющих далее использовать математический аппарат. Однако при этом будем учитывать особенности и методические принципы разработки ЧМС. В частности, при использовании подхода «от человека к машине» необходим переход от моделей, удобных для математиков, которые, как правило, стремятся к эффективному использованию ЭВМ, к моделям и методам, удобным для конечного пользователя (лиц, формирующих решения (ЛФР) и лиц, принимающих решения (ЛПР)), обеспечивающим эффективность ЧМС в целом.

Попытаемся определить требования к автоматизированной системе сопровождения на всей цепочке: конечные результаты решения сложной задачи—процедура формирования решений—элементы ЧМС—модели и методы. Рассмотрим функции системы в целом, а затем требования к алгоритмам решения локальных задач.

2.3.2. Основные функции. Перечислим кратко обсуждавшиеся ранее потребности в автоматизации решения задач, возникающих в процедурах формирования программ, которые и определяют основные функции автоматизированной системы сопровождения.

Назначением системы в целом являются информационное обеспечение и решение (в режиме диалога и многостороннего взаимодействия с ЛФР и ЛПР) каждой отдельной исследовательской или практической задачи, возникающей в процедурах; обеспечение связи (согласования) задач в рамках каждого этапа процедуры; обеспечение информационной преемственности этапов процедур с первоочередной ориентацией на заключительный этап — управление реализацией программы развития комплекса отраслей.

Информационное обеспечение должно выполнять следующие функции.

Ф1. Обеспечение возможности для пользователя работать в натуральных показателях, связанных с соответствующими источниками информации по реальным производственным процессам.

Ф2. Адекватное отображение структуры связей показателей системы программ и планов (граф «цели—средства» и др.) и обеспечение согласованности данных, в частности оперативное отслеживание всех последствий изменения какого-либо показателя.

Ф3. Обеспечение контроля условий получения агрегированных показателей (источники и варианты исходных данных, алгоритмы их преобразования).

Ф4. Обеспечение возможности для пользователя работать в диалоге с детальными и укрупненными показателями.

Ф5. Обеспечение возможности получения справки во всех принятых на данном этапе процедуры разрезах и непосредственной корректировки значений детальными и укрупненными показателями в согласованности со всеми другими показателями.

Ф6. Обеспечение возможности сопровождения расчетов не только снизу вверх, но и сверху вниз по информационной структуре от отрасли в целом до отдельных производственных объектов.

Ф7. Обеспечение удобного диалогового взаимодействия с ЭВМ одного пользователя и одновременного многостороннего взаимодействия коллектива пользователей (ЛПР и ЛПР) с системой и через систему между собой.

Ф8. Обеспечение возможности работы с переменной (дорабатываемой, наращиваемой в процессе решения задач на начальных этапах процедур) базой данных с альтернативными элементами производственной, технологической и программной структур, учитывающими избыточный перечень конкурирующих технологий и мероприятий и т. д.

Далее следует группа функций информационного обеспечения сопровождения процедур формирования комплексных программ, обеспечивающих получение согласованных решений, работу с агрегированными показателями, многостороннее взаимодействие:

Ф9. Предоставление возможности оперативного анализа всех учитываемых в процедурах последствий принимаемых решений и их влияния на степень достижения конечных целей.

Ф10. Обеспечение возможности решения как локальных, так и глобальных (по комплексу отраслей) задач и прежде всего задач сведения частных и общих балансов продуктов, ресурсов, локализации возмущений при управлении и т. д.

Ф11. Предоставление пользователю возможности содержательного контроля алгоритмов и регулирования степени автоматизации (вплоть до проверки расчетов вручную) решения задач.

Ф12. Обеспечение процедур согласования решения взаимосвязанных задач и, в частности, возможности работы с любым показателем как с переменной, ограничением или критерием.

Ф13. Обеспечение различных (произвольных) режимов решения задач — от свободного режима пользователя при отсутствии

моделей и алгоритмов принятия решений до полностью автоматизированного режима.

Ф14. Обеспечение оперативной подготовки и изменения структуры исходных данных для оптимизационных моделей (включая их частичное агрегирование) с использованием их результатов в системе сопровождения и др.

Общим требованием к системе в целом, определяющим ее жизнеспособность (внедряемость), является обеспечение эффективности и удобства ее практического использования, т. е. органично включаясь в естественные для ЛФР и ЛПР процедуры, система должна предоставлять возможность получения более предпочтительных решений при сокращения затрат труда и времени.

Кроме того, важным общим требованием является возможность развития, оперативной модернизации и адаптации системы в процессе ее эксплуатации: расширение перечня задач, данных, их углубление, совершенствование и замена алгоритмов и т. п.

2.3.3. Требования к алгоритмам решения локальных задач. Опишем основные элементы диалоговой ЧМС (на примере наиболее простой задачи выбора).

1. Человек-пользователь (в частности, лицо, принимающее решение), в функции которого входят связь ЧМС с окружающей средой (анализ исходных данных и результатов, ответственность за результаты и т. д.), постановка и корректировка целей и задач, выбор метода решения, оценка и выбор варианта решения задачи в целом и т. д.

2. ЭВМ (точнее, комплекс технических средств и математического обеспечения), основной функцией которой является автоматизация части формализуемых операций, входящих в процедуру формирования, оценки и выбора решений. В данном разделе, если не оговорено специально, под ЭВМ будем понимать лишь ту часть математического обеспечения, которая связана с моделями и алгоритмами формирования и принятия решения. Каждая такая модель состоит из описания объекта, описания предпочтений ЛПР и алгоритмов, осуществляющих выбор наиболее предпочтительного варианта решения.

3. Процедура взаимодействия, основной функцией которой является регламентация обмена информацией между ЛПР и ЭВМ, приводящая к решению исходной задачи за приемлемое время. В общем случае процедура носит итеративный характер и состоит из элементарных циклов диалога, включающих четыре такта: обработку информации ЛПР; передачу ее в ЭВМ; обработку инфор-

мации в ЭВМ; передачу информации от ЭВМ к ЛПР.

До начала диалоговой процедуры в ЭВМ должны быть введены модели объекта в виде программ для ЭВМ или описаний предметной области и модели предпочтений ЛПР. После ввода необходимых для этих моделей данных ЭВМ формирует для ЛПР начальный вариант решения. Если этот вариант неприемлем, то от ЛПР должна поступить дополнительная информация о его предпочтениях, на основе которой корректируется модель, и в ЭВМ формируется новый, скорректированный вариант решения и т. д. Диалог продолжается до получения приемлемого (наиболее предпочтительного) с точки зрения ЛПР варианта решения или отказа ЛПР работать с системой.

Отметим возникающее при этих взаимодействиях противоречие, проявляющееся в смещении ответственности. Математик, компетентный в математических дисциплинах, несет профессиональную ответственность только за качество решения математически поставленной задачи (модели). Он не компетентен в содержательной стороне процедур проектирования или планирования, оценке последствий принимаемых решений и не отвечает за них. Тем не менее прямо или косвенно (через разработанные им модели и алгоритмы) решение формирует именно он. ЛПР, компетентное в содержательных вопросах и отвечающее за конечный результат, не обязано быть компетентным в математических вопросах, для него ЭВМ в значительной мере представляет собой «черный ящик» и процесс формирования решения в некоторой степени непрозрачен. Таким образом, фактически получается, что отвечает за последствия решения ЛПР, а формирует решение математик. Это противоречие может вызвать недоверие у ЛПР и его нежелание работать с ЭВМ.

Сформулируем требования к ЧМС от конечного пользователя (ЛФР, ЛПР), обеспечивающие устранение этого недоверия.

2.3.4. Предположения о поведении конечного пользователя. Уточним в этом плане некоторые условия и стороны деятельности при решении сложных задач, типа рассмотренных в гл. 1.

Относительно функций ЛПР в ЧМС по связи с внешней средой будем считать, что пользователь (ЛПР, ЛФР) является членом организационной системы, созданной для решения определенных задач и выпускающей определенную конечную продукцию, и его деятельность, как и деятельность организации, является рациональной и целеустремленной. При этом существует (как правило, неформальный) механизм, позволяющий так или иначе оценивать

конечный результат решения задачи по степени достижения поставленной перед ЛПР цели, за который ЛПР несет ответственность.

На этапе формирования решения ЛПР должно в принятых в механизме содержательных категориях аргументировать, обосновать перед вышестоящей инстанцией предлагаемый им вариант (результат) решения задачи.

Таким образом, можно сформулировать следующие предположения о поведении ЛПР, характеризующие его отношение к результатам решения задачи.

П1. Целеустремленность.

Поведение ЛПР целеустремленно и решение задачи ориентировано на достижение определенной цели.

П2. Ответственность ЛПР.

ЛПР несет ответственность за последствия принимаемого решения, за его своевременность и качество (содержательное обоснование).

П3. Обоснованность решения.

ЛПР выбирает только обоснованные решения, которые он может содержательно аргументировать.

Будем учитывать следующие условия обоснованности.

П3.1. Соответствие целям.

П3.2. Полнота учета возможностей.

П3.3. Полнота учета ограничений.

Отметим некоторые психологические особенности, существенные для реализуемости человеко-машинных процедур. Для сложной задачи характерно, что до начала ее решения у ЛПР, как правило, не бывает законченного представления ни об объекте, ни о целях и методе решения задачи. Эти понятия уточняются лишь поэтапно, по мере формирования дополнительных данных в итерационном процессе решения.

До начала решения задачи у ЛПР формируется концептуальная модель, т. е. совокупность предварительных содержательных представлений о целях и задачах его трудовой деятельности, о состоянии объекта, внешней среды, ЧМС и способах воздействия на них. После получения информации о текущем состоянии объекта человек формирует оперативный образ и сопоставляет его с уже имеющимся у него образом, определяет рассогласование, формирует, оценивает, выбирает и реализует воздействия, устраняющие это рассогласование. Далее он анализирует результаты воздействия и корректирует свою концептуальную модель, включая цели, задачи и способы воздействия. Затем цикл повторяется.

Формирование решения (как и аргументация результата) идет в содержательных категориях с обработкой информации по частям, соответствующим психофизиологическим возможностям человека. Таким образом, естественны следующие предположения.

П4. Итерационность процедуры.

Процедура решения сложной задачи носит поэтапный итерационный характер, включая корректировку целей, задач и способов воздействия на объект.

П5. Содержательность информации.

ЛПР в процессе решения задачи работает с естественной для данного объекта и решаемой задачи содержательной информацией.

П6. Ограниченность возможностей ЛПР.

ЛПР работает с информацией по частям, состав, форма, темп представления и объем которых соответствуют возможностям ЛПР.

При разработке математических средств ЧМС эти предположения ограничивают их выбор моделями и методами, удобными для итерационной корректировки со стороны ЛПР как самих решений, так и целенаправленного изменения всех параметров моделей (ограничений, коэффициентов, критериев).

Ограничения П6 по возможностям ЛПР оказываются настолько сильными, что при разработке методов решения, например, слабоструктурированных задач проблемы получения достоверной информации от ЛПР могут стать центральными.

Отметим еще, что для решения сложной задачи ЛПР, как правило, привлекает помощников, компетенция и ответственность которых ограничены лишь частью работ (типа информационно-вычислительных), а общую ответственность за решение задачи в целом несет ЛПР. Необходимым условием эффективной работы с помощниками является доверие ЛПР к результатам. Для этого он как минимум должен иметь возможность понять и проконтролировать их, причем не столько сами численные результаты, сколько способы их получения, т. е. основные предпосылки, принципы и алгоритмы формирования решений. Таким образом, очевидным является следующее предположение.

П7. Возможность контроля.

ЛПР при необходимости может содержательно проконтролировать как результаты решения подзадач помощниками, так и методы их получения.

Условие П7 должно выполняться и в том случае, когда роль помощника будет играть ЭВМ. Тогда необходимым условием доверия ЛПР к формируемым ЭВМ результатам будет предоставленная

ему возможность содержательно понять предпосылки построения модели и алгоритм, а при необходимости полного контроля — возможность часть этапов решения или все выполнить вручную.

Следует отметить, что между ЛПР и его помощником (человеком) обычно существует определенное взаимопонимание, обеспечивающее возможность их коммуникации и эффективного взаимодействия в процессе решения при использовании лишь частичной информации и при отсутствии регламентации этого взаимодействия. По-видимому, по аналогии с этим широко распространено мнение, что и для эффективного взаимодействия с ЭВМ достаточно лишь предоставить ЛПР компьютер. Однако это далеко не так, поскольку ЭВМ — всего лишь автомат, сам по себе не обладающий свойствами, необходимыми для поддержания успешной коммуникации с человеком. Для обеспечения таких свойств необходима разработка соответствующих программ и процедур взаимодействия, которой предшествует формулировка требований и задач на уровне формализации, определяемой технологией эксплуатации этого автомата, т. е. на математическом уровне.

2.3.5. Требования к диалоговой ЧМС. Сформулируем вытекающие из рассмотренных выше предположений требования сначала к человеко-машинной процедуре в целом, а затем по тактам диалога, включая требования к ЭВМ, используемой на третьем такте каждого элементарного цикла диалога.

Требования к результату ЧМ процедуры решения задачи можно сформулировать следующим образом.

ТП1. Возможность получения наиболее предпочтительного решения (из П1, П2).

Напомним, что, как мы условились, наиболее предпочтительное по целевым установкам ЛПР решение выбирается им только из числа обоснованных (П3). Выделим еще простое необходимое условие выполнения ТП1, являющееся также условием доверия ЛПР к ЧМ процедуре. Дело в том, что ознакомление с новым инструментом происходит обычно на тестовом примере задачи, уже ясной для ЛПР и решенной каким-либо другим образом. Поэтому процедура должна удовлетворять следующему тестовому требованию.

ТП1.1. Возможность получения любого наперед заданного ЛПР (и полученного другим способом) обоснованного решения.

Требования к процессу поиска решения с помощью ЧМ процедуры в первую очередь должны соответствовать предположениям П4, П5, П6:

ТП2. Организация итерационных процедур с возможностью поэтапной корректировки исходных данных и решения (из П4).

ТП3. Использование на каждой итерации информации в удобных для ЛПР формах и объемах (из П5, П6).

ТП4. Возможность понятной для ЛПР содержательной интерпретации каждого цикла диалога (итерации) и его результата (из П1, П6, П7).

ТП5. Возможность выбора пользователем различной степени автоматизации операций на каждой итерации (из П1, П6, П7).

ТП6. Сходимость итерационной процедуры к наиболее предпочтительному решению за приемлемое число итераций (из П1, П3, ТП1).

ТП7. Естественный для ЛПР при решении задачи ритм диалога (время отклика ЭВМ и ЛПР, включая ввод и вывод данных).

Выполнение всех перечисленных требований на практике может оказаться слишком сложным и нереализуемым в приемлемое время. Поэтому важно выполнение требования реализуемости ЧМ процедуры.

ТП8. Реализуемость ЧМ процедуры в приемлемые сроки с учетом реальной организационной структуры, реальных возможностей имеющихся исполнителей и технических средств по получению и переработке информации.

Перечисленные выше требования к процедуре в целом на каждом цикле диалога разбиваются на следующие требования по тактам:

Такт 1. Переработка информации ЛПР.

Необходимо обеспечить приемлемую сложность переработки выдаваемой для ЛПР информации с учетом его психологических возможностей (из П3, П6).

Такт 2. Ввод информации в ЭВМ.

Необходимо использовать язык, понятный и удобный для ЛПР (язык деловой прозы), обеспечить приемлемую трудоемкость и время ввода данных (из ТП8, П5, П6).

Такт 3. Переработка информации в ЭВМ.

Необходимо обеспечить выполнение следующих требований к моделям и алгоритмам (ТМА).

ТМА1. Отсутствие исключенных обоснованных решений (из ТП1, ТП1.1, ТП6).

ТМА2. Простота подстройки модели с учетом новой информации (из ТП2).

ТМА3. Ориентация модели на входную и выходную информацию в содержательных категориях (из ТП3).

ТМА4. Содержательная интерпретируемость алгоритмов и предпосылок построения модели (из ТП4).

ТМА5. Сходимость за приемлемое число итераций.

ТМА6. Возможность регулирования степени автоматизации (из ТП5) и точности решения.

ТМА7. Приемлемое время формирования решения.

Такт 4. Передача информации от ЭВМ к ЛПР.

Необходимо обеспечить приемлемые для ЛПР формы, объемы и время ожидания.

При выполнении этих требований на каждой итерации подготовка полноценного варианта решения (удовлетворяющего ПЗ и учитывающего имеющиеся данные о предпочтениях ЛПР) должна обеспечиваться ЭВМ, его целенаправленная корректировка — ЛПР, а сходимость (ТП6) процесса к решению — специальной управляющей процедурой, регламентирующей взаимодействие ЭВМ и ЛПР, а также правила перехода от итерации к итерации.

2.3.6. Проблемы создания алгоритмов, удовлетворяющих требованиям конечного пользователя. Примеры нарушения требований. Для упрощения будем рассматривать только часть перечисленных выше требований, объединив их в общие необходимые требования (Т) к ЧМ процедурам и моделям решения многокритериальных задач.

Т1. Использование информации в содержательных категориях (ТП3, ТМА3).

Т2. Итерационный характер процедуры, удобство корректировки данных и перестройки модели (из ТП2, ТМА2).

Т3. Отсутствие исключенных решений (из ТП6, ТМА1).

Т4. Возможность получения тестового решения (из ТП1.1).

Т5. Сходимость итерационной процедуры к наиболее предпочтительному решению за приемлемое число итераций (из ТП6).

Т6. Контролируемость ЧМ процедуры со стороны ЛПР:

Т6.1. Содержательная интерпретируемость моделей.

Т6.2. Содержательная интерпретируемость алгоритмов.

Т6.3. Регулируемая степень автоматизации.

Проверку выполнения этих требований прокомментируем на упрощенном примере многокритериальной задачи распределения ресурсов между объектами.

Пример 2.1. Пусть имеется перечень $\{i\}$ объектов (работ), $i = 1, 2, \dots, n$, каждый из которых потребляет ресурс одного вида

х. Общее количество ресурса ограничено:

$$\sum_{i=1}^n x_i < B. \quad (2.1.)$$

Требуется найти наиболее предпочтительный вариант распределения ресурсов $x^* = \{x_i^*\}$, $i = 1, \dots, n$, удовлетворяющий ограничению (2.1) и оцениваемый заданным перечнем критериев

$$F = \{F_j\}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Рассмотрим сначала наиболее распространенную в литературе схему ЧМС решения многокритериальных задач, использующую линейную свертку критериев (x_i также играют роль критериев $F = x_i$, $i = 1, \dots, n$, $n < m$). В этом случае строится модель линейного программирования, в которой предпочтения ЛПР описываются количественно линейной целевой функцией

$$F(c, x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \max, \quad (2.2)$$

где x_i — количество выделенных на i -ю работу ресурсов, c_i — числа (веса), соответствующие эффективности использования ресурсов.

Тогда на такте 3 диалога задача распределения ресурсов формулируется как задача линейного программирования: найти решение $x^* = \{x_i^*\}$, $i = 1, \dots, n$, максимизирующее целевую функцию (2.2) на множестве допустимых решений X^0 (рис. 2.4а), определяемом ограничением (2.1).

В этом случае в соответствии с многочисленными методиками ЛПР принимает участие на этапе (такт 1) формирования исходных данных (значений c_i), затем (такт 3) задача (2.1), (2.2) решается автоматически на ЭВМ и ЛПР получает результаты решения (такт 4) для анализа. Если это решение $x^*\{c_i\}$ приемлемо, то процедура прекращается; если неприемлемо, то ЛПР, возможно, с помощью экспертов должен изменить значения $\{c_i\}$ на $\{c_i^1\}$, и процедура повторяется до получения приемлемого решения.

Очевидно, что первое требование (Г1) работы ЛПР в содержательных категориях не выполняется, так как ЛПР вынуждено выражать свои предпочтения количественно, в неестественных для него математических категориях значений коэффициентов c_i типа «относительная важность c_1 работы № 2 в 1,38 раза выше, чем

Отсюда следует, что и данная процедура в целом может получить тестовое решение задачи (Т4) только в частном случае, когда это решение совпадает с опорным. При этом для обеспечения сходимости процедуры к подобному решению необходимо осуществить в худшем случае полный перебор всех мыслимых сочетаний («сетки») значений компонент вектора c , число которых $d = h^n$, где n — размерность вектора c , h — число градаций значений c . Обычно на практике $h \geq 10^2$, $n \geq 10$ и необходимое число итераций $d \approx 10^3$ абсолютно нереализуемо по времени (нарушение требований ТП8 и ТП5 даже в частном случае).

В общем (и типичном для практики) случае тестовое решение D не совпадает с опорным (угловыми точками A и E), тогда из-за наличия исключенных решений требование Т4 не выполняется и тем более отсутствует сходимость решения к этой точке (нарушение Т5). Предпосылки (аксиомы), определяющие условия адекватности описания предпочтений ЛПР линейной функцией ценности $F(c, x)$, к сожалению, так трудны для содержательной интерпретации, что требование Т6.1 тоже не выполняется.

Наконец, симплекс-метод, являющийся стандартным алгоритмом решения задачи линейного программирования, эффективен с вычислительной точки зрения, но не имеет содержательной интерпретации на языке ЛПР (нарушение Т6) и не допускает частичного включения ЛПР в процесс формирования и отбора решений, т. е. не выполняется и требование Т6.3.

Таким образом, не выполняется ни одно из рассмотренных необходимых требований. Это означает, что для ЛПР такая ЧМС неудобна информационно (нарушение Т1); не вписывается в естественную структуру его деятельности при решении задач (Т2); сужает возможности его выбора (Т3), что ведет к снижению эффективности решений (П3), перемещению ответственности (П2), так как ЭВМ без ведома ЛПР отсеивает часть решений, к способности получить решение тестовой задачи (Т4), что вызывает недоверие ЛПР; не гарантирует сходимость (Т5), т. е. через 10–20 итераций ЛПР может получить решение, худшее, чем в начале, и вообще не имеет уверенности в возможности получения предпочтительного с его точки зрения решения, что может вызвать нежелание продолжать диалог; не дает возможности контроля за ходом решения (П7), что вызывает недоверие и лишает возможности содержательно аргументировать (П2) выбор решения (кроме ссылки на то, что оно получено на ЭВМ).

Все это вместе взятое при эксплуатации такой ЧМС несомненно должно вызывать недовольство и недоверие ЛПР и, как следствие,

отказ работать с ЭВМ или, используя ЭВМ, параллельно формировать решение традиционно вручную, что нередко и происходит на практике.

Тем не менее именно такая схема диалога предлагается во многих публикациях (сотни работ), вышедших 5–10 лет назад, а в отдельных работах и до настоящего времени.

Большинство современных работ по моделям и методам решения многокритериальных задач тяготеет к одному из двух полярно противоположных подходов. Первый подход, который по отношению к выбору алгоритмов можно отнести к нормативному, приводит к моделям, корректным в смысле соответствия требованиям отсутствия исключенных решений Т3, Т4. Однако при таком подходе редко выполняется требование соответствия итерационной процедуре Т2, ее сходимости Т5, еще реже — информационное соответствие Т1 и, как правило, не выполняется требование контроля Т6, т. е. такие модели и ЧМ процедуры корректны, но неудобны и с трудом вписываются в реальные процедуры.

Обратная картина характерна для второго подхода (дескриптивного), идущего от имитации существующих приемов и процедур и приводящего к использованию эвристических алгоритмов, которые обычно удовлетворяют требованиям удобства работы с ЧМС (Т1, Т2, Т6, Т6.2, Т6.3). В этом случае редко удовлетворяется требование адекватности модели предпочтений (Т6.1) и сходимости (Т5). При разработке эвристических алгоритмов нередко высказываются суждения, что если в ЧМС поддержки принятия решений полная формализация процедур невозможна, то снимаются и какие бы то ни было строгие требования к моделям и алгоритмам.

Однако оказывается (как мы убедились, в частности, и на рассмотренном выше примере), что отсутствие достаточно строгих научных обоснований (например, эвристический выбор модели предпочтений (4.2) с линейной целевой функцией) на практике приводит к отказу ЛПР работать с такой системой. В частности, подавляющее большинство эвристических (дескриптивных) процедур не выдерживает проверки на простом и понятном ЛПР тесте (Т4), что связано прежде всего с невыполнением «строгих» требований Т3, Т5.

В табл. 2.1 приведена структура удовлетворения приведенных требований для различных ЧМ процедур. Из нее видно, что подавляющее большинство известных моделей и методов не удовлетворяют необходимым и очевидным требованиям. Поэтому исследование сложившейся ситуации и поиск путей выхода из нее

является чрезвычайно актуальным. Возникает естественный вопрос, а реализуемы ли эти требования, разрешима ли вообще проблема создания ЧМ процедуры, удовлетворяющей всем требованиям Т1–Т6?

Как показывает опыт доказательства теоремы Эрроу о неразрешимости задачи упорядочения, удовлетворяющей набору естественных требований, ответ на вопрос нетривиален и в настоящее время отсутствует. Отсутствуют также общие методы проектирования моделей и методов для ЧМС под заданные требования такого рода. Однако в связи с актуальностью такой задачи и ее неразработанностью на данном этапе, по-видимому, представляют интерес даже отдельные соображения и возможные подходы к ее решению, а также примеры ЧМ процедур, к обсуждению которых мы и перейдем.

Рассмотрим возможные подходы к разработке алгоритмов, удовлетворяющих требованиям. Заметим, что при сопоставлении положительных и отрицательных ответов в третьей и четвертой колонках табл. 2.1 возникает естественное желание объединить лучшие стороны нормативного (аксиоматического) и дескриптивного (эвристического) подходов, хорошо дополняющих друг друга в смысле удовлетворения требованиям Т1–Т6.

Одним из возможных путей реализации такого объединения является следующая. На каждом цикле диалога для формирования допустимого решения используется простой эвристический

Таблица 2.1

Требования	ЧМ (Процедура примера 2.1)	Нормативный подход	Дескриптивный подход	ЧМ (Процедура примера 2.2)
Т1. Содержательность проекта	—	—+	+	+
Т2. Итерационность процедуры	—	+—	+	+
Т3. Отсутствие исключенных решений	—	+	—	+
Т4. Получение тестового решения	—	+	—	+
Т5. Сходимость к предпочтительному решению	—	+	—	+
Т6. Содержательная контролируемость	—	—	+	+

алгоритм, содержательно понятный ЛПР и удовлетворяющий требованиям Т1, Т2, Т6.2, не гарантирующий получения предпочтительного (оптимального) решения, но удовлетворяющий также требованию Т3 (отсутствию исключенных решений). Этого можно добиться, если использовать алгоритмы с параметрами, изменение которых может привести к выбору любого решения из заданного множества.

Сходимость к предпочтительному решению (Т5) обеспечивается в результате специальной управляющей нормативно построенной процедуры, обеспечивающей целенаправленный переход от одного эвристического решения к другому. В совокупности с выполнением требования Т3 этим обеспечивается и выполнение требования Т4 (тестового). Возникающая здесь проблема относится к классу проблем синтеза корректных алгоритмов из некорректных, по которым в последние годы появились обнадеживающие результаты. В гл. 3 этот подход развивается для некоторых классов задач. Здесь мы рассмотрим описание такой ЧМ процедуры на примере многокритериальной задачи распределения ресурсов.

Пример 2.2. Опишем один из возможных вариантов ЧМ процедуры, основанный на траекторном подходе. За основу организации итерационной процедуры возьмем основные этапы решения задачи человеком, описанные при формулировке предположения П4 (на рис. 2.5 им соответствует левая сторона, справа — операции, выполняемым ЭВМ, в середине — графическое отображению действий ЛПР и ЭВМ).

На первом шаге ЛПР формирует образ-цель φ^0 в категориях выходных показателей (точка φ^0 на рис. 2.5 а). Затем анализируется реализуемость этой целевой установки, для чего определяется запрос ресурсов $x^0 = \{x_i^0\}$ (рис. 2.5 б), необходимых для достижения цели $\varphi^0 = \varphi^1(x^0)$ (отображение $x^0 = \varphi^{-1}(\varphi^0)$ осуществляется ЭВМ, блок 1), и проверяется, удовлетворяет ли этот вариант решения ограничениям на ресурсы (блок 2), т. е. попадает ли точка x^0 в множество допустимых решений $X^0(B)$ (рис. 2.5 б). Если удовлетворяет, т. е. $B/B^0 \geq 1$ (здесь B — наличные ресурсы, $B^0 = \sum_{i=1}^n x_i^0$ — запрос ресурсов), то задача решена, и x^0 — наиболее предпочтительное решение: $x^* = x^0$.

Если x^0 — недопустимое решение, то на третьем шаге анализируются возможные допустимые состояния (решения), и из них выделяется допустимое решение $x^0(B)$, ближайшее к x по простому правилу: $\tilde{x}_i^0 = B/B^0 x_i^0$, $i = 1, \dots, n$ (рис. 2.5 в, блок 3).

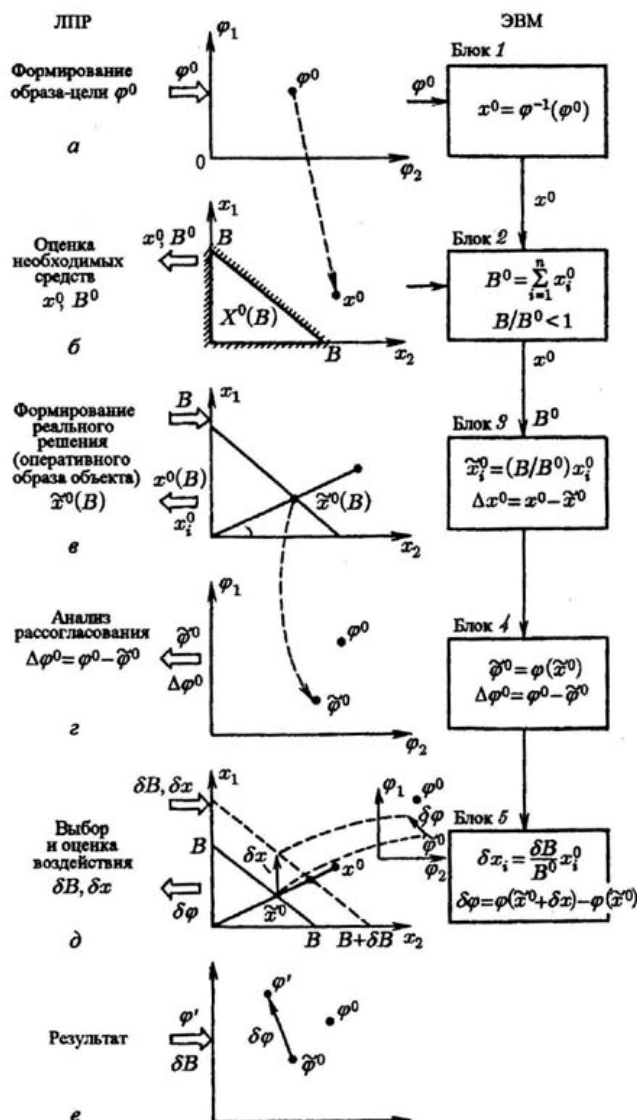


Рис. 2.5

На следующем, четвертом шаге ЭВМ рассчитывает отображение x^0 в пространстве показателей φ (блок 4), т. е. в точку $\tilde{\varphi}^0$ (рис. 2.5 з), соответствующую реально достижимым значениям показателей, и ЛПР анализирует рассогласование $\Delta\varphi^0 = \varphi^0 - \tilde{\varphi}^0$ идеального образа-цели φ^0 и сформированного ЭВМ допустимого решения $\tilde{\varphi}^0$.

Если оно приемлемо, то решение $\tilde{\varphi}^0$ считается наиболее предпочтительным: $\varphi^* = \tilde{\varphi}^0$ и $x^* = x^0$. Если нет, то на следующем шаге ЛПР с учетом полученных сведений корректирует свою концептуальную модель, изменяя ограничения с B на $B + \delta B$ (рис. 2.5 д, блок 5) или целевую установку (рис. 2.5 е), и цикл диалога повторяется для новой точки идеала (цели) φ^1 , x^1 , и множества допустимых решений X^1 . Возможны и другие варианты организации диалога по этой схеме.

Изложенная ЧМ процедура удовлетворяет всем требованиям Т1–Т6. Действительно, работа ЛПР идет в содержательных категориях показателей и ресурсов Т1; ЧМ процедура по построению соответствует структуре итерационной процедуры, определяемой предположением П3; модели легко корректируются заменой одной точки идеала на другую; имеются соответствующие требованию Т5 сходящиеся алгоритмы целенаправленного изменения ограничений.

Можно проверить, что при естественном предположении о рациональном использовании ресурсов, т. е. когда дополнительные ресурсы выделяются на работу в том случае, если это приводит к улучшению конечного результата, решения обладают свойством оптимальности по Парето. Это означает (рис. 2.5 б, в), что ЛПР будет выбирать решения только на границе, а не внутри области допустимых решений.

Легко убедиться, что при изменении точки идеала (значения x в формуле $\tilde{x}_i^0 = B/B^0 x_i^0$) можно выделить все множество Парето. Таким образом, выполняется требование отсутствия исключенных решений Т3: если ЛПР сразу задает допустимое тестовое решение на границе, то оно будет выдано алгоритмом на первой итерации как предпочтительное Т4.

Из выполнения гипотезы о рациональном использовании ресурсов и гипотезы о единственности выбираемого решения при любом наличном количестве ресурсов B следует наличие траектории $\Gamma(B)$ (подробнее см. в гл. 4) предпочтительных решений как в пространстве $\{x\}$, так и в пространстве $\{F\}$. Тогда описанный алгоритм интерпретируется как алгоритм последовательных (кусочно-линейных) приближений к траектории, пересечение

которой с границей множества допустимых решений дает точку, соответствующую наиболее предпочтительному решению. В § 4.3 доказана его сходимость и получены оценки рассогласования решения от наиболее предпочтительного, что соответствует выполнению требования Т5.

Адекватность модели обеспечивается при выполнении лишь двух сделанных содержательных предположений, естественных для задач распределения ресурсов: о рациональном использовании ресурсов и выборе единственного решения. Таким образом, выполняется требование Т6.1. Простой эвристический алгоритм $\bar{x}_i^0 = B/B^0 x_i^0$ формирования допустимого решения на каждом цикле диалога по правилу «урезания» запросов пропорционально дефициту содержательно ясен, часто используется ЛПР, и любой этап процедуры (блоки 1–5 на рис. 2.5) может быть выполнен им вручную, что приводит к выполнению требований Т6.2, Т6.3.

В процессе диалога ЛПР может работать как в пространстве показателей, так и в пространстве ресурсов и корректировать, например, решение x^0 на $x^1 = x^0 + \Delta x$ путем добавления на каждую работу дополнительных ресурсов x покомпонентно, не заботясь о том, чтобы получившийся запрос ресурсов был допустимым. Новое допустимое решение x^1 будет сформировано ЭВМ.

Сходимость последовательности таких эвристических шагов к наиболее предпочтительному решению обеспечивается дополнительными правилами перехода от итерации к итерации (управляющим алгоритмом). Последний в данном случае принимает простой вид выполняемой ЭВМ проверки достаточных условий сходимости: *достаточно, чтобы на каждой последующей итерации покомпонентно общий новый запрос ресурса не превышал запроса на предыдущей итерации.*

Если это условие не выполняется, то ЛПР ставится в известность и корректирует запрос (точку идеала). По умолчанию ЭВМ это делает автоматически, по тому же простому правилу урезания, пересчитывая (блок 4 на рис. 2.5 г) новую точку идеала φ' в пространстве ресурсов $\varphi' = \varphi(x')$. Далее процедура (уже сходящаяся) повторяется без изменений.

При этом ЭВМ может готовить для ЛПР по его запросу дополнительные данные, например, о предельно достижимых значениях $\varphi^{1\max}$, $\varphi^{2\max}$, о степени дефицитности и т. д. Использование такой ЧМ процедуры в практике распределения ресурсов между научно-исследовательскими работами показало, что она сходится в среднем за три-пять итераций.

В дальнейшем для практических процедур будем рассматри-

вать алгоритмы, удовлетворяющие требованиям Т1–Т6, или отмечать их невыполнение.

Перейдем теперь к изложению основных алгоритмов решения типовых задач. При этом особое внимание уделим возможности построения на их основе дескриптивных алгоритмов, пригодных для ручного счета, которые можно рассматривать как естественное продолжение (детализацию) процедур, описанных в этой главе.

2.4. Основные принципы разработки, основные этапы и типовые задачи процедур РСФСР

2.4.1. Основные положения. Излагаемый подход, который можно назвать структурно-распределенным, основывается на реализации единой информационной модели (граф «цели–средства») при распределении, локализации по ее элементам фрагментов данных, ограничений и алгоритмов.

Как показывает анализ распределенных процедур (гл. 1), для них основным элементом является информационное представление производственного процесса, связывающего целый комплекс показателей. Эти элементы и связи между ними и отдельными показателями образуют основу комплексной информационной структуры, отражающей основные взаимосвязи в типовых информационных технологиях.

В рассматриваемой *системе поддержки решений* (СППР) с использованием средств типового банка данных строится специальная информационная структура сетевого типа, вершинами которой на нижнем уровне являются описания элементарных процессов (конкретных технологий), а на остальных уровнях — описания укрупненных процессов или технологий с полным набором характеризующих их натуральных и измеримых показателей (продукция, ресурсы, сроки, территориальная принадлежность и т. д.). Эти вершины объединены соответствующими связями между показателями, возникающими в процедурах формирования решений. Разработка математического обеспечения основана на следующих положениях:

- для рассматриваемого класса задач структура информационных массивов по каждому из показателей определена и в процессе решения не изменяется;
- сегмент информационной структуры (т. е. набор показателей, в том числе агрегированных, и связей между ними) содержится среди всех возможных комбинаций (в декартовом произведении) элементов этих заданных информационных структур;

- число таких элементов и связей, отражающих специфику конкретных процедур, хотя и велико, но для рассматриваемых задач развития вполне приемлемо для реализации на ЭВМ.

Такой путь приводит к значительному (в несколько раз) увеличению объема и сложности программ и требуемой внешней памяти ЭВМ. Однако при этом удается удовлетворить все перечисленные в § 2.3 требования Ф1–Ф14, в частности, требование согласованности значений всех показателей (в том числе при многосторонних ЧМ процедурах), и значительно сократить для пользователя трудоемкость и время поиска и определения согласованных значений набора показателей.

Для решения комплекса подзадач, возникающих в сопровождаемой процедуре, СППР располагает необходимым разнообразием моделей, различающихся масштабами моделируемых объектов, составом и уровнем агрегированности (детальности) используемых показателей, а также видом функциональных зависимостей. Помимо различных вариантов выбора каждой из этих компонент СППР существуют и различные пути объединения моделей (алгоритмов) формирования решений и информационного обеспечения в единый комплекс. Например, построение базы для каждой из них с последующим объединением в интегрированную базу данных.

В рассматриваемой СППР используется другой подход, связанный со стремлением слить модели и алгоритмы с информационной структурой (например, графом «цели–средства»), более адекватно отражающей содержание моделей, с которыми может работать как один пользователь, так и группа пользователей распределенной ЧМС в режиме многостороннего взаимодействия.

Пользователь может работать с элементарной имитационной моделью, соответствующей вершине графа, в которой учитываются первичные натуральные показатели и зависимости между ними. Сеть, задающая комплексную информационную модель объекта в целом (т. е. граф, задающий структуру и определенные на его вершинах и дугах показатели, зависимости и алгоритмы соответствует общей (максимальной) составной модели задачи в целом. Частной модели подзадачи соответствует сегмент (подсеть) комплексной информационной модели.

Простейшей (минимальной) составной моделью, в рамках которой еще возможна организация распределенной процедуры и многостороннее взаимодействие коллектива пользователей, является объединение элементарных моделей в двухуровневой структуре, для которой как для типовой ячейки определяются элемен-

тарные горизонтальные и вертикальные связи, а также локальные алгоритмы прямых расчетов и формирования решений (пример такой ячейки описывается ниже).

Для задания составной модели, с которой может работать конкретный пользователь, требуется выделить сегмент информационной структуры, выбрать конкретный вариант имитационного описания процесса (технологии) и вид алгоритма. Из таких моделей образуются более сложные, которые в совокупности с процедурами их взаимодействия и составляют систему имитационных моделей, лишь условно разделяемую на отдельные модели информационно-алгоритмическую среду, органично вписывающуюся в распределенные ЧМ процедуры решения сложных задач. При этом для любой распределенной составной модели с рассредоточенными по элементам сети характеристиками предусмотрено автоматическое формирование соответствующей ей сосредоточенной оптимизационной модели (задачи математического программирования).

Можно убедиться, что такой подход дает возможность удовлетворить всем требованиям (Ф1–Ф14), сформулированным в предыдущем параграфе, и представляет ряд других возможностей. Перечислим некоторые из них.

1. Учет в сети всех связей показателей дает возможность при изменении значения любого показателя оперативно получать новые значения всех связанных с ним показателей и проследивать не только его влияние вверх по структуре, но и проверять, является ли такое изменение технологически допустимым, т. е. не противоречащим при спуске вниз ограничениям, учитываемым в моделях конкретных технологий.

2. Возможность выделения модели, соответствующей частной подзадаче как сегменту сети, позволяет пользователю оперативно переходить по ходу процедуры от одной задачи и модели к другой — агрегированной или частично агрегированной, что исключает необходимость перепрограммирования (формирования нового программного продукта для каждой новой модели).

3. Организация регулярного получения актуальных данных по состоянию каждого производственного процесса нижнего уровня (например, по сети связи) автоматически обеспечивает исходными данными все частные модели (в том числе оптимизационные). Это снимает проблему сбора и специальной подготовки исходных данных для моделей.

4. При наличии первых трех возможностей, локализации данных и алгоритмов по элементам сети обеспечивается возможность многостороннего взаимодействия пользователей в распределенной

процедуре, сводящегося к организации взаимодействия частных моделей. При этом не накладывается никаких априорных ограничений на порядок решения подзадач, что наряду с возможностью копирования любого фрагмента информационной структуры создает возможность автономного решения подзадач одновременно многими пользователями.

5. Возможность автоматически формировать (за минуты) наряду с локальной имитационной моделью (распределенной) и оптимизационную модель (сосредоточенную) позволяет сочетать преимущества тех и других, объединять на общей основе решения исследовательских и практических задач и регулировать степень распределенности СПР от полностью распределенной, когда все частные задачи решаются автономно с использованием локальных алгоритмов, до полностью сосредоточенной, когда общая модель сводится к одной оптимизационной модели.

6. Выделение типовой ячейки сети (минимальной составной модели) дает возможность унифицировать ее системное математическое обеспечение и повысить оперативность (часы, дни) развития системы.

Отметим еще, что возможности 1–3 и 6 позволяют существенно сократить время реакции системы на различные изменения, производимые пользователем, что является важным условием создания эффективной информационной технологии.

Центральную системообразующую роль при этом играет комплексная информационная модель. Остановимся на ней несколько подробнее.

2.4.2. Комплексная информационная модель. Информационная структура системы, обеспечивая реализацию перечня перечисленных выше функций, в основном должна соответствовать рассмотренной выше структуре графа «цели–средства», играющего роль «несущей конструкции» информационной модели системы целевых программ развития комплекса отраслей.

Как уже отмечалось, элементарным объектом процедур программно-целевого планирования и основным элементом информационного массива является жизненный цикл конкретной технологии. Соответственно элементам нижнего уровня информационной структуры системы сопровождения процедур формирования программ соответствуют эти жизненные циклы, точнее, описывающие их модели. Каждая из них в общем случае разбивается на две части: описание процесса создания технологии и описание функционирования этой технологии (производства продукции). В частном

случае, для существующих технологий (действующих предприятий) в описании присутствует только вторая часть. Соответственно основными становятся построенные на этой базе технологические (производственные) структуры. Каждый элемент этих структур описывается в системе как процесс отдельной имитационной моделью, число которых на нижнем уровне может достигать 10.

Каждый элемент массива, описывающий производственный процесс или процесс выполнения программы, характеризуется набором значений двух групп показателей. Первая группа показателей соответствует выходным результатам (критериям достижения цели, продуктам), вторая — необходимым на входе процесса средствам: ресурсам, материалам и т. п. Каждый показатель имеет свою иерархическую структуру, например структуру программ, технологий, критериев, продуктов, ресурсов, исполнителей, регионов, времени. На нижнем уровне каждой такой частной (по каждому отдельному показателю) структуры типа «дерева» (рис. 2.3) находятся элементарные объекты, на более высоких уровнях — агрегированные. На различных этапах процедур используются разные степени частичного агрегирования показателей (разные «разрезы» структур).

Простые функции выборки, хранения и оперативной корректировки каждого элемента массива данных перечисленных частных структур, а также функции расчета заданного показателя агрегированного элемента каждой отдельной структуры по значениям показателей входящих в него элементов нижнего уровня обычно выполняются средствами языков запросов *систем управления базами данных* (СУБД) общего назначения, функции формирования сложных выходных форм — средствами форматизованного вывода.

Другая группа более сложных функций информационного сопровождения и анализа последствий принимаемых решений связана с тем, что каждая, даже частная задача (например, по отдельной подпрограмме), решаемая в процедуре, характеризуется одновременно сочетанием многих показателей (критериев, ограничений и т. д.), имеющих различную степень агрегирования. Это приводит к необходимости работы с комплексной структурой, обеспечивающей одновременный учет всех информационных связей в каждой из частных структур и наложение этих структур показателей на основные: производственную (технологическую и территориальную) и структуру программ.

Различные алгоритмы формирования локальных решений работают сверху вниз непосредственно на фрагментах информационной структуры. Для каждой вершины частной информационной

структуры иерархического типа алгоритм принятия решений интерпретируется как алгоритм дезагрегирования (разверстки) заданного значения показателя по его составляющим. Алгоритмы разверстки обычно имитируют эвристические приемы пользователей и могут выполняться автоматически, вручную или с контролируемой степенью автоматизации. Упорядочение использования этих «элементарных» алгоритмов решения локальных задач для решения задачи по системе в целом или ее фрагменту производится управляющими (координирующими) алгоритмами или пользователем.

Информационная модель, снабженная элементами искусственного интеллекта, играет роль базы знаний (фактографических: объекты, показатели, их связи; процедурных: имитаторы процессов, алгоритмы, имитирующие действия пользователя, и др.), учитывающей специфику конкретных задач.

2.4.3. Типовой фрагмент информационной структуры. Как отмечалось выше, в практической распределенной процедуре каждая частная подзадача и соответствующие ей элементы информационной модели (фрагмент структуры, связи, зависимости, локальные алгоритмы) должны быть предельно простыми и ясными для пользователя, решающего данную подзадачу.

Рассмотрим типовой фрагмент комплексной информационной модели (рис. 2.3), соответствующий частной задаче и образующий минимальную составную модель. Ограничимся для простоты производственной сферой, не рассматривая строительство и инновации. Основой является двухуровневый фрагмент, состоящий из вершины (процесса) i и входящих в нее вершин (ij) процессов нижележащего уровня. Каждая из этих вершин i , например энергоблок электростанции, описывается комплексом показателей, разбивающихся на три группы: ресурсы (например, топливо B_i), технологические параметры (например, мощность x_i , число часов работы h_i , удельный расход топлива b_i), продукты (например, электроэнергия E_i).

Для части показателей в каждой вершине i определяются ограничения на интервал их возможных значений, например

$$B_i \leq \overline{B}_i, \quad (2.3)$$

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x}_i, \quad (2.4)$$

$$\underline{b}_i \leq b_i \leq \overline{b}_i, \quad (2.5)$$

$$\underline{E}_i \leq E_i \leq \overline{E}_i. \quad (2.6)$$

Эти ограничения могут иметь различную интерпретацию: ограничение по ресурсам (2.3) соответствует ограниченности, например, запасов топлива B_i ; ограничение по технологии (2.4) и (2.5) — прогнозируемым предельным возможностям строительства и инноваций соответственно; ограничение по продуктам (2.6) — требуемому уровню производства.

В рамках каждого процесса показатели (вершины) различных видов связаны между собой по горизонтали. Например, для процесса производства электроэнергии электростанцией на органическом топливе упрощенные соотношения могут иметь следующий вид:

$$x_{ij} = x_{ij}^n + dx_{ij}, \quad (2.7.)$$

$$K_{ij} = k_{ij} dx_{ij}, \quad (2.8)$$

$$E_{ij} = h_{ij} x_{ij}, \quad (2.9)$$

$$B_{ij} = b_{ij} E_{ij} = b_{ij} h_{ij} x_{ij}. \quad (2.10)$$

Здесь x_{ij} — располагаемая мощность, x_{ij}^n — начальная мощность, dx_{ij} — прирост мощности, E_{ij} — выработка электроэнергии, h_{ij} — число часов использования мощности, b_{ij} — удельный расход топлива, B_{ij} — общий расход, k_{ij} — удельные капиталовложения. Каждый показатель в каждой вершине удовлетворяет ограничениям вида (2.3)–(2.6).

В рамках фрагмента частной структуры каждого вида показателя задана связь (по вертикали) между показателями вершин нижнего уровня и агрегированными показателями вершины верхнего уровня. Например,

$$E_i = \sum_j E_{ij}, \quad (2.11)$$

$$x_i = \sum_j x_{ij}, \quad (2.12)$$

$$B_i = \sum_j b_{ij}. \quad (2.13)$$

Эти суммы показателей обычно интерпретируются как частные балансовые соотношения. Здесь это балансы энергии, мощности, топлива.

Кроме этих вертикальных связей могут добавляться горизонтальные связи по этапам жизненного цикла. Для простоты ограничимся частным случаем, когда все технологические параметры (h , k , b и др.) фиксированы и рассматриваются аддитивные по-

казатели B , K , E , связанные между собой соотношениями типа (2.7)–(2.13). Тогда состояние каждой вершины i определяется набором значений всех ее показателей, в данном случае набором B_{ij} , K_{ij} , E_{ij} , а состояние подсистемы — набором значений всех показателей всех ее вершин (12-мерным вектором). Состояние подсистемы (подсети) будем называть *технологически согласованным* (далее просто *согласованным*), если значения всех показателей во всех ее вершинах удовлетворяют всем горизонтальным и вертикальным функциональным взаимосвязям, в данном случае условиям (2.7)–(2.13). Состояние будем называть локально допустимым, если значения всех показателей во всех вершинах удовлетворяют локальным ограничениям сверху и снизу на значения показателей типа (2.3)–(2.6).

Состояние будем называть *допустимым*, если оно технологически согласовано и локально допустимо.

Такое разделение свойств состояния связано с тем, что условия (2.7)–(2.13), соответствующие объективным, неизменяемым технологическим и информационным связям, в процессе планирования являются жесткими, тогда как границы ограничений (2.3)–(2.6) могут на каждом этапе процедур планирования нарушаться или изменяться, и их целесообразно отделить. Тогда задача анализа последствий принимаемого решения (по изменению значений части показателей) сводится к нахождению согласованного состояния.

В случае если изменяются технологические показатели нижнего уровня (например, мощность x_{ij}), то для нахождения остальных показателей используются алгоритмы прямого счета по формулам (2.7)–(2.13). Если у элементарной модели нижнего уровня меняются значения показателей ресурсов или продуктов, то сначала необходимо в имитаторе предусмотреть по согласованию с пользователем правило выбора единственного решения.

Данное решение может быть задано эвристически фиксированной цепочкой (по номерам формул) вычислений или вариантным, в зависимости от ситуации. Например, при снижении потребности в электроэнергии E_{ij} вычисление ведется сначала по формуле (2.3). Если по имеющемуся состоянию системы наиболее дефицитны капиталовложения, то число часов h_{ij} фиксируется, а корректируется (снижается) мощность x_{ij} за счет вводов dx_{ij} . Затем вычисления производятся по формулам (2.5) и (2.6). Если более дефицитно топливо, то в формуле (2.5) фиксируется x_{ij} и снижается число часов работы h_{ij} , что приводит к снижению потребности в топливе B_{ij} .

Возможны и другие алгоритмы (пропорционального изменения, сведения к оптимизационной задаче получения локально оптимальных значений в вершине). При этом вычисления по всем вершинам нижнего уровня могут вестись параллельно различными пользователями элементарных моделей.

Сравнение полученного согласованного значения агрегированных показателей в вершине i границами ограничений (2.3)–(2.6) дает возможность определить, нарушаются ли ограничения и если да, то насколько. При этом автоматически выделяется наиболее дефицитное ограничение (узкое место). То есть целесообразным является расчет согласованных значений и анализ узких мест.

В случае если происходит изменение значения какого-либо показателя в вершине верхнего уровня (например, $x_i^{(2)} = x_i^{(1)} + x_i^{(2)}$), то это изменение необходимо дезагрегировать (разверстать) по значениям показателей вершин нижнего уровня так, чтобы не нарушалось соответствующее условие (2.6). Для этого используются локальные алгоритмы разверстки (деагрегирования).

Как показывают наблюдения, конечный пользователь (ЛФР), содержательно обосновывающий решения, обычно работает, последовательно переходя от проблемы к проблеме, от объекта к объекту, от показателя к показателю, решая каждый раз сравнительно простые локальные задачи. Поэтому рассмотрим сначала простейший случай локального расчета одного показателя от вершины i сверху вниз к непосредственно связанным с нею вершинам следующего, нижнего уровня. Этот расчет качественно отличается от предыдущего (снизу вверх) тем, что разверстка (деагрегирование) возмущения может быть осуществлена многими способами, из которых необходимо выбрать единственный, т. е. она связана с принятием решения. Поэтому для проведения такого расчета необходима дополнительная информация извне (от пользователя) — о стратегии, правилах выбора этого решения.

Если у пользователя есть уверенность, что его стратегия адекватно описывается определенным критерием оптимальности (например, минимизация дефицита энергии), то по его указанию автоматически формируется и решается соответствующая данной локальной задаче оптимизационная модель, а результаты ее решения пересылаются в вершины нижнего уровня.

При ручном режиме пользователь, используя диалоговые средства и анализ последствий (расчет снизу вверх), сам корректирует показатели нижележащих вершин.

Анализ показывает, что в конкретной ситуации по многим локальным задачам имеются вполне очевидные для пользователя

эвристические правила дезагрегирования (разверстки) данного показателя. Эти правила могут быть автоматизированы и выполняться ЭВМ, что резко (на два-три порядка) сокращает затраты времени пользователя на расчеты. Обычно правила различны для разных локальных задач, однако известно, что они укладываются в сравнительно небольшой перечень типовых правил принятия решений. Это позволяет обойтись сравнительно небольшой библиотекой алгоритмов и программ разверстки с параметрами (в первой очереди системы было реализовано 12 таких алгоритмов).

Наиболее типичными являются алгоритмы *пропорциональной* разверстки и *приоритетной* разверстки. Примером пропорциональной разверстки может служить распределение пропорционально старым значениям. Приоритетная разверстка — это распределение сначала на наиболее приоритетную вершину до предельно допустимого по ограничению (2.3) значения, затем остаток распределяется на следующую по приоритету вершину и т. д.).

С разными показателями работают разные пользователи. Затем производится согласование локальных решений, примеры алгоритмов которых рассматриваются в гл. 3 и 4.

Отметим, что прямая последовательная подстановка распределенных по структуре элементарных зависимостей — (2.11)–(2.13) в (2.7)–(2.10) и затем в (2.3)–(2.6) — приводит к системе ограничений вида

$$x_{ij} \leq \sum_j x_{ij} \leq x_j, \quad (2.14)$$

$$\underline{E}_i \leq \sum_j h_{ij} x_{ij}, \quad (2.15)$$

$$\sum_j b_{ij} h_{ij} x_{ij} \leq \bar{B}_i, \quad (2.16)$$

$$\underline{x}_{ij} \leq x_{ij} \leq \bar{x}_{ij}, \quad (2.17)$$

т. е. к матричной форме ограничений на множество допустимых значений $x = (x_{ij})$. Аналогично такое же построение может быть выполнено для любого фрагмента информационной структуры, что и является основой автоматического перехода от распределенной модели к модели сосредоточенной оптимизационной задачи.

Из этого следует важное свойство 2.1 построенного таким образом типового фрагмента структуры, а также и всей распределенной модели, состоящей из таких типовых фрагментов.

Свойство 2.1. Модель с рассредоточенными по структуре локальными связями показателей вида (2.7)–(2.13) и единственной формой локальных ограничений на интервалы возможных значений показателей (2.3)–(2.6) эквивалентна (в смысле множества допустимых решений) матричной форме сосредоточенной модели задачи в целом для показателей нижнего уровня. При этом она предоставляет еще и описанные выше возможности параллельного решения локальных задач в распределенных процедурах.

Таким образом, работая с подзадачами, можно использовать частные фрагменты распределенной модели. При этом обеспечиваемый СПР автоматический пересчет взаимосвязанных показателей гарантирует, что в любой момент времени в РСФСР имеется допустимое решение задачи в целом.

Кроме того, при разработке информационных технологий решения сложных задач на основе описанной распределенной модели далее используются еще и свойства 2.2 и 2.3 (их математическая формулировка доказательства приведена в § 3.4).

Свойство 2.2. Пусть границы интервальных ограничений типа (2.4) и (2.5) любой элементарной модели вышестоящего уровня структуры автоматически получены по общим правилам типа (2.11)–(2.13) из значений показателей моделей нижних уровней. Тогда, если автономное решение на модели верхнего уровня локально допустимо по ограничениям типа (2.4), (2.5), то оно допустимо (степень нарушения ограничений) и с учетом всех ограничений всех моделей нижележащих уровней.

При формировании вариантов стратегических решений задачи в целом можно работать только с агрегированными показателями концептуальной модели верхнего уровня, не спускаясь каждый раз по структуре для проверки допустимости решения при детализации показателей и ограничений.

Свойство 2.3. Пусть рассматривается класс задач целенаправленного развития, допускающий его описание траекторией с параметром. Тогда:

1) *формирование решения любой элементарной модели, которое может быть получено каким-либо способом, можно найти с заданной точностью алгоритмом, использующим траекторный подход, удовлетворяющим требованиям § 2.3 и имеющим минимальную сложность;*

2) применение этого алгоритма для решения частных задач во всех локальных фрагментах распределенной модели обеспечивает получение согласованного и допустимого решения задачи в целом (в том числе задач сложного согласования решений);

3) процесс формирования согласованного решения любой частной или общей задачи может быть разложен на последовательность эвристических алгоритмов пропорциональной разверстки, дающую результат решения (в том числе оптимального) с заданной погрешностью.

2.5. Структура и функции исполнителей в распределенной системе формирования согласованных решений

Основными целями создания распределенной системы поддержки управленческих решений являются повышение качества (эффективности, реализуемости и др.) плановых и управленческих решений и кратное повышение производительности труда управленцев. Результатом разработки является комплекс взаимосвязанных автоматизированных рабочих мест (АРМ) конечных пользователей, включающих технические и программные средства, а также технологию их использования при решении конкретных подзадач и задачи в целом:

Пользователя, имеющего специальную подготовку по использованию математических и технических средств, позволяющую ему самостоятельно и эффективно решать свои задачи на ЭВМ, будем называть *подготовленным* пользователем распределенной системы принятия решений, а не имеющего такой подготовки — *неподготовленным* пользователем.

По выполняемым функциям и характеру работы с системой *поддержки принятия решений* (СППР) множество всех пользователей будем разделять на три основные группы.

1. Лица, ответственные за содержательные результаты решения подзадач и задачи в целом, которых мы называем *конечными* пользователями. Среди них выделяются: ЛПР — лица, принимающие решения, несущие ответственность за результат решения задачи в целом и осуществляющие выбор варианта решения, как правило, являющиеся неподготовленными пользователями; ЛФР — лица, формирующие решения, отвечающие за своевременное и качественное (с точки зрения ЛПР) решение своей подзадачи и осуществляющие подготовку и обоснование вариан-

тов решения. Эти пользователи, поначалу неподготовленные, по мере накопления опыта работы с СППР часто переходят в категорию подготовленных.

Для каждого конечного пользователя СППР должна обеспечиваться возможность прямого личного контроля над всеми стадиями процессов обработки информации, относящихся к его персональным вычислениям.

2. Лица, обеспечивающие нормальное функционирование СППР, которых будем называть *специальными* пользователями. Среди них можно выделить специалистов, обеспечивающих эксплуатацию СППР (сотрудники, ведущие базы данных и выполняющие ряд заданий ЛПР и ЛФР, инженерный и технический персонал, обеспечивающий массовый вывод, хранение, копирование данных и т. п.).

3. Специалист — разработчик моделей, алгоритмов и программ. Это обычно хорошо подготовленные пользователи. Основное назначение СППР — обеспечение в рамках ЧМС в целом эффективной работы конечных пользователей, и прежде всего ЛПР, отвечающих за конечные результаты. Однако следует отметить, что основное время (95–99 %) использования СППР в практических процедурах связано с работами ЛФР, решающих отдельные подзадачи, и их помощников, эксплуатирующих СППР, выполняющих отдельные поручения ЛФР и ЛПР. Именно они составляют основную массу (порядка 99 %) параллельно работающих пользователей распределенной СППР, что необходимо учитывать при ее разработке.

Опыт показывает, что рациональная организация разработки и использования СППР связана с разделением функций между членами группами специалистов.

1. Конечные пользователи — управленцы, владеющие содержательной стороной задач (руководители АРМ, специалисты, технические работники), которые сами или через помощников работают с терминалом, решая типовые подзадачи переработки информации. С их точки зрения, система поддержки решений воспринимается как сравнительно небольшой набор типовых технологий (операций) переработки информации на имеющихся технических средствах, позволяющий решать основную часть текущих содержательных подзадач, относящихся к данному рабочему месту. Эти технологии мы называем информационными технологиями (ИТ). Конечные пользователи не имеют специальной подготовки в области математики, программирования и т. п. и предпочитают простые удобные средства общения с ЭВМ.

2. Проектанты ИТ (рабочие места в ИВЦ, отделах перспективы в министерствах и НПО), которые разрабатывают и оперативно в контакте с конечными пользователями корректируют ИТ решения типовых подзадач и дают рекомендации по комплексным технологиям решения сложных задач. Для них система поддержки решений — это прежде всего гибкая оперативная *система конструирования информационных технологий*, своего рода САПР для информационных технологий (САПР ИТ).

3. Аналитики (исследователи в научных центрах объединений, отделах ИВЦ и др.), владеющими содержательной постановкой задач, моделями и методами их решения. Совместно с отделными специалистами (экономистами, строителями и др.) исследуют свойства управляемых объектов. Проводят комплексный анализ и выделение ключевых проблем (наиболее узких мест развития), выделяют минимум наиболее существенных показателей и связей, которые целесообразно рассматривать на рабочих местах руководителей различных уровней, дают рекомендации по построению комплексных ИТ и их элементов и т. п. Для аналитика система поддержки — это прежде всего гибкие средства формирования и исследования комплексов моделей.

4. Разработчики программных средств, новых типов моделей и методов решения основных задач — специалисты, работы которых должны обеспечивать единую основу создания и непрерывного развития *базовых программных средств* автоматизации элементарных операций обработки информации, средств оперативного построения и корректировки комплексов моделей, разработку на их основе *элементарных информационных технологий* (ЭИТ) и средств конструирования из них типовых человеко-машинных информационных технологий для решения содержательных подзадач конечных пользователей и исследователей.

Таким образом, в распределенной системе поддержки решений можно выделить четыре рассматриваемые ниже составные части:

- 1) конечный результат (верхняя часть «айсберга») — информационные технологии решения комплекса задач;
- 2) систему конструирования информационных технологий;
- 3) автоматизированную систему моделирования;
- 4) базовые программные средства.

ЧАСТЬ II

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

Глава 3

Модель распределенной системы

В данной главе дается математическая формализация основных понятий и свойств распределенных систем. Основное внимание уделяется системообразующим факторам и процедурам, обеспечивающим согласование автономно решаемых подзадач. Обсуждаются основные теоремы, являющиеся математическим обоснованием распределенных человеко-машинных процедур, а также вопросы реализации этих процедур на сети ПЭВМ.

3.1. Основные понятия и определения

Понятие «распределенность» в настоящем издании мы относим к *распределенным организационно-техническим системам* (РОТС), функции которых и протекающие процессы распределены, рассредоточены по коллективу исполнителей и, возможно, комплексу машин. Мы ограничиваемся информационными аспектами решения сложных задач, возникающих в процедурах формирования программ. Практически все реальные процедуры решения таких задач являются распределенными в том смысле, что решаемый комплекс подзадач (соответствующая информация, операции над ней, алгоритмы, ответственность за результаты и т. д.) рассредоточен по многим рабочим местам (исполнителям) и этапам.

Анализ показывает, что основными признаками распределенности некоторой системы можно назвать следующие:

- наличие механизма разбиения рассматриваемого объекта (системы) на взаимосвязанные подсистемы (чаще всего на большое количество подсистем);
- наличие общей цели (назначения) при распределении функций системы в целом по подсистемам;
- физическая обособленность каждой подсистемы и относительная автономность выбора своих состояний в каждой подсистеме в рамках текущего (на момент выбора) множества допустимых состояний, зависящего от состояний соседних подсистем;

- наличие «регламентирующего фактора», позволяющего отдельным исполнителям, решающим в рамках своих подсистем локальные задачи, формировать согласованное решение, отвечающее поставленной общей цели.

С точки зрения функционирования системы эти признаки можно перефразировать соответственно следующим образом:

- наличие механизма разбиения исходной общей задачи на децентрализованно решаемые подзадачи;
- возможность параллельного решения части подзадач различными исполнителями;
- наличие (в определенной степени) свободы выбора при формировании решения каждой подзадачи;
- наличие средств согласования и синхронизации процедур решения подзадач.

Уточним некоторые понятия, связанные с рассматриваемыми далее РОТС и автоматизированными системами сопровождения распределенных процедур.

Множество исполнителей разбивается на два подмножества: технические средства и их пользователи. Пользователи являются членами организационной системы, имеют определенную специализацию (компетенцию) и несут ответственность за определенные объекты и функции (классы подзадач). Они могут реализовывать как неформальные методы решения подзадач, так и формальные (алгоритмы), для которых имеется соответствующее программное обеспечение.

Распределенная система поддержки принятия решений (РСППР) — комплекс технических (ЭВМ и средства общения с ними пользователей), и математических (программное обеспечение, реализующее алгоритмы, соответствующие формализуемым и автоматизируемым операциям процедуры) средств.

Коллектив пользователей и РСППР, объединенные общей задачей (комплексом подзадач), образуют человеко-машинную систему (ЧМС), в которой объект, цели, задачи, подзадачи и выбор методов их решения должны определяться пользователями, а РСППР должна обеспечивать эффективные и удобные для этих пользователей средства их решения. По характеру использования РСППР в практических задачах должна быть имитационной системой, т. е. алгоритмически воспроизводить течение процессов в анализируемом объекте при различных вариантах управления, определяемых пользователями, формировать в каждый момент времени «разумные», а не только формально-оптимальные варианты

решения подзадач, соответствующие состоянию рассматриваемого процесса. Для этого желательно, чтобы РСППР не ограничивала возможности каждого из пользователей в выборе последовательности решения подзадач, соответствующих фрагментов информации, возможностей корректировки значений показателей вручную, автоматически (на ЭВМ) или в режиме диалога с ЭВМ.

Наряду с диалоговым режимом взаимодействия одного пользователя с ЭВМ в процессе решения одной задачи будем рассматривать характерный для распределенных ЧМС режим многостороннего взаимодействия с ЭВМ. В этом случае коллектив пользователей решает комплекс взаимосвязанных задач в режиме диалога, обменивается через ЭВМ или сеть ЭВМ с другими пользователями необходимыми данными, согласует их и т. д. Для практических распределенных процедур формирования решений (особенно согласований) важно, чтобы РСППР обеспечивала возможность одновременной работы многих пользователей в режиме многостороннего взаимодействия их между собой и друг с другом. Можно выделить три основные части математического (программного) обеспечения РСППР:

- 1) алгоритмы и программы, используемые пользователями для имитации процессов и формирования решений;
- 2) программы, обеспечивающие удобное и эффективное общение пользователей с ЭВМ;
- 3) общая база данных (возможно, распределенная по сети ЭВМ), имеющих определенную структуру связей (информационную структуру), отражающую специфику конкретного объекта, задач и сопровождения процедур.

При определении типа РСППР или процедуры за основу будем принимать их технологические возможности, характеризующие собственно систему или процедуру, а не один из конкретных вариантов реализации этих возможностей. В частности, будем считать РСППР распределенной, если она может обеспечить реализацию распределенной процедуры (многосторонний режим взаимодействия пользователей с ЭВМ и др.). Соответственно процедуру формирования решения задачи будем называть распределенной, если она допускает при решении комплекса взаимосвязанных подзадач одновременное (параллельное) функционирование пользователей.

Попробуем формализовать описание РСППР. Реальные сложные распределенные системы и процедуры включают целый ряд существенных неформализуемых элементов и не поддаются полному формальному описанию. С другой стороны, для разработки

автоматизированной РСППР, выполняющей только формализуемые операции, такое формальное описание оказывается полезным. Приведем один из возможных вариантов такого описания.

Пусть имеется множество объектов $I = \{i\}$, каждый из которых характеризуется вектором значений показателей $x_i = \{x_{ip}\}$, $i \in I$, $p \in P$, где P — множество показателей. Рассмотрим граф $G(U, V)$, где $V = I \cup P$ — множество вершин, соответствующее множеству объектов и показателей, а U — множество дуг, устанавливающих соотношение между каждым объектом и показателями и между различными объектами. Пусть на множестве дуг и вершин графа G заданы функциональные соотношения:

$$\begin{aligned} f_l(\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{r_l}; u_1, u_2, \dots, u_{q_l}) &= 0, \\ \nu_1 \in V, \dots, \nu_{r_l} &\in V, \\ u_1 \in U, \dots, u_{q_l} &\in U, \\ l &\in L, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где L — множество функциональных связей вида (3.1), заданных в графе G .

Сеть $\tilde{G}$, т. е. граф G с заданными на нем функциональными соотношениями (3.1), будем называть *общей моделью системы*.

Будем называть *состоянием системы* набор значений показателей $x = \{x_{ip}\}$ для всех $i \in I$, $p \in P$, т. е. точку x в фазовом пространстве (пространстве показателей). Состояние системы будем называть *допустимым*, если набор значений показателей $\{x_{ip}\}$, $i \in I$, $p \in P$ удовлетворяет соотношениям (3.1), а соответствующее множество X^0 назовем *множеством допустимых состояний*.

В случае, если на множестве X^0 определено отношение предпочтения R , будем говорить о выделении из X^0 подмножества X^* недоминируемых по R состояний (в частности, единственного наиболее предпочтительного решения x^*):

$$X^* = \{x^* | x^* \in X, x \in X : xRx^*\}. \quad (3.2)$$

Тогда возникает задача Z_0 нахождения допустимого или в данном смысле (3.2) недоминируемого состояния (множества состояний). В дальнейшем такое состояние x^* , являющееся решением задачи Z_0 , будем называть *решением*.

В общем случае под задачей Z_0 , поставленной на РОТС, будем понимать кортеж

$$Z_0 = \langle x_0, \Phi^*, P_\Phi \rangle, \quad (3.3)$$

где x_0 — начальное состояние системы, Φ^* — конечное множество состояний, заданное на некотором подмножестве $P_\Phi \subseteq P$ показателей системы.

Множество P_Φ будем называть *множеством выходных показателей* (критериев функционирования системы). Состояние $x^* = \{x_p^*\}_{p \in P}$ будем называть *решением задачи* (3.3).

Если $x_\Phi^* \in \Phi^*$, где $x_\Phi^* = \{x_p^*\}_{p \in P_\Phi}$, т. е. компоненты x^* , принадлежащие P_Φ , образуют вектор x_Φ^* , лежащий в желаемой области Φ^* . Множество Φ^* может задаваться различными способами в виде области (или дискретного набора точек), как это принято в практике планирования:

1) неявно — посредством некоторого отношения предпочтения (3.2), с помощью оптимизирующего функционала

$$\begin{aligned} \Phi^* &= \{\phi^* \mid \phi^* = \arg \operatorname{ort} f(\phi, y)\}, \\ \phi &\in \Phi, \quad y \in X \setminus \Phi; \end{aligned} \quad (3.4)$$

2) через траекторию предпочтительных решений

$$\Phi^* = \{\phi^* \mid \phi^* = \Gamma_\phi(\xi^*), \xi^* \in [0, 1]\}, \quad (3.5)$$

где $\Gamma_\phi(\xi)$ — линия (без петель) в пространстве Φ (т. е. траектория).

Пусть задано множество исполнителей $J = \{j\}$, каждый из которых может использовать операторы (методики, алгоритмы) A_j из заданного класса A . Причем ни один из этих операторов не может реализовать функцию выбора f (см. (3.4)), т. е. решение общей задачи Z_0 в целом практически нереализуемо без ее разбиения на частные подзадачи Z_k , для каждой из которых существует хотя бы один оператор A_{jk} , дающий ее решение:

$$X_k^* = A_{jk}(\tilde{G}_k). \quad (3.6)$$

Здесь $\tilde{G}_k$ — модель, соответствующая подзадаче Z_k , т. е. подграф $G_k(V_k, U_k)$ графа G вместе с множеством заданных на нем функциональных связей типа (3.1).

Тогда в распределенной системе порождается кортеж

$$S = \langle \{Z_k\}, \{\tilde{G}_k\}, J, \{A_j\} \rangle, \quad (3.7)$$

где $\langle \{Z_k\}, \{\tilde{G}_k\}, J, \{A_j\} \rangle$ — множества всех подзадач, соответствующих им моделей, исполнителей и классов алгоритмов.

Определение 3.1. *Распределенной организационно-технической системой, ориентированной на решение класса задач Z на объекте O , будем называть отображение Σ :*

$$(\tilde{G}, \Pi, Z) \mapsto \langle \{P_k\}, \{Z_k\}, \{G_k\}, J, \{A_j\}, \{R\} \rangle, \quad (3.8)$$

где Z_k — задача, на которую ориентирована k -я подсистема; Π_k — среда (или пространство показателей), в терминах которой формулируются задачи Z_k и описывается модель $\tilde{G}_k$; R — некоторый фактор, регламентирующий взаимодействие локальных подсистем.

Вариант отображения (3.8) с выбранными из классов L задачами Z_k , средами Π_k и моделями $\tilde{G}_k$, т. е. кортеж (3.7), будем называть *реализацией распределенной системы*. Добавление к кортежу (3.7) «регламентирующего фактора» R из класса K порождает распределенную процедуру (ПП):

$$\Pi = \langle \{Z_k\}, \{G_k\}, J, \{A_j\}, R \rangle. \quad (3.9)$$

Отображение Σ в выражении (3.8) можно представить в виде $\langle f, A \rangle$, где A — механизм «А», формирующий подсистемы $\{\tilde{G}_k\}$ и выбирающий задачи $\{Z_k\}$, которые на этих подсистемах могут быть решены исполнителями J с помощью операторов A_j , f — средство адаптации механизма «А» к меняющимся условиям.

Если класс задач Z или объект O (и соответственно его модель $\tilde{G}$) меняются, РОТС должна либо адаптироваться, т. е. изменить механизм «А» отображения (3.8), либо перестать существовать из-за потери адекватности.

Остановимся более подробно на понятии «распределенная процедура». Семейство множеств (3.7) порождает множество $B = \{B_k\}$ возможных блоков (операций) процедуры, описываемых кортежами вида

$$B_k = \langle Z_k, \tilde{G}_k, j_k, A_{jk} \rangle, \quad (3.10)$$

где Z_k — k -я подзадача, в соответствие которой поставлены модель $\tilde{G}_k$, исполнитель j_k и оператор A_{jk} , дающий решение этой подзадачи.

Заметим, что для решения одной и той же подзадачи может быть использовано множество альтернативных блоков. Каждый блок является элементом декартова произведения множеств, входящих в (3.7), а множество блоков $B = \{B_k\}$, являющееся подмножеством этого декартова произведения, характеризует возможности распределенной системы по решению задачи Z_O .

Элементарным блоком (операцией) решения задачи будем называть множество операторов, выполнение которых может привести к изменению состояния системы (изменению значения хотя бы одного показателя). Выделим в состоянии $\{x_{ip}\}$, $i \in I$, $p \in P$, системы компоненты $\{x_{i_k p_k}\}$, $i_k \in I_k$, $p_k \in P_k$, где P_k , I_k — множество показателей и объектов, входящих в граф G_k локальной k -й модели. Тогда компоненты $\{x_{i_k p_k}^{r-1}\}$ состояния $\{x_{ip}^{r-1}\}$ будем называть входной информацией для блока B_k , а компоненты $\{x_{i_k p_k}^r\}$ состояния $\{x_{ip}^r\}$ — выходной информацией для блока B_k . Таком решении задачи назовем реализацию хотя бы одного элементарного блока, приводящего к изменению состояния системы.

Пусть выполнено $r - 1$ тактов и необходимо определить блоки, выполняемые на такте r . Обозначим через Y правило упорядочения работы блоков:

$$k^r = Y(B, x^1, x^2, \dots, x^{r-1}), \quad (3.11)$$

где k^r — имя активизируемого на r -м такте блока, $x^1, x^2, \dots, x^{r-1}$ — состояния системы на предыдущих $r - 1$ тактах.

Тогда реализацией распределенной процедуры Π формирования взаимосвязанных подзадач $\{Z_k\}$ назовем кортеж

$$\Pi = \langle B, Y \rangle. \quad (3.12)$$

Определение 3.2. *Процедуру будем называть сходящейся, если порождаемая ею по тактам последовательность состояний $\{X^r\}$ сходится в каком-либо смысле. Будем выделять случаи сходимости к допустимому x_0 или к наиболее предпочтительному решению.*

Для обеспечения сходимости при решении сводной задачи Z_0 помимо построения правила Y необходима коррекция локальных операторов A_k решения частных задач, выбранных соответствующими исполнителями. Обозначим через $C_{k,r}$ оператор коррекции, применяемый к блоку $B_{k,r}$:

$$x_r = C_{kr}(A_k(x^{r-1}), x^{r-1}, B_{kr}). \quad (3.13)$$

Можно выделить три варианта коррекции результата работы оператора A_{kr} :

1) коррекция управляющих параметров α оператора A_{kr} (например, если A_{kr} является алгоритмом линейной оптимизации, то, варьируя вектор целевой функции α , мы будем получать различные решения);

2) сужение множества X_{kr} (например, условие, что A_{kr} является алгоритмом линейной оптимизации, будет означать введение дополнительных ограничений помимо (3.6));

3) коррекция непосредственно решения, сформированного оператором A_{kr} .

Если процедура (3.11) допускает параллельное выполнение элементарных блоков, то она является распределенной.

Под реализацией процедуры будем понимать конкретный набор блоков и порядок их выполнения во времени, получившийся в процессе решения конкретной задачи (она зависит от начального состояния, числа исполнителей и т. п.). Соответственно, распределенной СПР будем называть такую СПР, с помощью которой можно реализовать распределенную процедуру.

Заметим, что в приведенной выше интерпретации РП роль «регламентирующего фактора» играет кортеж

$$R = \langle Y, \{C_k\} \rangle, \quad (3.14)$$

где Y — правило упорядочения работы блоков, $\{C_k\}$ — множество корректирующих операторов.

3.1.1. Задачи и проблемы. Из приведенного описания ясно, что центральной проблемой разработки распределенных процедур решения сложных задач является нахождение такой декомпозиции задачи на подзадачи и выбор таких методов, алгоритмов и исполнителей для этих подзадач, которые приводили бы к получению приемлемого по качеству решения задачи в целом за приемлемое время. В общем случае эти проблемы решаются неформально (планирование человеческой деятельности, целеобразование), а регулярные методы их решения пока отсутствуют.

В основном это связано с тем, что задачи реальных распределенных процедур оказываются неформализуемыми и решаются на сложной информационной структуре. Причем в типичном на практике случае, когда цели исполнителей не совпадают с целью системы в целом, исполнители могут активно искажать исходную информацию, формировать решения, оптимальные лишь по локальным критериям, и т. д. Возникает проблема стимулирования достоверности информации, согласования целей.

Таким образом, основные новые проблемы (дополнительно к имеющимся методам декомпозиции) при разработке РСППР связаны главным образом с тем, что:

- имеется множество исполнителей и необходимо обеспечить их одновременное многостороннее взаимодействие с ЭВМ и между собой;

- заданы существенные ограничения на класс алгоритмов, приемлемых для каждого из пользователей;
- задачи лишь частично формализуемы;
- разбиение на подзадачи в значительной мере определяется составом и возможностями исполнителей;
- все алгоритмы и человеко-машинные процедуры должны быть привязаны к заданной сложной информационной структуре.

Рассмотрим в качестве примера вариант распределенной подсистемы, соответствующей решению одной из типовых подзадач формирования частных и сводных балансов в двухуровневой организационной системе.

Имеется двухуровневая *информационная структура* объекта: система i_0 (например, энергосистема) и входящие в нее производственные объекты i (электростанции и линии электропередач). Каждый объект i и система в целом i_0 характеризуются вектором из множества показателей $\{p\}$, $p = 1, 2, \dots, m$ (например, производство энергии, мощность, расход топлива и т. п.). Структура связей объектов и показателей описывается двудольным графом G или соответствующей ему матрицей из единиц и нулей. Каждый показатель системы i_0 связан с показателями объектов линейными соотношениями вида

$$\sum_{i=1}^n a_i^p x_i = b_{i_0}^p, \quad p = 1, 2, \dots, m, \quad (3.15)$$

где, например, x_i — мощность электростанций i ; $b_{i_0}^p$ — производимая системой i_0 продукция вида p ; b_i^p — расходуемые системой i_0 ресурсы; $a_1^p, \dots, a_n^p$ — соответствующие удельные показатели. В матричной форме система (3.15) имеет вид

$$Ax = b. \quad (3.16)$$

Заданы интервалы изменения всех показателей:

$$\underline{x}_i < x_i < \bar{x}_i, \quad \underline{a}_i^p < a_i^p < \bar{a}_i^p, \quad \underline{b}_{i_0}^p < b_{i_0}^p < \bar{b}_{i_0}^p. \quad (3.17)$$

Здесь значения $\underline{x}_i$, $\bar{x}_i$, $\underline{a}_i^p$, $\bar{a}_i^p$ определяются, например, предельными технологическими возможностями; значения $\underline{b}_{i_0}^p$ соответствуют требуемому уровню производства продукции, $\bar{b}_{i_0}^p$ соответствуют уровню выделяемых ресурсов (по системе i_0 в целом).

Условия (3.16), (3.17) определяют множество допустимых решений X_0 (состояний объектов).

Задача формирования сводного и частных балансов частично формализуема: критерии и часть условий учитываются людьми

неформально, другая часть условий (балансовых соотношений) задана формально в виде (3.16), (3.17). Формализуемая часть задачи сводится к нахождению:

А. Допустимого решения $x_0 \in X_0$ систем (3.16), (3.17) при заданных

$$b_{i_0}^p, a_i^p, (\underline{a}_i^p = \bar{a}_i^p, b_{i_0}^p = \bar{b}_{i_0}^p).$$

Б. Допустимого и наиболее предпочтительного решения $x^* \in X_0$.

Решение исходной практической задачи нереализуемо одним исполнителем, и она разбивается на частные подзадачи сведения частных балансов и обеспечения необходимого функционирования объектов, а также сводную задачу формирования сводного баланса и выбора соответствующего состояния объектов и системы в целом.

Коллектив *исполнителей* также имеет двухуровневую линейно-функциональную структуру (например, руководитель управления энергосистемой (ЛПР) и подчиненные ему ответственные исполнители по подзадам — руководители соответствующих подразделений (ЛФР)).

Часть исполнителей (линейные ЛФР) специализируется по отдельным объектам. Они определяют показатели a_i^p , x_i и их предельные значения, отвечают за мероприятия, обеспечивающие реализацию необходимых значений этих показателей, и т. д. Другая часть исполнителей (функциональные ЛФР) специализируется по различным функциям системы (производству, строительству, топливоснабжению и т. п.). Каждый из них отвечает за сведение частного баланса по соответствующему показателю или группе показателей (энергии, топливу, капиталовложениям и т. п.). В терминах матричной информационной структуры каждый ЛФР_{*i*} работает с данными по столбцам *i*, ЛФР_{*p*} — по строке *p* или группе строк. В функции ЛФР входит подготовка предложений по решению своих частных задач, поставленных руководителем организации ЛПР₀, отвечающим за функционирование системы *i*₀ в целом и выбор варианта ее состояния (согласованного решения).

При руководителе обычно работает сводное подразделение, выполняющее штабные функции, и соответствующий ответственный исполнитель ЛФР₀, отвечающий за подготовку предложений по решению сводной задачи (увязывающий решения локально решаемых частных задач и координирующий деятельность всех ЛФР и ЛПР). Реально связи нелинейны, каждый ЛФР работает с целым штатом подчиненных и со своей более подробной информацией, не входящей в модель. По существу, условия (3.16) являются моде-

люю формализуемой части сводной подзадачи, которая играет роль связующего звена, объединяющего связи всех ЛФР.

Методы и алгоритмы. Каждый ЛФР, как правило, использует свои устоявшиеся неформальные представления и приемы (методы), в том числе эвристические алгоритмы формирования решений.

Процедура. Состав подзадач и их распределение по исполнителям с учетом специализации последних, а также определение соответствующего информационного фрагмента практически не имеют вариантов. Основной проблемой является решение сводной задачи и, возможно, коррекция в связи с этим локальных алгоритмов решения частных задач в рамках приемлемых для исполнителей сценариев типа схемы целенаправленного выявления и устранения узких мест. Возможны различные варианты решения таких проблем, некоторые из них излагаются ниже.

Частным случаем распределенной системы при полностью формализуемой задаче и исполнителе ЭВМ (или многопроцессорной ЭВМ) является распределенная вычислительная система решения, например, задач линейной алгебры, возможно, с распределенным банком данных.

Рассматриваемые практические распределенные системы и процедуры формирования программ относятся к одному из наиболее общих и сложных типов систем, составные части которых имеют следующие характеристики.

1. Информационная структура: комплексная многоуровневая сетевого типа с нелинейными связями.

2. Задача (формирование программ развития комплекса отраслей): сложная, частично формализуемая, включающая исследовательские и практические подзадачи (основные типовые подзадачи комплексного характера перечислены в § 2.4 и описаны в гл. 1, 2, 4).

3. Исполнители: коллектив исполнителей и технических средств, имеющих многоуровневую организационную структуру органов планирования и управления комплекса отраслей (см. гл. 2).

4. Методы, алгоритмы: для исследовательских подзадач — формальные, для практических подзадач — из заданного класса дескриптивных, позволяющих работать с информацией по частям и удовлетворяющих ряду специальных требований (приведены в § 3.2).

5. Процедура имеет общую последовательно-параллельную структуру, является итерационной человеко-машинной с многосторонним взаимодействием.

3.2. Основные типы и свойства распределенных систем

В настоящее время трудно дать краткое и исчерпывающее определение сложных распределенных систем и процедур, однако можно выделить следующие их основные составляющие и характерные особенности, которые необходимо учитывать при разработке систем сопровождения процедур формирования решений.

1. Содержательный объект, относительно которого принимается решение, является сложным. В процессе формирования решения он отображается информационной моделью, имеющей многоуровневую структуру (далее будем говорить только об информационной структуре объекта).

2. Общая задача сложна и не поддается решению. Она разбивается на комплекс взаимосвязанных и достаточно простых (по сильным имеющимся в наличии исполнителям) подзадач, среди которых выделяются частные подзадачи и сводная подзадача их координации.

3. Исполнители, реализующие решение подзадач и задачи в целом — коллектив людей и (или) комплекс технических средств, связанных определенными отношениями и обладающих ограниченными возможностями. Исполнители являются активными элементами системы, и в общем случае их цели не совпадают с целью системы в целом.

4. Методы и алгоритмы решения подзадач удовлетворяют специальным требованиям, учитывающим особенности работы исполнителей и информационной структуры.

5. Процедура, регламентирующая решение задачи в целом, увязывающая все перечисленные составляющие в операции (блоки) и упорядочивающая их выполнение, включая обмены данными, допускает параллельное (одновременное) выполнение части операций.

Следует отметить, что все эти составляющие являются сложными и декомпозируются на составные части, вплоть до элементарных. Понятие элементарного объекта, подзадачи, операции, фрагмента информации существенно зависит от содержательного характера конкретной решаемой задачи, возможностей исполнителей и определяется в каждом случае отдельно.

Первые четыре составляющие характеризуют распределенную систему формирования решений, в значительной мере определяющую и характер распределенной процедуры (т. е. информационного процесса, протекающего в распределенной системе). Каждая из этих составляющих может иметь различные варианты реали-

зации, конкретные сочетания которых соответствуют различным типам распределенных систем и процедур. Приведем некоторые из типичных вариантов.

1. Информационная структура объекта:

- а) простейшая и содержит лишь перечень объектов, характеризующихся единственным показателем (информационный массив — вектор);
- б) то же, но с вектором показателей (информационный массив — матрица);
- в) объекты и (или) показатели имеют многоуровневую структуру древесного типа;
- г) то же, но с сетевой структурой общего вида и т. п.

2. Задача:

- а) исследовательская или практическая;
- б) простая или сложная (требующая разбиения на подзадачи);
- в) локальная (частная) или сводная;
- г) формализуемая, частично формализуемая или неформализуемая;
- д) с линейными или нелинейными связями между показателями и т. п.

3. Исполнители:

- а) человек или техническое средство;
- б) один или множество исполнителей;
- в) множество исполнителей образует двухуровневую или многоуровневую организационно-техническую систему и т. п.

4. Метод или алгоритм:

- а) формальный (математический) или неформальный;
- б) работающий с полной исходной информацией задачи или с ее частями, обозримыми для исполнителя;
- в) с регулируемой степенью автоматизации или нет;
- г) содержательно интерпретируемый для данного пользователя или нет и т. п.

5. Процедура:

- а) разбивающаяся только на последовательно выполняемые операции (блоки), только на параллельно выполняемые блоки или последовательно-параллельная;
- б) выполняемая вручную (только люди), автоматически (только ЭВМ) или человеко-машинная диалоговая с многосторонним взаимодействием;
- в) одношаговая или итерационная и т. п.

Сочетание простейших вариантов этих составляющих (простая задача, решаемая одним исполнителем, работающим со своей ис-

ходной информацией, простая структура) соответствует элементарной сосредоточенной процедуре (операции), т. е. минимальной степени распределенности.

Максимальной степени распределенности системы формирования решений соответствует ситуация, когда задача (функция) системы, а следовательно, и все решаемые подзадачи, методы их решения и информация распределены по всем имеющимся исполнителям так, что соответствующая процедура, регламентирующая процесс решения комплекса взаимосвязанных подзадач, допускает одновременное функционирование всех исполнителей.

Реальным распределенным системам и процедурам соответствуют промежуточные ситуации, типичными для них являются сложные многоуровневые информационные структуры объектов, связанная с ними иерархия частично формализуемых задач, иерархическая структура исполнителей и т. д.

Конкретным вариантом использования такой РСППР, определяемым, например, отсутствием или нерациональностью привлечения в данный момент всех исполнителей, может быть и последовательное решение подзадач одним пользователем. Заметим, что такой вариант использования РСППР должен быть предусмотрен в связи с такой важной особенностью реальных распределенных систем, когда каждый исполнитель имеет представление о работе непосредственно взаимодействующих с ним других исполнителей, активно использует это и частично дублирует их функции. Соответственно РСППР наряду с подробной моделью и информацией по подзадаче, решаемой данным конечным пользователем, должна предоставлять ему возможность «проигрывать» грубые модели, имитирующие функционирование связанных с ним пользователей.

Отметим, что такая заблаговременная проработка (подготовка данных и вариантов частных решений) каждой подзадачи с учетом ожидаемого отклика ЛПР и других ЛФР является одним из основных факторов, определяющих готовность данного ЛФР к быстрой реакции при уточнении значений обменных показателей и обеспечивающих распараллеливание выполнения подготовительных операций разными исполнителями.

Рассмотрим некоторые формальные свойства РОТС. В предыдущем параграфе было дано формальное определение РОТС. Из этого определения следует, что к основным свойствам РОТС можно отнести следующие:

а) ориентация на объект O и класс задач Z , решаемый на этом объекте;

б) наличие механизма «А», который для каждой задачи $Z \in Z$ выделяет множество подсистем $\{k\}$; выбирает «среду» описания подсистем Π_k ; в терминах этой среды строит модель системы $\tilde{G}_k$; формулирует задачу $Z_k \in Z_k$ (где Z_k — класс задач, на который ориентирована подсистема); сопоставляет задаче Z_k исполнителя j и его оператор решения задачи A_{jk} ;

в) наличие «регламентирующего фактора» — механизма «В». Механизму «В» соответствует некоторая алгебра на множестве классов операторов $\{A_k\}$ решения локальных задач, позволяющая строить оператор решения общей задачи. Назовем РОТС *адекватной классу задач Z* на объекте O , если для любой задачи $Z \in Z$ существует реализация РП на РОТС, сходящаяся (в смысле определения, данного в предыдущем параграфе) к решению этой задачи.

Для адекватных РОТС имеют место следующие очевидные свойства.

Свойство 3.1. *Для $\forall Z \in Z$ существует набор подзадач $\{Z_k\}$, $Z_k \in Z_k$, такой, что решение задачи Z будет и решениями (в соответствующих подпространствах P) задач $\{Z_k\}$ и наоборот.*

Свойство 3.2. *Механизм «В» должен принципиально позволять находить операторы A_k в классах Φ_k , формирующие решения задач Z_k из свойства 3.1.*

Возникает, естественно, проблема проверки адекватности РОТС, для решения которой в общем случае конструктивные методы авторам не известны. Решение этой проблемы связано, по-видимому, с исследованием классов операторов A_k . В частных, хорошо формализуемых случаях эта проблема разрешима.

3.2.1. Регламентация взаимодействия подсистем. Степень распределенности. Алгебра операторов, входящих в механизм «В», должна, видимо, включать как минимум две операции:

- 1) операцию $\oplus$, соответствующую параллельной и независимой работе подсистем (аналог операции объединения);
- 2) операцию $\otimes$, соответствующую последовательной работе подсистем (например, $A_1 \otimes A_2$ означает, что оператор A_1 использует результат работы оператора A_2).

Будем говорить, что РС допускает для задачи Z *распределенность информационного типа* (РИТ), если на ней допустима реализация распределенной процедуры, включающей только операцию $\oplus$ (параллельное решение задач $\{Z_k\}$). Это соответствует

случаю, когда для решения различных задач Z_k используются независимые информационные области.

Другим случаем будет распределенность процедурного типа, когда для всех задач $\{Z_k\}$ информационные области совпадают и реализации РП допускают только операции $\otimes$ (последовательное выполнение).

В случае, если среди множества задач механизм «В» порождает иерархию (относительно операций $\otimes, \oplus$), т. е. в реализации РП появляются фрагменты типа

$$A_{i_1} \otimes (\oplus A_i), \quad i \in I, \quad i \neq i_1, \quad (3.18)$$

будем говорить, что в РС имеет место *распределенность централизованного типа* (РЦТ). Примером такого рода РП являются классические задачи декомпозиции. В них A_{i_1} является оператором решения задачи-координатора. Методы теории активных систем тоже подходят под этот случай.

Будем говорить, что РС допускает для задачи Z_k распределенность централизованного типа, если на ней допустима реализация РП, состоящая только из цепочек вида (3.18). РЦТ характерна, например, для древесных информационных структур — для каждого уровня иерархии есть задача-координатор. Следует отметить, что реальные РОТС не соответствуют ни одному из перечисленных «рафинированных» типов распределенности. Однако в них обычно удается выделить наборы подсистем, каждый из которых можно отнести к одному из перечисленных выше классов распределенности.

Свойство 3.3 (о полноте набора операций $\otimes, \oplus$). *Для адекватных РОТС существует реализация РП, в которой механизм координации «В» включает только операции $\otimes, \oplus$, т. е. данный набор операций является полным.*

Рассмотрим идею доказательства. Пусть моделируемый объект описывается информационной структурой сетевого типа. Очевидно, что такую структуру можно представить в виде объединения древесных структур. Формирование согласованного решения на древесной структуре можно реализовать РП, рекуррентно включающей фрагменты типа (3.18). Заметим, что существование задач $\{Z_i\}$ и операторов $\{A_i\}$ следует из адекватности исследуемой РОТС.

Формирование согласованного решения нескольких информационных структур древесного типа также можно реализовать путем рекуррентного включения в РП фрагментов типа (3.18), где

A_i — операторы формирования согласованного решения i -й древесной структуры.

Следствие. На любой адекватной РОТС можно построить РП, состоящую из рекуррентно организованных РП централизованного типа.

3.2.2. Пример формирования механизма «В» для двухуровневой информационной структуры. В двухуровневой структуре задачи $Z_1, \dots, Z_n$ информационно связаны лишь с задачей Z_0 , которая выступает в роли «координатора». Пусть в этом примере задачи $Z_1, \dots, Z_n$ могут выполняться независимо и параллельно ($P_{i_1} \cap P_{i_2} \cap \dots \cap P_{i_m} = \emptyset$). Следовательно, механизм «В» породит цепочку

$$(A_1 \oplus \dots \oplus A_i \oplus \dots \oplus A_n).$$

Задача Z_0 не может выполняться одновременно с задачами $Z_1, \dots, Z_n$, так как результат выполнения задачи Z_0 используется в $Z_1, \dots, Z_n$ и наоборот. Таким образом, приходим к выводу, что соответствующая РП реализуется в виде последовательности цепочек типа

$$A = A_0(A_1 \oplus \dots \oplus A_i \oplus \dots \oplus A_n). \quad (3.19)$$

Система, приведенная в данном примере, допускает РЦТ.

Если система имеет многоуровневую древесную структуру, т. е. каждая из задач Z_i также является задачей-координатором для задач нижнего уровня $Z_{i_1}, \dots, Z_{i_n}$, выражение (3.19) переходит в

$$A = A_0 \otimes (\oplus_{i=1, n} (A_i \otimes (A_{i1} \oplus \dots \oplus A_{ij} \oplus \dots \oplus A_{in}))). \quad (3.20)$$

Аналогично можно построить реализацию РП для структуры древесного типа с любым числом уровней иерархии. В данном случае мы смоделировали механизм «В», пользуясь тем, что на нижнем уровне иерархии имеет место РЦТ (задачи нижнего уровня информационно не связаны).

Если мы имеем дело с объединением древесных структур (распределенность процедурного типа), то для каждой r -й древесной структуры можно построить реализацию РП A^r согласно (3.20). Для всей системы реализация РП, очевидно, будет состоять из цепочек вида

$$A = \otimes_r A^r = \otimes_r (A_0^r \otimes (\oplus_{i=1, n} (A_i^r \otimes (\oplus_{j=1, J} (A_{ij}^r \otimes (\dots)))))). \quad (3.21)$$

Приведем примеры определения операций $\otimes, \oplus$.

Обозначим через $x = A_i(x_0)$ результат выполнения оператора A_i с начальным состоянием системы x_0 . Тогда

1) определим операцию $\otimes$:

$$A_3 = A_1 \otimes A_2, \quad \text{если } A_3(x) = A_1(A_2(x));$$

2) определим операцию $\oplus$:

$$A_3 = A_1 \oplus A_2, \quad \text{если } A_3(x) = \{A_1(x), A_2(x)\},$$

т. е. это вектор, состоящий из двух частей. Первая часть — вектор, полученный в результате использования оператора A_1 . Вторая часть — вектор, полученный в результате использования оператора A_2 .

Действительно, если в рассмотренном примере задача Z_0 получает одновременно информацию $x_1 = A_1(x_0)$ от задачи $Z_1, \dots, x_i = A_i(x_0)$ от задачи $Z_i, \dots, x_n = A_n(x_0)$ от задачи Z_n , то фактически исходным для нее является вектор $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$.

3.3. Примеры распределенности информации, функций и задач

Выше была предпринята попытка сформулировать основные свойства РС:

а) ориентацию на объект O и класс задач Z на этом объекте;
 б) наличие механизма «А», который для каждой задачи $Z \in Z$ выделяет для каждой подсистемы R_i среду ее описания S из некоторого класса сред $\{S_i\}$; формулирует в терминах этой среды задачу $Z_i \in Z_i$ (где Z_i — класс задач, на который ориентирована подсистема R_i); выбирает оператор A решения задачи Z из некоторого класса операторов A_i , находящихся в распоряжении системы R_i ;

в) наличие механизма «В», регламентирующего взаимодействие подсистем R_i за счет определения последовательности выполнения операторов A_i . На основе композиции операторов A_i строится оператор A решения общей задачи. Механизм «В» должен включать определение как минимум двух операций над множеством операторов операции последовательного ($\otimes$) и параллельного ($\oplus$) выполнения.

В связи с изложенным при моделировании РОТС возникают следующие проблемы:

а) конкретизация и формализация класса задач Z (в терминах выбранной «среды»), на который ориентирована отражающая объект O распределенная система;

б) выявление множества жизнеспособных подсистем в рамках РОТС, выбор «сред» их описания $\{P_k\}$ и формализация описания подсистем — формирование моделей $\{\tilde{G}_k\}$;

в) выявление классов задач $\{Z_k\}$, которые могут решаться в подсистемах с помощью имеющегося множества исполнителей J ;

г) выявление (и частичная формализация) классов операторов $\{A_k\}$, которые могут использоваться в подсистемах при решении задач из классов $\{Z_k\}$;

д) выбор из классов Z_k , Φ_k для каждой k -й подсистемы конкретной задачи Z_k и оператора A , использование которых может привести к решению общей задачи;

е) выявление и по возможности формализация «регламентирующего фактора» R , т. е. построение корректирующих операторов $\{C_k\}$ и правила Y , определяющего порядок работы блоков РП.

Попробуем реализовать приведенную выше процедуру на примере систем формирования и сопровождения долгосрочных целевых программ развития отрасли.

Все многообразие класса задач Z , на которые ориентирована РС подобного типа, определяется условиями обоснованности предлагаемых решений: соответствием решений предлагаемой конечной цели (или определением степени достижения цели); полнотой учета всех доступных средств и путей достижения цели; реализуемостью решения; возможностью контроля пределов получения решения лицом, принимающим решение.

Анализ практических процедур формирования долгосрочных целевых программ развития отрасли показывает, что класс задач Z обладает следующими свойствами.

Свойство 3.4. *Задачи класса Z формулируются в терминах множества показателей P_Φ так, что $\text{Card } P_\Phi < \text{Card } P$, где P — множество показателей, описывающих систему.*

Обычно модель $\tilde{G}$ описания объекта (отрасли), на который ориентирована РС, имеет многоуровневую иерархическую структуру. Тогда P_A — множество показателей, соответствующих верхнему уровню агрегирования.

Свойство 3.5. *Класс задач Z представляет собой объединение следующих подклассов задач.*

1. Задачи «расчетного типа» — выполнение типовых действий (расчет показателей) по типовым методикам.

2. Задача группировки, анализа, коррекции, сопоставления данных. В основном это связано с созданием удобных для исполнителя рабочих форм и диалоговых средств коррекции.

3. Задачи расчета сводных показателей — связаны с процедурами агрегирования по различным признакам в иерархических информационных структурах и многокритериальной оценки конечных результатов и эффективности.

4. Задачи «балансового типа», формально связанные с необходимостью поиска допустимого решения систем уравнений, а реально — с согласованием частных балансов продуктов, мощностей и ресурсов, формируемых различными подразделениями.

5. Задачи учета возможностей НТП и других средств развития (изменения) параметров «балансовых моделей», т. е. задачи системной оптимизации, реально связанные с процедурой устранения узких мест.

6. Задачи анализа жизненных циклов исследуемых объектов, связанные с учетом динамики в сетевых моделях и моделях календарного планирования.

7. Задачи дезагрегирования — задачи принятия решения по распределению ресурсов, разверстке задания на продукцию и другие, связанные с процедурами детализации информации.

8. Задачи выбора рациональной информационной структуры, связанные с построением адекватной информационной модели минимальной сложности.

Построим пример реализаций РС для каждого из приведенных классов задач. Будем при этом считать, что возможные разбиения системы $\tilde{G}$ на подсистемы $\tilde{G}_i$ определяются структурой системы $\tilde{G}$, которая представляет собой объединение структур типа дерева (соответствующих территориальной, производственной, административной и другим структурам).

Выделение в таких древесных структурах древесных же подструктур соответствует функциональным объектам (например, выделение территориального энергоуправления с делением на электростанции).

Множество сред Π ; описания подсистем определяется множеством принятых в соответствующих ведомостях набором рабочих и выходных документов («форм») и соответственно множеством используемых показателей.

Рассмотрим задачи класса 1 («расчетного типа»).

Пусть это задача $Z = \langle x_0, \Phi, P_\Phi \rangle$, где x_0 — начальное состояние системы; Φ — множество достижимости; P_Φ — множество показателей, в терминах которых оценивается решение задачи.

Для задач класса 1 множество Φ может быть задано в виде

$$\Phi = \{x_p = x_{0p}, p \in \tilde{P}\},$$

где $\tilde{P}$ — множество «исходных» показателей.

По определению данного класса задач, в каждой подсистеме R_i существуют «расчетные» алгоритмы, представляющие собой набор расчетных формул.

Выделим множество $\tilde{R}_0$ — «исходных» подсистем — множество минимальной мощности, такое, что

$$\tilde{R}_0 = \{R_i | (\text{in } (A_i) \subseteq \tilde{P}) \& (U \text{ in } (A_i) \supseteq \tilde{P})\}, \quad R \in \tilde{R}_{i0}.$$

Определим множество $\tilde{R}^e$ конечных подсистем:

$$\tilde{R}^e = \{R_i | U \text{ out } (A_i) \supseteq P_{\Phi O}\}, \quad R \in \tilde{R}^e.$$

Построим граф $\tilde{G} = \langle \{R_i\}, V \rangle$, в котором множество вершин совпадает с множеством подсистем $\{R_i\}$, а множество дуг определяется следующим образом:

$$\nu_{ij} = (R_i, R_j) \in V \Leftrightarrow \{A_i \in R_i, A_j \in R_j | \text{out } (A_i) \cap \text{in } (A_i) \neq \emptyset\},$$

т. е. выходные показатели системы R_i являются исходными для R_j . В такой интерпретации формирование реализации РС (и РП) решения задачи Z сводится к нахождению путей на данном графе из вершин множества G во все вершины множества G^e известными методами.

Задачи класса 3 (агрегирование) решаются аналогично. Граф G в этом случае строится по признаку иерархического подчинения подсистем.

Задачи класса 2 (анализ, коррекция) связаны с неформальным выделением множества $\{R_i\}_{i \in \tilde{I}}$ подсистем в результате анализа пользователем сред $\{S_1\}$ их описания.

Задачи «балансового типа»:

$$Z = \{x^0, \Phi^0, P_{\Phi O}\},$$

$$\Phi^0 = \{\varphi | (a_j, \varphi) \leq b_j; \varphi = \{x_p\}_{p \in P_{\Phi O}},$$

$$a_j = \{x_p^0\}, p \in P_{\xi}^j, \quad j = \overline{1, J}; \quad \{b_j\} = \{x_{p_1}^0, \dots, x_{p_j}^0\}, p_j \in P^B\}.$$

Здесь показатели множества P_{Φ} выполняют роль переменных; показатели множества P_{ξ}^j — удельные показатели (они фиксированы и заданы в x^0); показатели множества P^B выполняют роль частных частей.

Выберем подсистемы (и задачи), участвующие в решении задачи Z . Пусть S — среда описания подсистемы $S: S_i = \langle P_i, F_i \rangle$, где P — множество показателей подсистемы S_i , F_i — множество связей на этих показателях:

$$F_i = \{f^j(x_p), p \in P_i\}.$$

Без ограничения общности можно считать, что

$$\forall \tilde{p} \in P_i \exists \tilde{f}(\tilde{x}_p, x_p)_{p \in P_i} \in F_i : \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_p} \neq 0$$

(т. е. $\tilde{f}$ зависит от $\tilde{x}_p$ — в P нет «лишних показателей»). Очевидно, в решении задачи Z_i будут участвовать подсистемы R_i , для которых $P_i \cap P_{\Phi^0} \neq \emptyset$. Для задач Z_i множества Φ^i записываются следующим образом:

$$\Phi^i = \Phi^{i1} \cap \Phi^{i2},$$

где Φ^{i1} строится аналогично Φ^0 , только

$$\varphi = \{x_p\}, \quad p \in P_{\Phi^0} \cap \Phi^{i2},$$

а Φ^{i2} — множество допустимых состояний системы R^i по связям F^i . В случае, когда связи F^i носят линейный характер, в качестве механизма регламентации взаимодействия подсистем можно применить методы интерактивного формирования сбалансированных решений, основанные на обобщении алгоритмов проектирования. Эти методы подробно рассмотрены в гл. 4 и 5.

Задачи учета возможностей НТП являются обобщением задач «балансового типа», рассмотренных выше:

$$Z = \{x^0, \Phi^0, P_{\Phi^0}\},$$

$$\Phi^0 = \{\varphi \mid (a_j, \varphi) \leq b_j; \varphi = \{x_p\}, p \in P_{\Phi^0},$$

$$a_j = \{x_p\}_{p \in P_j}, b_j = \overline{x_{p_j}}, j = \overline{1, J}, p_j \in P^B, x_p = x_p^0, p \in P^0\}.$$

В данном случае варьируются показатели не только из множества P_{Φ^0} , но и из множеств P^j и P^B . В решении задачи Z участвуют подсистемы R^i , для которых

$$(P_i \cap P_{\Phi^0}) \cup ((U_j P_i^j) \cap P_{\Phi^0}) \cup (P_i^B \cap P_{\Phi^0}) \neq \emptyset.$$

Множество достижимости Φ строится так же, как и для задач «балансового типа». В качестве механизма регламентации можно

использовать методы, основанные на обобщении алгоритмов проектирования, приведенные в гл. 4 и 5.

В случае, когда в условия, определяющие множество Φ^0 , добавлены требования принадлежности решения траектории наиболее предпочтительных решений, удобно использовать для регламентации методы системной оптимизации, основанные на траекторном подходе. Подробнее эти методы будут описаны в гл. 4.

Задачи анализа жизненных циклов формально могут быть сведены к виду, в котором записываются задачи «балансового типа» и задачи учета НТП. Поэтому выбор подсистем R_i и задач Z происходит аналогично.

Однако в случаях, когда существен дискретный характер решений, требуется разработка особых механизмов регламентации, носящих интерактивный характер. В гл. 1 (§ 1.4) приведен пример реализации такого механизма.

Задачи класса 7 (деагрегирование) решаются аналогично задачам класса 3 (агрегирование).

Задачи класса 8 (выбор рациональной информационной структуры) могут возникать независимо в каждой из подсистем R при выборе полного описания (из набора сред $\{S_i\}$) минимальной сложности. Один из подходов к их решению, основанный на процедурах выделения существенных факторов и связей, изложен в гл. 4.

3.4. Координация решений локальных задач

3.4.1. Координация решений локальных задач по схеме уступок. Рассмотрим схему уступок решения задачи многокритериальной оптимизации:

$$\begin{aligned} x &\rightarrow \max, \\ x &\in D \subseteq R^n, \\ P(x) &\leq 0, \end{aligned}$$

где $P(x)$ — парето-функция, D — выпуклая область, R^n — n -мерное евклидово пространство.

Пусть точка $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ — точка идеала, где x_i^* — максимально допустимое значение координаты, получаемое в результате решения i -й локальной задачи, $\bar{x}$, $\underline{x}$ — максимальное и минимальное значения 1-й координаты, получаемые как результат решения соответствующих содержательных задач. Сделаем предположения о выполняемых уступках.

Предположение 1. Уступки делаются по одной координате за итерацию. Следующая координата выбирается по очереди.

Предположение 2. На очередном шаге необходимо сделать уступку на величину, не меньшую заданной в относительной величине, т. е.

$$0 \leq x_i - \underline{x}_i \leq q(\bar{x}_i - \underline{x}_i), \quad 0 \leq q < 1.$$

Предположение 3. Считается, что решение достигнуто по координате при $\bar{x}_i - \underline{x}_i \leq \varepsilon$, где $\varepsilon > 0$ — заранее заданное число.

Используем следующую процедуру уступок.

1. Делается уступка по i -й координате (согласно предположению 2).

2. Для остальных координат вычисляется изменение минимальных значений (из-за уменьшения i -й координаты). Для всех $j \neq i$ из $P(x_1, \dots, x_2, \dots, x_n)$ найдем x_j как функцию от остальных координат x_k : $x_j = x_j(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$.

Тогда минимальное значение j -й координаты будет определено при максимальном значении остальных координат:

$$\underline{x}_j = x_j(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n).$$

3. Происходит переход к следующей координате.

4. Если выполняется предположение 3, то координата не рассматривается.

5. Процедура останавливается, когда из рассмотрения исключены все координаты. Сходимость процедуры обосновывается теоремами.

Теорема 3.1. *Процедура уступок сойдется за конечное число шагов при сделанных предположениях.*

Доказательство. Назовем величину

$$d = \sum_{i=1}^n |\max_1 \{x | x \in D\} - \min_i \{x | x \in D\}|$$

диаметром области. Зададим $\varepsilon > 0$ — достаточную точность нахождения решения, т. е. при $d \leq \varepsilon$ процедура останавливается. Координата не рассматривается при $\bar{x}_i - \underline{x}_i \leq \varepsilon/n$.

Пусть для определенности на очередном шаге необходимо уменьшить диапазон по координате в $0 < q < 1$ раз, т. е.

$$|\bar{x}_i^y - \underline{x}_i^y| \leq q|\bar{x}_i - \underline{x}_i|,$$

где $\bar{x}_i^y, \underline{x}_i^y$ — максимальное и минимальное новые значения по координате после уступки, $\bar{x}_i, \underline{x}_i$ — до уступки.

За полный цикл (не более n шагов) величина d изменится и станет равной

$$d^y = \sum_{i=1}^n |\bar{x}_i^y - \underline{x}_i^y| \leq q \sum_{i=1}^n |\bar{x}_i - \underline{x}_i| = qd.$$

Необходимо m циклов для того, чтобы уменьшить начальный диаметр d_0 до ε , где m определяется из

$$q^m d_0 \leq \varepsilon, \quad m \leq \frac{\log(\varepsilon/d)}{\log q}.$$

Общее количество шагов равно

$$N \leq m n \leq n \log_q(\varepsilon/d).$$

3.4.2. О возможности разложения на эвристики алгоритмов формирования оптимальных решений, зависящих от параметра. Пусть решается оптимизационная задача $f(x, B) \rightarrow \max$, зависящая от параметра B . Решением ее будет параметрически заданное множество $X(B) = \{x | x = \arg \max f(x, B)\}$. Выделим частный случай, когда $X(B)$ — однозначное монотонное непрерывное множество, которое назовем траекторией.

Допустим, нас устраивает определенная точность оптимального решения $\varepsilon > 0$. В этом случае оптимальное решение можно получить последовательным применением изменений координат x_i пропорционально или по очереди. Содержательно это соответствует эвристическим алгоритмам пропорциональной или приоритетной разверстки.

Продemonстрируем это на задаче распределения одного ресурса в линейной модели при ограничении вида $a x \leq B$, где x — вектор мощностей производства $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, a — вектор ресурсоемкостей, B — общее количество ресурса. Обозначение вектора используем без нижних индексов, которыми помечаются компоненты вектора. Без ограничения общности считаем, что начальная точка равна $x = 0$. Рассмотрим линейную траекторию наиболее предпочтительного решения. В случае, когда траектория не линейна, но гладкая, мы можем заменить ее кусочно-линейной траекторией с сохранением требуемой точности. Тогда задача распределения ресурсов должна решаться на каждом из линейных участков. При решении выберем допустимую точность $\varepsilon > 0$ в какой-либо метрике.

Покажем, что с помощью эвристических алгоритмов пропорциональной и приоритетной разверстки решается задача распределения ресурсов при наличии траектории.

Алгоритмы. Опишем эвристические алгоритмы пропорциональной и приоритетной разверстки.

Алгоритм 1 (пропорциональной разверстки)

Исходные данные:

1) Заданы пропорции развития мощностей γ_i такие, что Δx_i пропорциональны γ_i .

2) Задано общее количество ресурса B .

Решение. Выделим на развитие i -й мощности $x_i = \gamma_i B / (a x)$.

Алгоритм 2 (приоритетной разверстки).

Исходные данные:

1) Заданы приоритеты развития мощностей $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$. Объект с наивысшим приоритетом получает все необходимые ресурсы.

2) Заданы текущие значения мощностей x_i и ограничения на их прирост $x_i \leq \bar{x}_i$.

3) Задано общее количество ресурса B .

Решение:

1) Выбирается объект с наибольшим приоритетом

$$m = \arg \max \{j_n\}.$$

2) Этому объекту выделяются необходимые ресурсы

$$B_m = \min \{a_m (\bar{x}_m - x_m), B\}, \quad x_m^y = x_m + B_m / a_m.$$

3) Объект исключается из рассмотрения $J = J \setminus \{j_m\}$.

4) Изменяется количество оставшегося ресурса $B = B - B_m$.

5) Если $B > 0$ и не всем объектам выделены ресурсы, то процедура повторяется с шага 1, в противном случае алгоритм заканчивается.

Укажем очевидные свойства.

Свойство 3.6. Точка — результат работы алгоритма пропорциональной разверстки — лежит на прямой, выходящей из начальной точки с направляющими косинусами, равными долям развития.

Свойство 3.7. Точка — результат работы алгоритма приоритетной разверстки — не выходит за пределы ограничений.

Выберем метрику в пространстве мощностей $R(x, y) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)$.

Докажем, что при наличии траектории эвристические алгоритмы дают корректный результат.

Теорема 3.2. *Максимально возможное продвижение по траектории с достаточной точностью обеспечивается алгоритмом пропорциональной разверстки.*

Доказательство. Приближим траекторию кусочно-линейной зависимостью таким образом, чтобы расстояние между траекторией и ломаной не превышало заданной точности $\epsilon > 0$. Для монотонных непрерывных и гладких траекторий это всегда можно сделать. На каждом линейном участке между точками x^1 , x^2 распределим ресурс алгоритмом пропорциональной разверстки с пропорциями

$$\gamma_i = \frac{x_i^2 - x_i^1}{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - x_i^1)}$$

в количестве $\Delta B = \min \{B, a x^2\} - a x^1$.

Из свойства 3.6 и выбора кусочно-линейного приближения следует, что полученные результаты всегда удовлетворяют необходимой точности.

Теорема 3.3. *Максимально возможное продвижение по траектории с достаточной точностью обеспечивается алгоритмом приоритетной разверстки.*

Доказательство. Допустим, у нас есть множество J приоритетов объектов. Получение приоритетов является отдельной задачей и не влияет на результат. Разобьем траекторию на ряд параллелепипедов таких, что расстояние от любой точки параллелепипеда до траектории не превышает заданной точности $\epsilon > 0$. Это можно сделать всегда, например, разбивая траекторию на параллелепипеды с противоположными вершинами на траектории.

Рассмотрим один параллелепипед. Пусть в нем противоположные точки есть x^1 и x^2 . Применяется алгоритм приоритетной разверстки по параллелепипеду с приоритетами J , ограничениями $x_i \leq x_i^2$ и количеством ресурса

$$\Delta B = \min \{B, a x^2\} - a x^1.$$

Из свойства 3.7 ясно, что полученная точка не уходит за пределы параллелепипеда, что и доказывает утверждение теоремы.

Легко показать, что в обоих случаях сложность алгоритмов есть $O(N/\epsilon)$, что показывает их минимальную сложность.

Оба алгоритма могут быть объединены, если учитывать ограничения на развиваемые мощности $\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i$ и расширить диапазон значений долей $0 \leq \gamma_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^n (\gamma_i) = 1$.

Применение приоритетов последовательно изменяет доли $\gamma_i = \{0, 1\}$, в то время как пропорции используют $0 < \gamma_i < 1$. Общая схема решения изображена на рис. 3.1.

При решении задачи мы считали, что траектория сформирована до применения алгоритмов. Но утверждения останутся справедливыми, если поиск траектории (поиск оптимального решения)



Рис. 3.1

будет проходить после каждого элементарного шага. При этом, вообще говоря, должны быть усилены требования на точность каждого шага.

3.5. Допустимость распределенного описания сосредоточенных задач

Многостороннее взаимодействие пользователей в РОТС сводится к взаимодействию частных моделей в рамках комплексной информационной модели, имеющей многоуровневую сетевую структуру. Установим соответствие между элементами сетевой структуры информационной модели (распределенной) и матричной формы записи (сосредоточенной). Рассмотрим J — уровневую иерархическую структуру.

В каждой вершине (j, r) , — номер уровня, $j = \overline{1, J}$, r — номер вершины в уровне j , W_j — множество вершин уровня. Имеется набор значений показателей $x^{jr} = \{x\}$ (p — множество индексов показателей), причем показатели верхнего уровня j являются агрегатами (суммой) показателей нижнего уровня $j + 1$ доминируемым вершинам (вершина l уровня j доминирует вершину r уровня j , если l и r связаны бинарным отношением, т. е. дугой графа G):

$$x = \sum x_p^{jr}, \quad p \in P, \quad j = 1, \dots, J, \quad (3.22)$$

$$r \in Q_{j-1,r},$$

где $Q_{j-1,r}$ — множество вершин, непосредственно доминируемых вершиной $(j - 1, r)$. Между показателями каждой вершины име-

ются функциональные связи:

$$f^r(x_1, x_2, \dots) = 0, \quad r \in W^j, \quad j = 1, \dots, J, \quad (3.23)$$

которые определяются характеристиками конкретных объектов, соответствующих вершинам иерархической структуры. Пусть можно выделить один основной показатель x^0 — мощность. Тогда показатели $x, p \in P$ (расход топлива, капиталовложения, производство энергии) будут функциями мощности. В частности, в случае линейного приближения

$$x^i = a_p x^0, \quad p \in P, \quad (3.24)$$

где a — удельные коэффициенты использования мощности, расхода ресурсов и т. д. На значения показателей каждой вершины имеются ограничения сверху и снизу:

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad p \in P. \quad (3.25)$$

Таким образом, система ограничений (3.22)–(3.25) для всей системы соответствует общесистемным ограничениям. Уточним систему ограничений, соответствующую k -й локальной модели, описываемой графом $G(V_k, U_k)$.

Пусть в G входят вершины уровней $j, j+1, \dots, j_1$, исходной системы, которые описываются множеством показателей $P_k \leq P$. Обозначим через W_j^k множество вершин уровня k , входящих в G_k . Заметим, что вид рассматриваемой системы таков, что дуги U связывают либо показатели вершин соседних уровней, либо различные показатели одной и той же вершины. Дугам первого типа соответствуют ограничения

$$x = \sum_{i \in Q_{j-1, r}} x^i, \quad p \in P, \quad r \in W, \quad j = 1, \dots, j_1. \quad (3.26)$$

Дугам второго типа соответствуют ограничения вида

$$f(\{x^r\}) = 0, \quad r \in W_k^j, \quad j = j_1 + 1, \dots, J, \quad (3.27)$$

$$\underline{x}_p^r \leq x_p^r \leq \bar{x}_p^r, \quad p \in P_k, \quad r \in W_k^j, \quad j = j_1 + 1, \dots, J, \quad (3.28)$$

или в случае линейного приближения:

$$x_p = a_p x_0, \quad p \in P_k, \quad r \in W_k^j, \quad j = 1, \dots, j_1. \quad (3.29)$$

Таким образом, каждая локальная k -я модель будет описываться соотношениями (3.26)–(3.29). Справедливо

Утверждение 3.1. *В том случае, если множество локальных моделей $K = \{k\}$ таково, что объединение графов G_k локальных моделей совпадает с графом G всей системы:*

$$G = \bigcup_{k \in K} G_k, \quad (3.30)$$

т. е. $V = \bigcup_{k \in K} V_k$; $U = \bigcup_{k \in K} U_k$; $G = G(V, U)$; $G_k = G_k(V_k, U_k)$, то для того чтобы некоторое состояние было допустимо для всей системы, необходимо и достаточно, чтобы оно было допустимо для любой подсистемы из множества K .

Следствие 1. Для того чтобы процедура сходилась к решению общей задачи, необходимо и достаточно, чтобы она сходилась к состоянию, которое является решением для каждой локальной задачи (при условии (3.30)).

Следствие 2. Задача поиска допустимого состояния системы, представленной в распределенном виде (3.26)–(3.30), может быть представлена в виде сосредоточенной задачи поиска допустимого решения системы ограничений (3.22)–(3.25).

Легко видеть, что следствие 2 практически является лишь другой формулировкой утверждения 3.1.

Свойство 3.8. *При исследовании любой k -й подсистемы (или всей системы целиком) можно все ограничения системы представить, исходя лишь из переменных нижнего уровня, т. е. в виде обычной задачи математического программирования, для решения которой можно использовать стандартные алгоритмы.*

Это свойство проверяется прямой подстановкой (3.29) в (3.26) и (3.28) последовательно для всех уровней иерархии модели. Таким образом, общую или любую локальную модель можно записать в сосредоточенном виде, а в случае линейного приближения — в матричной форме.

3.6. Допустимость использования агрегированных моделей

Покажем, что в многоуровневой распределенной иерархической структуре с одним показателем решение распределенной задачи эквивалентно последовательному решению частных подзадач при специальным образом сконструированных ограничениях.

3.6.1. Двухуровневая структура

Теорема 3.4 (о решении частной задачи). Пусть $x \in D \subset R^n$ принадлежит односвязной области D , и пусть $Y = f(x)$, где $f(x)$ непрерывна в D .

Пусть

$$\underline{Y} = \min_D f(x), \quad \bar{Y} = \max_D f(x).$$

Тогда для того чтобы $Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}]$, необходимо и достаточно, чтобы $\exists x \in D$.

Доказательство

Достаточность. $x \in D \Rightarrow \underline{Y} \leq f(x) \leq \bar{Y}$ по построению $\underline{Y}, \bar{Y}$.

Необходимость. Обозначим

$$x_1 = \operatorname{Arg} \min_D f(x), \quad x_2 = \operatorname{Arg} \max_D f(x).$$

Соединим точки x_1 и x_2 непрерывной кривой $G(s)$ в D с параметром s , $0 \leq s \leq 1$, $G(1) = x_2$, $G(0) = x_1$. Тогда функция $f(x)$ будет функцией от параметра s на кривой $Y = f(x(s))$. Из непрерывности $f(x(s))$, $f(x(0)) = \underline{Y}$, $f(x(1)) = \bar{Y}$ следует, что для $\forall Y \in [\underline{Y}, \bar{Y}] \exists s \in [0, 1]$ и что $f(x(s)) = Y$ по теореме Коши. Тогда $\exists x(s) \in D$, что $f(x) = Y$.

Следствие. Теорема верна для

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i, \quad D = \{x \mid x \in R^n, \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, Ax \leq B\}.$$

3.6.2. Многоуровневая структура. Введем обозначения: i — вершина (узел) иерархической структуры, $1 \leq i \leq N$; x_i — значение параметра, связанного с узлом; $\underline{x}_i, \bar{x}_i$ — ограничения снизу и сверху на значение x_i ; y_i — значение параметра вышележащего узла (по сути, y_i является x_j другого уровня); $f_i(x)$ — правило агрегирования в i -м узле; D_i — допустимая область для нижележащих вершин от i -го узла.

Теорема 3.5 (о решении распределенной задачи). Пусть задана допустимая область D для узлов самого нижнего уровня иерархической структуры. Построим ограничения для всех узлов более высокого уровня:

$$\underline{y}_i = \min_{x_i} f_i(x), \quad \bar{y}_i = \max_{x_i} f_i(x).$$

Тогда поиск решения распределенной задачи $y_i \in [\underline{y}_i, \bar{y}_i]$, $i = \overline{1, N}$ сводится к последовательности решения частных задач.

Доказательство. Рассмотрим самый верхний узел иерархической структуры. Пусть ему отвечает параметр y_1 . Из $y_1 \in [\underline{y}_1, \bar{y}_1]$

следует, что существует решение $x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$ для всех нижележащих узлов — по теореме о решении частной задачи. Для каждого из узлов мы снова можем применить теорему о решении частной задачи. Процесс остановится, когда мы дойдем до узлов самого нижнего уровня.

3.6.3. Многоуровневая структура с дополнительными ограничениями

Теорема 3.6. Пусть заданы допустимые области O для узлов иерархической структуры. Построим ограничения для всех узлов следующим образом:

- 1) $\underline{y}_i = \min_{D_i} f_i(x)$, $\bar{y}_i = \max_{D_i} f_i(x)$;
- 2) для $x_k = y_i$ построим допустимые области

$$D_k = D_k \cap \left\{ \bigcup_{i=1}^n [\underline{y}_i, \bar{y}_i] \right\};$$

- 3) $D_k \neq \emptyset$.

Тогда для любой допустимой точки $y = D_k$ существует допустимое решение для нижних узлов.

Доказательство. Из $y = D_k$ следует, что $y \in \left\{ \bigcup_{i=1}^n [\underline{y}_i, \bar{y}_i] \right\}$. Тогда по теореме о решении частной задачи существует решение на нижнем уровне. Последовательное применение данных утверждений доказывает требуемое для всех нижележащих уровней.

3.6.4. Учет матрицы удельных расходов при ограничениях на мощности. Рассмотрим задачу с ограничениями на значения коэффициентов матрицы удельных показателей. Определим матрицу A средних удельных расходов ресурсов при выработке продукции различными технологиями $Ax \leq B$, x_i — мощности i -й технологии, B_j — общее количество j ресурса, $a_{ij} \geq 0$ — удельные расходы ресурсов, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, m}$.

Для наглядности рассмотрения возьмем $Ax = B$, $Y = \sum_{i=1}^n x_i$ — полная выработка электроэнергии в пространстве ресурсов, $a_j = B_j/Y$ — удельные расходы ресурсов на выработку электроэнергии:

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i}{Y} = \sum_{i=1}^n a_{ij} \frac{x_i}{Y} = \sum_{i=1}^n a_{ij} \gamma_i,$$

где $\gamma_i = x_i / \sum_{i=1}^n x$ — доля использования i -й технологии. По смыслу задачи $0 \leq \gamma_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1$. В общем случае γ_i ограничено сверху и снизу (существующими мощностями, возможностями строительных организаций, структурами обеспечивающих промышленности и т. п.).

Обозначим $\underline{\gamma}_i = \min \gamma_i$, $\bar{\gamma}_i = \max \gamma_i$ с учетом $\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1$.

Используя $\gamma_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i$, сократим размерность переменных на 1. Индекс n выбран для определенности, что не влияет на дальнейшие рассуждения.

Обозначим $\bar{a}_{ij} = a_{ij} - a_{jn}$. Тогда $a_j = a_{jn} + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{a}_{ij} \gamma_i$.

Пусть $E = \{a \mid a = a_{jn} + \sum_{i=1}^{n-1} \bar{a}_{ij} \gamma_i, j = \overline{1, m}, \gamma_i \in [\underline{\gamma}_i, \bar{\gamma}_i]\}$.

Найдем ограничения сверху и снизу на a_j . Используем обозначения:

$$f_+ = \begin{cases} f, & \text{если } f \geq 0, \\ 0, & \text{если } f < 0, \end{cases} \\ f_- = -(-f)_+ = f - f_+.$$

Тогда

$$\underline{a}_j = \min_j a_j = a_{jn} + \sum_{i=1}^{n-1} \{(\bar{a}_{ij})_+ \underline{\gamma}_i + (\bar{a}_{ij})_- \bar{\gamma}_i\}, \\ \bar{a}_j = \max_j a_j = a_{jn} + \sum_{i=1}^{n-1} \{(\bar{a}_{ij})_- \underline{\gamma}_i + (\bar{a}_{ij})_+ \bar{\gamma}_i\}.$$

Таким образом, доказана

Теорема 3.7. Для существования решения на нижнем уровне необходимо $a_j \in [\underline{a}_j, \bar{a}_j]$, где $\underline{a}_j, \bar{a}_j$ определены выше.

Следствие. Для существования решения на нижнем уровне необходимо $a_j \in [\min_i a_{ij}, \max_i a_{ij}]$.

Доказательство. Используем $0 \leq \gamma_i \leq 1$. Пусть для определенности $\min_i a_i = a_{jn}$. Тогда $\underline{a}_j - \min_i a_i = \sum_{i=1}^{n-1} \{(\bar{a}_{ij})_+ \underline{\gamma}_i\} \geq 0$.

Аналогично $\bar{a}_j - \max_i a_i \leq 0$.

Рассмотрим в m -мерном пространстве ресурсов выпуклую оболочку всевозможных комбинаций точек $c_i = (c_{1i}, \dots, c_{mi})^T$. Смещенная на вектор $c_n = (c_{1n}, \dots, c_{mn})^T$ выпуклая оболочка дает многоугольник, попадание в который необходимо и достаточно для существования решения на нижнем уровне.

Теорема 3.8. *Для существования допустимого решения сводной задачи необходимо и достаточно, чтобы $(a_1, \dots, a_m)^T \in E$.*

Доказательство. Следует из построения E .

Необходимость. Из $\underline{\gamma}_i \leq \gamma_i \leq \bar{\gamma}_i$ следует, что $a \in E$.

Достаточность. Из $a \in E$ следует, что $\exists \gamma_i \in [\underline{\gamma}_i, \bar{\gamma}_i]$.

3.6.5. Решение локальной задачи с ограничениями на удельные расходы из разных технологий. Рассмотрим нахождение решения локальной задачи $Y = \sum_{i=1}^n x_i$ с ограничениями на ресурсы $A_x \leq B$. Удельные расходы ресурсов ограничены: $\underline{a}_{ij} \leq a_{ij} \leq \bar{a}_{ij}$. Средние удельные расходы ресурсов $a_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \gamma_i = B_j/Y$. Построим ограничения на a_j :

$$\underline{a}_j = \min_j a_j = \sum_{i=1}^n (\min_j a_{ij}) \gamma_i = \sum_{i=1}^n \underline{a}_{ij} \gamma_i,$$

$$\bar{a}_j = \max_j a_j = \sum_{i=1}^n (\max_j a_{ij}) \gamma_i = \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ij} \gamma_i.$$

Теорема 3.9. *Для того чтобы $a_j \in [\underline{a}_j, \bar{a}_j]$, необходимо и достаточно, чтобы существовал набор $a_{ij} \in [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$.*

Доказательство. Аналогично доказательству о решении локальной задачи по мощностям в иерархической системе.

Достаточность. Следует из построения $\underline{a}_j, \bar{a}_j$.

Необходимость. Из непрерывности и монотонности функции $\sum_{i=1}^n \underline{a}_{ij} \gamma_i$ и из $a_j \in [\underline{a}_j, \bar{a}_j]$ следует, что $\exists a_{ij} \in [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$ и $a_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \gamma_i$.

3.7. Моделирование системообразующих факторов

Необходимым элементом системы конструирования информационных технологий (СКИТ) в рамках распределенной системы формирования согласованных решений (РСФСР) является

база процедур решения типовых формализованных задач. Остановимся подробнее на нескольких типовых задачах, решение которых требуется при организации большинства прикладных систем и опирающихся на них *комплексных информационных технологий* (КИТ) в рамках РСФСР.

Первой из таких задач — системообразующих факторов моделирования КИТ — является задача организации иерархических структур и типовых операций на них.

РСФСР, описываемые в настоящем издании, ориентированы в основном на моделирование сложных организационно-технических структур. Можно даже говорить, что это объектно-ориентированные системы, работающие с информационными объектами — рабочими формами документов. В силу сложившихся особенностей развития экономики, государства, права моделируемые нами сложные объекты представимы в виде объединения простых иерархических структур (административной, территориальной, производственной и т. п.), как правило, древесного типа. Поэтому связи между информационными объектами, отражающие аналогичные связи между соответствующими элементами моделируемых систем, также складываются в объединение структур древесного типа.

Основными операциями на таких связях являются посылка на верхние уровни иерархии агрегированных справок, чему соответствует операция агрегирования требуемых показателей снизу вверх по уровням иерархии, и операция распределения ресурсов (или целей) между объектами нижнего уровня иерархии. Последней операции соответствует операция декомпозиции (деагрегирования) требуемых показателей. Таким образом, необходимым элементом СКИТ становится встроенный в нее (на уровне АСМ) генератор иерархических структур. На иерархических структурах древесного типа вводятся типовые операции агрегирования и декомпозиции с любого желаемого уровня иерархии. Подробно процедуры, реализующие эти операции, описаны в гл. 4.

Второй часто встречающейся задачей является задача *моделирования сохранения материальных потоков*. Другими словами, это задача формирования сбалансированного решения в интерактивном режиме с участием, как правило, нескольких исполнителей. Каждый из исполнителей отвечает (т. е. является компетентным) лишь за некоторую часть факторов, формализованных в балансовых соотношениях.

Поэтому в СКИТ включается типовая информационная технология формирования согласованных решений в случае, когда лишь

часть факторов поддается формализации в виде балансовых соотношений, а часть остается в голове формирующих решения специалистов. В гл. 4 и 5 подробно описаны используемые в этих КИТ методы и алгоритмы.

Развитие сложных организационно-технических систем реализуется через последовательность жизненных циклов составляющих их объектов. Возникает задача моделирования реализации основных этапов жизненных циклов: научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, проектирование, строительство, эксплуатация, демонтаж. В отличие от предыдущей задачи (моделирование сохранения материальных потоков) эту можно назвать задачей *моделирования сохранения информационных потоков*. Включаемые в состав СКИТ модели и алгоритмы (на уровне АСМ) приведены в § 4.4. Примеры реализации КИТ описаны в § 1.7, 3.4.

Видимо, можно считать разумным включение в СКИТ на уровне типовых КИТ технологий выявления и расшивки «узких мест», используемые при этом методы и алгоритмы приведены в § 4.3.

3.8. Координация и синхронизация решений локальных задач

В предыдущих параграфах были введены основные понятия и сформулированы задачи поиска согласованного решения в распределенных системах. Было отмечено, что для формирования согласованного решения в распределенной системе необходимо присутствие некоего «координирующего механизма» (КМ). Этот механизм в процессе итеративного взаимодействия подсистем каким-то образом отслеживает «сходимость» всего процесса к согласованному решению. Для локальных подсистем «координирующий механизм» проявляет себя либо установлением порядка решения локальных задач (как, например, в двухуровневых структурах, когда локальные задачи обмениваются информацией через задачу-координатора), либо влиянием на операторы выбора локальных подсистем. Например, при формировании программы развития энергетики резко сократилось множество допустимых площадок для размещения атомных электростанций. За счет этого резко возросла привлекательность парогазовых установок. Типичным, естественно, является одновременное присутствие в той или иной степени всех перечисленных механизмов.

Рассмотрим пример реализации первой очереди «координирующего механизма» в распределенной системе формирования согласованных решений (РСФСР) «Россия». РСФСР, как указывалось

выше, можно представить в виде графа, каждая вершина которого соответствует подсистеме, ориентированной на решение класса локальных задач. Обозначим: O^i — объект исследования в i -й подсистеме; S^i — «среда» описания i -й подсистемы; Z^i — класс задач, решаемых в i -й подсистеме; a^i — класс «методик-операторов» i -й подсистемы; U^i — исполнитель.

При реализации конкретной распределенной процедуры (т. е. когда уже выделен подграф $\hat{G} \subseteq \tilde{G}$ подсистем, решающих общую задачу; в каждой подсистеме конкретизирована задача $z^i \in Z$ и методика ее решения $\alpha^i \in a^i$, выделен исполнитель U^i) построим граф *синхронизации распределенной процедуры* (СИРАП). Он представляет собой иерархический двухуровневый граф, верхний уровень которого соответствует подграфу $\hat{G} \subseteq \tilde{G}$, реализующему распределенную процедуру, но каждая вершина графа представлена в виде простенькой сети, показанной на рис. 3.2.

Сеть, представленная на рис. 3.2, содержит вершины четырех типов. Вершина Π_i (в середине сети) — это собственно локальная i -я подсистема, решающая задачу Z методикой a^i .

Вершины ПВХ (*показатели на входе в систему*) идентифицируют момент изменения показателей из множества входимых показателей. Эти вершины идентичны вершинам-условиям в се-

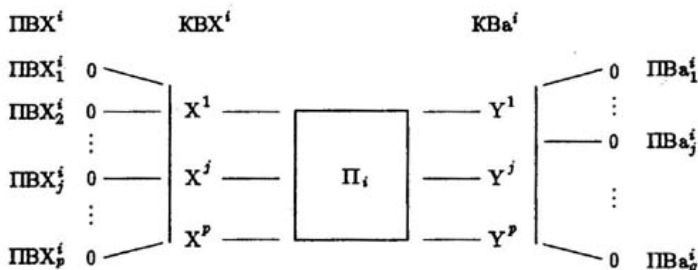


Рис. 3.2

тях Петри. Вершины ПВХ^{*i*} могут быть помечены. Метка m может принимать значение из множества $\{0, 1, 2\}$. Значение $m_j^i = 0$ означает неопределенность j -го показателя. Значение $m_j^i = 1$ означает, что j -й показатель только что поменял свое значение (на вход i -й системы пришла новая информация). Значение $m_j^i = 2$ означает, что j -й показатель определен, но эта информация уже использовалась в i -й системе. Заметим, что одному и тому же показателю $p \in P$ может соответствовать множество вершин $\{ПРХ_j^i\}$,

если значения этого показателя приходят в i -ю подсистему из различных подсистем. Фактически j_p — множество локальных подсистем, засылающих в i -ю подсистему значение p -го показателя.

Вершина KBX (*координатор на входе в i -ю подсистему*) является частью «координирующего механизма».

В этой вершине происходит обработка значений «дублируемых» показателей (из множества j_p), параметров операторов a^i множества допустимых состояний и множества достижимостей системы Π_i . На выходе этой вершины находится множество значений входных показателей $\{x_p\}$ входной системы.

Вершина KBa (*координатор «координирующего механизма» на выходе i -й подсистемы*) так же, как и KBX ^{i} является частью «координирующего механизма». На входе множество значений $\{Y_p\}$ выходных показателей системы Π_i . KBa ^{i} отвечает за «размножение» (дублирование) значений показателей по числу вершин (подсистем), для которых эти показатели являются входными.

Вершины ПВа ^{i} (*показатели на выходе i -й подсистемы*) совершенно аналогичны вершинам ПВХ ^{i} . Таким образом граф синхронизации (СИРАП) можно рассматривать как аналог сети Петри. В процессе выполнения РП происходит обмен информацией между подсистемами, что отражается на изменении разметки вершин ПВХ ^{i} и ПВа ^{i} .

Функционирование «координирующего механизма» отражается на изменении разметки сети. Задачей «координирующего механизма» (т. е. его составных частей в виде множеств вершин KBX ^{i} и KBa ^{i}) является необходимость приведения системы к такому состоянию, которое будет удовлетворительно для всех подсистем Π_i . Это будет означать, что в какой-то момент множество выходных показателей всех подсистем не изменится, т. е. ни одна из вершин ПВа ^{i} ни в какой подсистеме не будет иметь разметку «1».

Подытожим сказанное. При функционировании РСФСР, как только общая задача разделяется на подзадачи с указанием подсистем и исполнителей, отвечающих за решение этих подзадач, активизируется «координирующий механизм». В рамках «координирующего механизма» строится граф синхронизации (СИРАП), охватывающий активизируемые подсистемы (и только их). Граф синхронизации отвечает за координацию и синхронизацию информационных потоков, в его рамках реализуется действие «координирующего механизма».

Разумеется, приведенная реализация «координирующего механизма» не является единственно возможной. Однако создание

и реализация эффективного «координирующего механизма» пока еще являются лишь предметом научных исследований.

3.9. Принципы функционирования многоуровневой распределенной системы формирования согласованных решений

В настоящем издании авторы пытались обобщить опыт разработки и эксплуатации распределенных систем формирования согласованных решений (РСФСР), ориентированных в первую очередь на задачи перспективного отраслевого планирования. Это автоматизированная система моделирования СТРАТЭК (1983 г.), разработанная под руководством А.Е. Курилова в Институте энергетических исследований АН СССР и ГКНТ, и РСФСР «Россия», разработанная (1989 г.) В.Н. Тренивым, А.В. Галузо и др. для ПЭВМ IBM PC 290. Принципы построения этих систем во многом схожи. Системы ориентированы на работу с *информационными объектами* (ИО) — рабочими формами документов, описывающими либо физические объекты (энергоблок, электростанцию и т. п.), либо элемент организационно-технической структуры управления (например, территориальное энергетическое объединение).

Описываемые объекты в реальных организационно-технических системах образуют сложные структуры иерархического типа. Поэтому обязательным элементом РСФСР является механизм описания иерархических структур (с возможностью встраивания процедур агрегирования и декомпозиции).

На каждом информационном объекте пользователь должен иметь возможность задать систему связей между описывающими объект показателями. Активизируя эти связи, пользователь заставляет работать те или иные *локальные имитационные модели*. Как результат необходимым элементом РСФСР становится генератор имитационных алгоритмов (локальных имитационных моделей).

Механизм формирования агрегированных структур позволяет пользователю формировать и эксплуатировать *сложные (составные) имитационные модели*.

Элементарные акты эксплуатации локальных имитационных моделей и сложных (составных) моделей, соответствующие решению локальных задач пользователя, — элементарные типовые информационные технологии могут объединяться в *типовые информационные технологии* (ТИТ). Последние в свою очередь исполь-

зуются для формирования комплексных информационных технологий.

Таким образом, РСФСР образует шестислойный «пирог» (рис. 3.3), нижний слой которого образуют описания информационных объектов. Выше идут локальные имитационные модели.

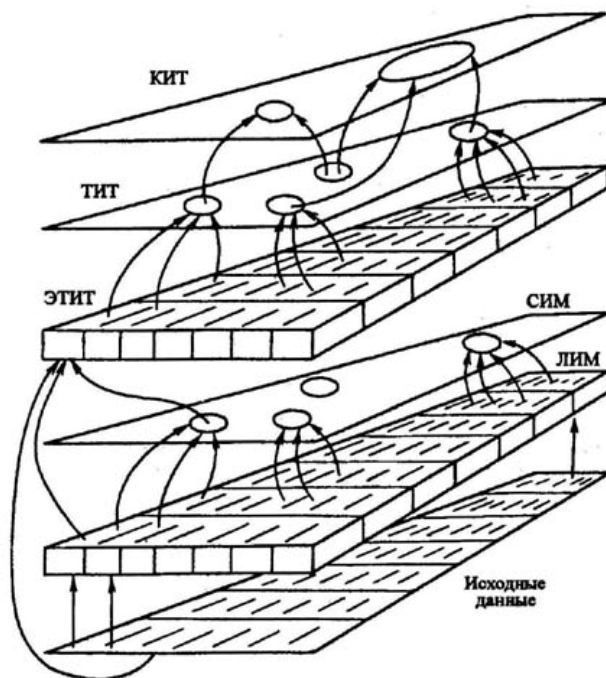


Рис. 3.3

Для каждого информационного объекта может храниться несколько локальных имитационных моделей. Следующим слоем идут сложные (составные) модели, объединяющие по несколько ИО и соответствующих локальных имитационных моделей. Четвертым слоем расположены *элементарные* типовые информационные технологии — технологии решения элементарных задач предметной области пользователя. Пятым — типовые информационные технологии, соответствующие типовым задачам пользователя. Шестой слой — верхнюю часть «айсберга» образуют *комплексные* информационные технологии решения нестандартных задач.

С описанным способом формирования РСФСР связаны используемые в системе принципы организации взаимодействия моделей и задач. Основная идея состоит в том, что реализованные распределенные процедуры движутся по иерархической структуре информационных объектов, выявляя «существенные» показатели и связи — «узкие места» по отношению к решаемой комплексной задаче.

При переходе на каждый следующий уровень иерархии вновь рассматриваются лишь те информационные объекты (и соответствующие локальные и составные имитационные модели, описывающие эти ИО, а также элементарные типовые, типовые и комплексные информационные технологии, работающие с этими объектами), которые влияют на «расшивку» выделенных ранее «узких мест».

Пройдя по всем уровням иерархической структуры информационных объектов, процедура выделяет все ИО и мероприятия на них, которые могут влиять на «расшивку» выявленных «узких мест». Далее используются типовые информационные технологии и комплексные информационные технологии «расшивки узких мест».

Процедура оканчивает работу после того, как будет достигнуто удовлетворительное решение общей задачи или работа с выявленными «существенными» факторами и связями не даст ощутимых результатов. В гл. 4 более подробно описаны процедуры и алгоритмы, используемые для формирования согласованных решений.

Глава 4

Типовые задачи, модели, алгоритмы и информационные технологии

В данной главе сосредоточено описание основных конструктивных возможностей системы поддержки решений содержательных задач. Огромное разнообразие (десятки и сотни тысяч) конкретных содержательных задач делает безнадежной попытку разработки для каждой из них своего метода и технологии. Единственным разумным выходом является использование одного из важнейших свойств математического моделирования — создания сравнительно небольшого количества базовых моделей, отработки на них технологии решения типовых задач, используемых затем в качестве модулей при конструировании информационных технологий конкретных содержательных задач.

Описанию базовых моделей, типовых задач и методов их решения посвящена настоящая глава (на примере класса задач управлением развитием).

4.1. Краткая характеристика комплекса типовых задач, моделей и информационных технологий

Как отмечалось в § 2.1, человеку, участвующему в решении сложных задач, свойственно разбивать их на подзадачи, для которых у него уже имеются отработанные приемы (информационные технологии) решения. Такие задачи мы называем *типовыми* (ТИТ). Возможность использования ТИТ позволяет более чем на порядок сократить время решения исходной сложной задачи и сосредоточиться на творческих вопросах решения новых, нетипичных проблем. Будем различать:

1) типовые содержательные задачи, состав которых зависит от класса рассматриваемых вопросов и частично от конкретного объекта;

2) типовые модели и классы задач прикладной математики, к которым сводятся содержательные задачи;

3) типовые методы, алгоритмы и соответствующие им модули прикладных программ на ЭВМ, которые позволяют решать задачи прикладной математики.

4) типовые человеко-машинные информационные технологии (ЧМ ТИТ) решения типовых задач с использованием ЭВМ.

Рассмотрим сначала типовые содержательные задачи, состав которых зависит от класса рассматриваемых вопросов и частично от конкретного объекта. Мы ограничимся примером рассматриваемого в книге комплекса задач управления развитием, хотя аналогичный подход дает возможность решать и задачи других классов с использованием описанной системы поддержки решений.

Как следует из гл. 1, в различных процедурах решения рассмотренных содержательных исходных задач управления развитием часто встречаются следующие *типовые содержательные задачи* (ТСЗ):

ТСЗ1. Построение многоуровневой структуры (объект-подобъект, цели-средства и т. д.).

Для каждого объекта организационно-технической системы:

ТСЗ2. Определение потребности: в продукции; в мощностях; во вводах мощностей.

ТСЗ3. Формирование варианта развития: сохраняющего сложившиеся тенденции; экстенсивного варианта (без изменения эффективности); оптимального варианта (по выработке продукции, затратам или другому заданному критерию); экспертного варианта (в диалоге).

ТСЗ4. Расчет потребностей в ресурсах для заданного варианта (по видам ресурсов).

ТСЗ5. Оценка дефицитности: продуктов; мощностей; ресурсов.

ТСЗ6. Ранжирование видов продуктов, мощностей и ресурсов по степени дефицитности.

ТСЗ7. Определение требований: к изменению средних удельных показателей эффективности (к НТП); к развитию обеспечивающих организаций машиностроения, проектных, научных, подготовки кадров и др.; к развитию обеспечивающих производств в ПО или предприятии.

ТСЗ8. Оценка предельных возможностей ввода мощностей с учетом: выделения и освоения задельных капиталовложений; технологии строительства и состоянию переходящихстроек; состояния проектных работ; возможностей строительных и проектных организаций; возможностей комплектной поставки продукции стройиндустрией; возможностей комплектной поставки оборудования, другой продукции машиностроения и всех других доступных факторов в комплексе.

ТСЗ9. Оценка возможностей НТП (по отдельной НТ-программе и в целом по организации): при заданной структуре мощностей; общие потенциальные возможности с учетом продолжительности НИОКР.

ТС310. Определение «узких» мест развития и направлений их устранения.

ТС311. Формирование рациональной структуры (структурной политики): продукции; мощностей.

ТС312. Формирование комплексных НТ-программ (определение научно-технической политики): отдельной программы; по отрасли (объединению, предприятию); по региону и др.

ТС313. Формирование согласованных программ развития обеспечивающих производств.

ТС314. Рациональное распределение ограниченных ресурсов (определение инвестиционной политики) между: подотраслями, регионами, организациями; производством и воспроизводством, основным и обеспечивающим производством; укрупненными технологиями; строительными проектами; научно-техническими программами и др.

ТС315. Оценка влияния изменения отдельных показателей или их групп на конечный результат: НТ-программ; инвестиционных программ для организации и др.

ТС316. Социально-экономическая оценка, сопоставление и выбор вариантов проектов программ развития организации.

ТС317. Многокритериальный анализ и выделение конкурентоспособных вариантов проектов программ развития организации и др.

ТС318. Контроль выполнения программы деятельности (строительства, техперевооружения, НИОКР, развития организации): «план-факт»; прогноз последствий отклонений; анализ и выбор варианта корректировки.

ТС319. Анализ последствий (в динамике) выбора варианта хозяйственного механизма для организации.

ТС320. Выбор вида хозяйственного механизма, наиболее рационального для организации в конкретной ситуации: экономической модели (хозрасчет, аренда и т. д.) финансового механизма; принципа планирования и управления (программно-целевые и др.); распределение функций и регламентации прав и процедур в процессах управления.

ТС321. Комплексная оценка и выбор наиболее предпочтительного варианта развития и др.

Можно продолжить список типовых задач. Однако с учетом их разбиения на подзадачи этот список уже включает около сотни типовых подзадач. Если учесть, что каждая из них возникает и решается в различных разрезах (по иерархии: народное хозяйство, комплекс отраслей, отрасль, регион, объединение, предприятие,

подразделение; по времени: перспектива, пятилетка, год, квартал, месяц; по уровню мероприятий и программ и т. д.), то оценка различающихся содержательных видов подзадач приближается к 10. Если еще учесть разные ситуации в разных отраслях, объединениях и т. д., то оценка числа подзадач приблизится к 10 и более.

В ситуации такого огромного разнообразия содержательных задач безнадежно пытаться разработать столько же методов их решения. Выходом в таком случае является одно из достоинств математического моделирования — одинаковая структура (тип) модели для широкого класса содержательных задач. Это дает принципиальную возможность хорошо отработать ограниченный перечень моделей, классов задач, возникающих на этих моделях, и методов их решения, а затем использовать их как модули при конструировании информационных технологий решения конкретных типовых содержательных задач.

Для рассматриваемого нами класса содержательных задач управления развитием (ТС31–ТС321), включающего в себя порядка 10^4 – 10^5 подзадач, можно перечислить порядка десятка-сотни типов моделей и классов математических задач, которые дают возможность решать около 80 % этих содержательных подзадач. Перечислим их.

ТМ31. К первому, часто встречающемуся классу *типовых математических моделей и задач* (ТМЗ) можно отнести моделирование сохранения материальных потоков. Другими словами, это модели и задачи формирования (интерактивного) сбалансированных решений. Типовые задачи, модели, алгоритмы этого класса описаны в § 4.2 и гл. 5.

ТМ32. Комплексный целенаправленный анализ и формирование условий развития. Данные задачи относятся к классу задач системной оптимизации. Их особенностью является необходимость определения не только значения неизвестных переменных, но и формирования параметров используемых моделей (например, матриц удельных коэффициентов в линейных задачах). Подробно описание приведено в § 4.3 и гл. 5.

ТМ33. Календарное планирование комплексов работ. Задачи этого типа возникают при анализе хода реализаций этапов жизненных циклов технологий, через которые осуществляется функционирование и развитие моделируемых систем. Описание приведено в § 4.4.

ТМ34. Многокритериальная оценка и оптимизация (§ 4.5).

ТМ35. Агрегирование и дезагрегирование. В связи с тем что реальные организационно-технические структуры носят ярко

выраженный иерархический характер, возникает необходимость включать в моделирующие их РСФСР типовые процедуры агрегирования (по требуемым разрезам) и библиотеки типовых процедур декомпозиции (см. § 4.6), каждая из которых является локальной моделью принятия решений.

ТМ36. Выбор рациональной модели хозрасчета (§ 4.7).

ТМ37. Согласование с вышестоящим уровнем (§ 4.8).

ТМ38. Анализ и координация решения локальных задач (§ 4.9).

Сложность моделируемых систем и возникающих в них задач во многом определяет и методы решения последних: декомпозицию их на подзадачи, каждую из которых может решить конкретный исполнитель имеющимся у него методом.

ТМ39. Выделение существенных факторов и связей. При решении большинства содержательных задач специалисты в предметной области стараются сначала выделить «узкие места» — существенные показатели, связи. В дальнейшем при решении задачи это позволяет отбросить «избыточную» информацию, значительно сократив размерность исследуемых моделей.

Авторы не будут останавливаться в настоящем издании на типовых математических методах и алгоритмах решения задач прикладной математики. Достаточно подробно об этом можно прочитать в работах по методам исследования операций.

4.2. Алгоритм формирования согласованных балансов

4.2.1. Постановка задачи. Задача сведения балансов по продуктам и ресурсам является, как отмечалось выше, одной из наиболее часто встречающихся в рассматриваемых процедурах задач. Это, например, проверка и сведение балансов мощности, энергии, топлива, капиталовложений. Математически эта задача сводится к нахождению допустимого решения системы уравнений или неравенств, описывающих балансовые условия. Такое решение формально может быть получено любым стандартным методом. Однако подавляющее большинство таких методов, удобных для реализации на ЭВМ, не удовлетворяет перечисленным выше требованиям, предъявляемым практическими процедурами. Задача усложняется также в связи с необходимостью учета ряда особенностей этих процедур, из которых отметим следующие. Для распределенных процедур типичной является ситуация, когда в нахождении допустимого решения участвует несколько лиц, формирующих решения, причем каждое ЛФР_p готовит предложение с учетом

своего p -го ограничения (баланса топлива, энергии, капиталовложений и т. п.) и затем согласует его с другими ЛФР. Исследователь, решая сложную задачу в режиме диалога, также обычно работает с ограничениями последовательно. В связи с этим возникает потребность в итерационном алгоритме, позволяющем работать с ограничениями автономно и обеспечивающем сходимость к решению x^* , допустимому по всем ограничениям. Поскольку сведение одного частного баланса, как правило, приводит к рассогласованию других, необходимо иметь легко проверяемые условия согласования частных балансов и сходимости алгоритма. Однако эти условия должны оставлять по возможности большую свободу действия ЛФР при формировании каждого частного p -го баланса.

Возможны различные подходы к построению таких алгоритмов. Ограничимся иллюстрацией идеи одного из них (см. подробнее гл. 5) на простом примере двух балансовых ограничений, задаваемых системой линейных уравнений

$$\sum_{i=1}^n a_{i1} x_i = B_1, \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{i2} x_i = B_2. \quad (4.2)$$

Здесь x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, — значения переменных, например мощность i -й технологии; a_{i1} , a_{i2} — удельные расходы ресурсов первого и второго типа (например, топлива и капиталовложений); B_1 , B_2 — наличное количество ресурсов первого и второго типа. Необходимо найти допустимое решение x^* , удовлетворяющее обоим ограничениям, причем алгоритм формирования решений должен удовлетворять перечисленным выше требованиям.

4.2.2. Схема алгоритма. Рассмотрим несколько модификаций алгоритма, в основу которого положена схема формального итерационного алгоритма решения системы линейных уравнений методом проектирования. Этот метод заключается в последовательном проектировании очередного k -го приближенного решения на очередную плоскость, соответствующую балансируемому ограничению (на рис. 4.1 точка $x^{(0)}$, соответствующая исходному приближению решения, проектируется на плоскость 1; получившаяся точка $x^{(1)}$ (первое приближение) — на плоскость 2).

Такой алгоритм сходится достаточно быстро (со скоростью геометрической прогрессии) к допустимому решению (на рис. 4.2 к

точке x^*). На каждой k -й итерации алгоритма, $k = 0, 2, 4, \dots$, очередное приближение решения получается при корректировке пред-

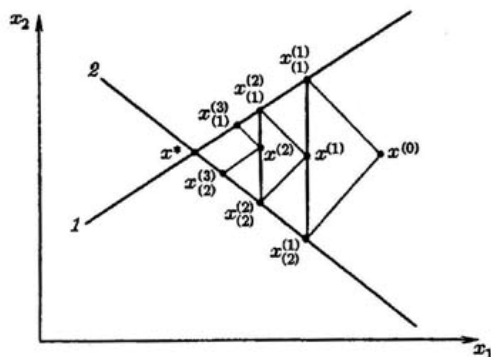


Рис. 4.1

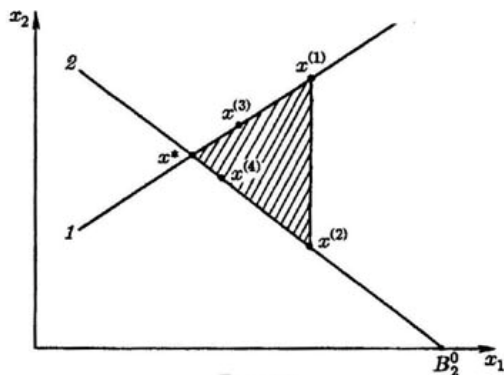


Рис. 4.2

шествующего приближения по простым формулам

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} - \alpha_i^{(k+1)} \Delta B_1^{(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.3)$$

$$x_i^{(k+2)} = x_i^{(k+1)} - \alpha_i^{(k+1)} \Delta B_2^{(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.4)$$

где $\Delta B_1^{(k)}, \Delta B_2^{(k)}$ — дефициты, $\alpha_i^{(k)}$ — коэффициенты разверстки дефицитов.

Алгоритм 1. Пусть имеется (например, по данным прошлого планового периода или предыдущих этапов процедуры) начальный вариант решения $x^{(0)}$.

Шаг 1. Формируется решение $x^{(1)}$, допустимое по первому балансовому ограничению (4.1). Для этого сначала определяется количество ресурса первого типа $B_1^{(0)}$, необходимое для реализации решения $x^{(0)}$: $B_1^{(0)} = \sum_{i=1}^n a_{i1} x_i^{(0)}$, и дефицит этого ресурса

$\Delta B_1^{(0)} = B_1^{(0)} - B_1$, где B_1 — наличное количество ресурса первого типа (4.1). Если дефицита нет (т. е. $\Delta B_1^{(0)} \leq \varepsilon$, где ε — требуемая точность), то решение некорректируется. Если дефицит есть, то оно корректируется в соответствии с формулами (4.3) и (4.4) путем распределения («разверстки») дефицита по компонентам пропорционально коэффициентам разверстки $\alpha_i^{(1)}$. Эти коэффициенты в рассматриваемом методе проектирования соответствуют нормированным удельным расходам дефицитного ресурса $\alpha_i^{(1)} = \alpha_{i1} / \sum_{i=1}^n (a_{i1})^2$. Соответственно в условиях дефицита кор-

ректировка значения $x_i^{(0)}$ начального варианта мощности каждой i -й технологии производится по следующему решающему правилу: оно «урезается» тем больше, чем больше у данной технологии удельный расход a_{i1} балансируемого дефицитного ресурса. Корректировка по такому правилу (4.3) и (4.4) гарантирует допустимость решения $x^{(1)}$ (устранение дефицита) по соответствующему балансовому условию (4.2).

Шаг 2. Формируется решение $x^{(2)}$, допустимое по второму ограничению (4.3). Для этого выполняются все действия шага 1, но применительно ко второму типу ресурса. В качестве начального приближения берутся значения $x_i^{(1)}$, полученные на шаге 1: определяется запрос второго ресурса $B_2^{(1)} = \sum_{i=1}^n a_{i2} x_i^{(1)}$, анализируется

дефицит $\Delta B_2^{(1)} = B_2^{(1)} - B_2$, который развертывается по компонентам $x_i^{(1)}$ пропорционально коэффициентам $\alpha_i^{(2)} = \alpha_{i2} / \sum_{i=1}^n (a_{i2})^2$.

Далее шаги 1 и 2 повторяются до получения приемлемого решения с дефицитами, не превосходящими заданного уровня ε . Такая интерпретация алгоритма понятна ЛФР. Алгоритм в этой форме может использоваться для регламентации процедуры решения подзадачи сведения балансов вручную или с регулируемой степенью автоматизации (блок-схема рис. 4.3). Наиболее рационально алгоритм такого типа использовать в режиме, когда ЭВМ формирует вариант решения автоматически, но ЛФР может его

проконтролировать на каждой итерации, а при необходимости и пооперационно.

Однако как отмечалось выше, для практики более типичным является случай, когда на каждой итерации при сведении различных частных балансов используются различные решающие правила, учитывающие цели и знания ЛФР, результаты предыдущих итераций и т. д. В связи с этим пользователю необходимо иметь

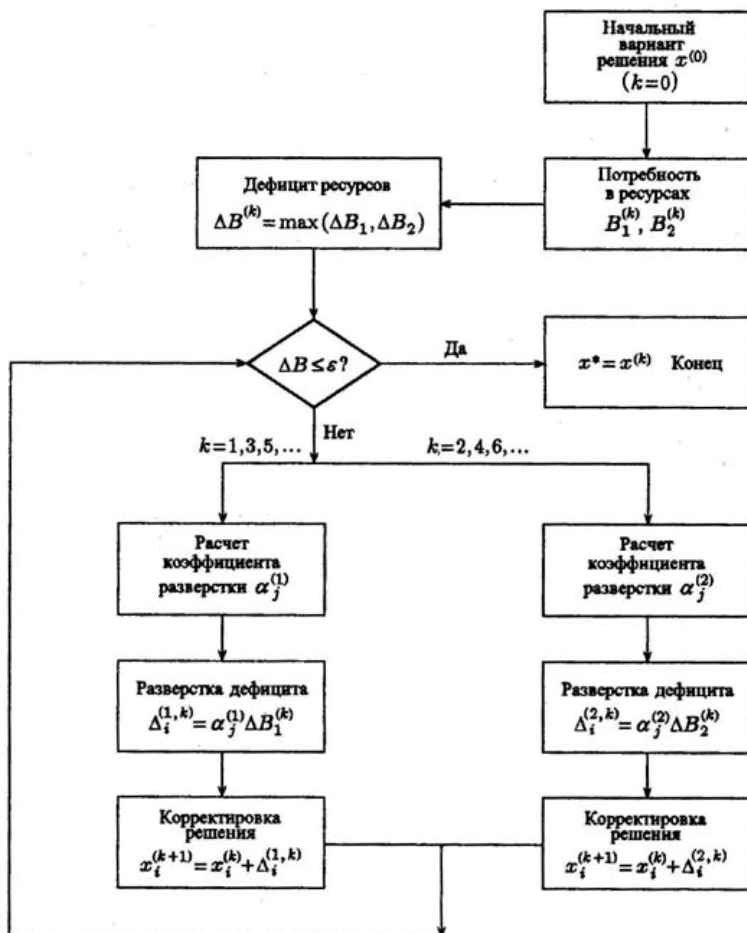


Рис. 4.3

возможность отказаться от жестко навязываемого ему со стороны ЭВМ решающего правила. Возникает вопрос: нельзя ли организовать сходящуюся процедуру последовательного сведения балансов, оставив при этом достаточную свободу выбора для пользователя (ЛФР или ЛПР)?

Рассмотрим две соответствующие модификации алгоритма, основанные на использовании достаточных условий сходимости следующего типа. Из рис. 4.1, 4.2 видно, что сходимость описанного выше алгоритма 1 связана с тем, что для получаемого на каждой итерации очередного приближения решения $(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}$ и т. д.) убывает его расстояние до искомого допустимого решения x^* . Одновременно в среднем от цикла к циклу уменьшается дефицитность $\Delta B^{(2)}$, например при очередной проекции $x^{(2)}, x^{(3)}$ на плоскость 1.

Очевидно, что это расстояние будет убывать быстрее и сходимость улучшится, если на шаге 2 в качестве очередного приближения взять не точку $x^{(2)}$, а любую более близкую к x^* точку на отрезке $[x^{(2)}, x^*]$ рис. 4.2. Принадлежность отрезку $[x^{(2)}, x^*]$, затем отрезку $[x^{(3)}, x^*]$ и т. д. и есть в данном примере достаточное условие сходимости алгоритма. Точнее, достаточным условием является принадлежность точки очередного приближения, например, $x^{(4)}$, конусу допустимых направлений. На рис. 4.2. этот конус для второй итерации (треугольник $x^{(1)} x^{(2)} x^*$ выделен штриховкой). На рис. 4.2. достаточным условием является принадлежность решения к выделенному штриховкой треугольнику.

Тогда каждое ЛФР для получения допустимого по его ограничению (4.1) может использовать любой разумный в данной ситуации и привычный ему эвристический алгоритм, что дает возможность учитывать в диалоговой процедуре его неформальные соображения и предпочтения.

Сходимость обеспечивается проверкой (ее делает ЭВМ) достаточных условий. В случае если это условие выполняется, то решение ЛФР не корректируется. Если же условие сходимости не выполняется, то предложение ЛФР $x^{(p)}$ корректируется до значения, ближайшего к $x^{(p)}$, но удовлетворяющего условию сходимости. Например (рис. 4.2), если предложенный ЛФР вариант (точка $x^{(2)}$) лежит вне выделенного штриховкой допустимого конуса, то она заменяется на точку $x^{(2)}$ на границе этого конуса и т. д.

Другой вариант достаточных условий сходимости — сокращение от цикла к циклу дефицитов по каждому из видов ресурсов (невязок по каждому уравнению). Схема использования такого усло-

вия аналогична предыдущей. На каждой итерации ЛФР сначала автономно (без учета других балансовых соотношений) формирует решения с учетом требований своего частного баланса. При этом не требуется получать сбалансированного решения даже по его собственному частному балансу, достаточно лишь, чтобы по нему был получен дефицит, меньший, чем на предшествующем цикле. Затем, как и в алгоритме, оценивается дефицит решения $x^{(4)}$, сформированного на данном цикле, по первому виду ресурса $\Delta B_1(x^{(2)})$ на предшествующем цикле. Если условие сходимости (уменьшение дефицита не менее чем на ε) ($\Delta B_1(x^{(4)}) \leq \Delta B_1(x^{(2)}) + \varepsilon$) выполнено, то $x^{(4)}$ принимается за очередное приближение. Если не выполнено, то вычисляется нарушение условия сходимости $\delta^1 = \Delta B_1(x^{(4)}) - \Delta B_1(x^{(2)}) - \varepsilon$ и предлагается, чтобы ЛФР ради гарантии получения согласованного решения скорректировало свое частное решение $x^{(4)}$ на $x_1^{(4)}$ так, чтобы его дефицитность по первому ресурсу уменьшилась на δ^1 . Это легко сделать, разверстав этот дефицит δ^1 по компонентам $x_i^{(4)}$ автоматически или в диалоговом режиме. Для этого можно использовать описанный выше алгоритм 1 или любой из указанных ЛФР алгоритмов разверстки (в системе поддержки РСФСР реализовано несколько таких эвристических алгоритмов — пропорционального деления, приоритетный и др.).

Рассмотрим модификацию алгоритма, позволяющего в распределенной системе решать задачи сведения частных балансов параллельно. Идею такого алгоритма иллюстрирует рис. 4.1. В этом случае, начиная с первой итерации, проектирование точки исходного приближения $x^{(1)}$ производится сразу на все ограничения (в данном случае на оба) — это точки $x_1^{(1)}$ и $x_2^{(1)}$. Затем независимо друг от друга лица, ответственные за эти ограничения, корректируют решения $x_1^{(1)}$ и $x_2^{(1)}$ (или соглашаются с ними). Далее на основе полученных данных о $x_1^{(1)}$ и $x_2^{(1)}$ строится новое решение $x^{(2)}$ (например, как на рис. 4.1), равноудаленное (по степени дефицитности) от обоих ограничений, $x^{(1)}$, $x^{(2)}$, $x^{(3)}$ и т. д. Содержательно это соответствует формированию последовательности не допустимых равнонапряженных решений, но с одинаковой степенью дефицитности, которая монотонно снижается от итерации к итерации.

Проектирование производится по тем же формулам (4.3), (4.4). Отличие состоит в том, что в блок-схеме алгоритма (см. рис. 4.3), исключается блок 3 и добавляется блок формирования решения

$x^{(k)}$ из приближений $x_1^{(k)}$ и $x_2^{(k)}$, например, по формуле $x^{(k)} = 0,5 x_1^{(k)} + 0,5 x_2^{(k)}$, где 0,5 — приоритеты эвристических решений локальных задач сведения частных балансов, учитываемый при построении равнонапряженного решения.

Тогда блок-схема распределенного алгоритма имеет вид, представленный на рис. 4.3, 4.4.

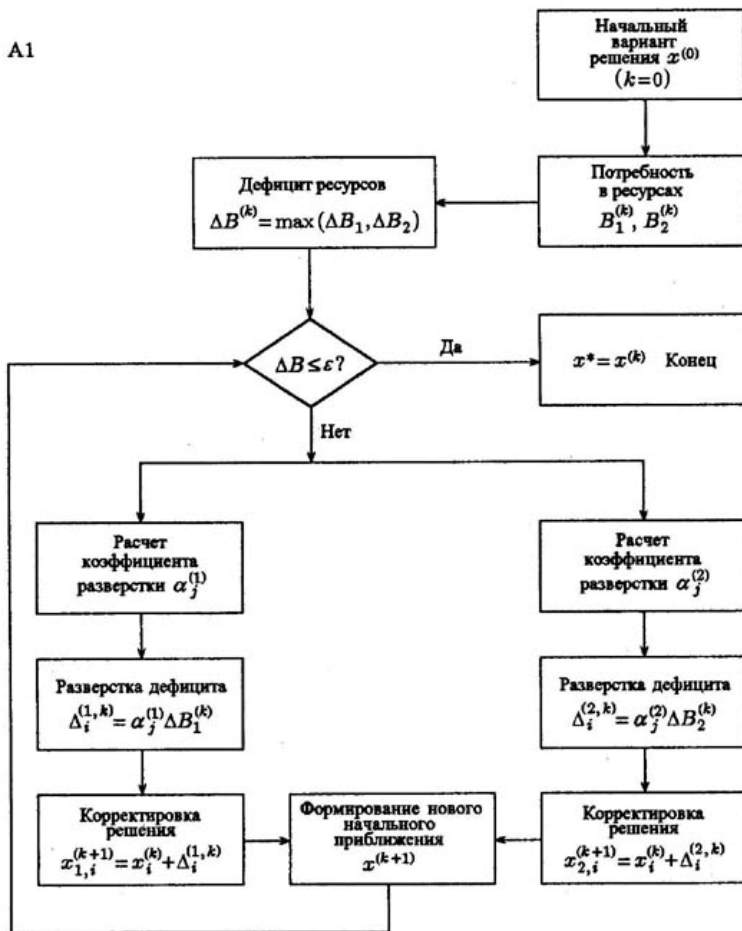


Рис. 4.4

Этот алгоритм допускает существенно ускоряющую сходимость модификацию (при той же блок-схеме). Отличие заключается в формуле построения $x^{(k)}$ по $x_1^{(k)}$ и $x_2^{(k)}$:

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} + t^* (x^{(k)} - x^{(k-1)}),$$

$$\text{где } x^{(k)} = 0,5 x_1^{(k)} + 0,5 x_2^{(k)},$$

$$t^* = \operatorname{Arg} \min_{t \geq 0} \left\{ (B_1 - (B_1^{(k-1)} (1-t) + \tilde{B}_1^{(k)} t))^2 + \right. \\ \left. + (B_2 - (B_2^{(k)} (1-t) + \tilde{B}_2^{(k+1)} t))^2 \right\},$$

$$B_j^{(k-1)} = \sum_{i=1}^n a_{i,j} x_{j,i}^{(k-1)}, \quad j = 1, 2,$$

$$\tilde{B}_j^{(k)} = \sum_{i=1}^n a_{i,j} x_{j,i}^{(k)}, \quad j = 1, 2.$$

Процедуры формирования сбалансированного решения для многоуровневой иерархической структуры включают в себя итерационные взаимодействия процедур решения типовых локальных задач — формирования сбалансированных решений для двухуровневых структур.

Можно показать (см. гл. 5), что достаточно исследовать элементарные двухуровневые задачи трех типов:

Задача 1. Задачи с ресурсной (функциональной) распределенностью (различные ЛФР оперируют со всем множеством переменных модели $x = \{x_i\}$, но на различных группах ресурсов, т. е. $P_{s_1} \cap P_{s_2} = \emptyset$, $s_1 \neq s_2$):

$$a_p^0 x^{(0)} = b_p^{(0)}, \quad p \neq P, \quad x^{(0)} = \sum_{i=1}^n x_i^{(1)},$$

$$\sum_{i=1}^n a_{p,i} x_i^{(1)} \leq b_p^{(0)}, \quad p \in P_s, \quad X \rightarrow X^{(s)}, \quad s = 1, \dots, S$$

$$P_{s_1} \cap P_{s_2} = \emptyset, \quad s_1 \neq s_2, \quad \bigcup_{s=1}^S P_s = P,$$

$$X^{(s)} = \left\{ x \mid \sum_{i=1}^n a_{p,i} x_i \leq b_p^{(0)}, \quad p \in P_s \right\},$$

где p — индекс вида ресурса (или задания по производству продукта), P — множество индексов видов ресурсов (или заданий по производству продуктов), S — множество индексов подсистем,

s — индекс подсистемы, представляемой ЛФР $_s$, $x^{(0)}$ — переменная верхнего уровня, $x^{(1)}$ — вектор переменных нижнего уровня, b — вектор правых частей (ограничений на потребление ресурсов и заданий по производству продуктов), P_s — множество индексов ресурсов (и заданий по производству продуктов), относящихся к s -й подсистеме, i — индекс компоненты вектора переменных, X — все пространство переменных, $X^{(s)}$ — подпространство, с которым работает ЛФР $_s$.

Задача 2. Задачи с функциональной распределенностью (различные ЛФР $_s$ оперируют с одним и тем же множеством ресурсов P , но с различными (непересекающимися) группами переменных $x^{(s)} = \{x_i\}$, $i \in I_s$, $I_{s_1} \cap I_{s_2} = \emptyset$, $s_1 \neq s_2$):

$$\begin{aligned} a_p^{(0)} x^{(0)} &= b_p^{(0)}, \quad p \in P, \quad x^{(0)} = \sum_{i=1}^n x_i^{(1)}, \\ \sum_{i \in I_s} a_{p,i} x_i^{(1)} &\leq b_p^{(s)}, \quad p \in P, \quad s = 1, \dots, S, \\ \sum_{s=1}^S b_p^{(s)} &= b_p^{(0)}, \quad p \in P, \quad \bigcup_{s=1}^S I_s = I = \{1, \dots, n\}, \\ I_{s_1} \cap I_{s_2} &= \emptyset, \quad s_1 \neq s_2, \quad X_s^s \rightarrow X_s, \\ X_s &= \left\{ x^{(s)} \mid x^{(s)} = \{x_i\}, i \in I_s \right\}. \end{aligned}$$

Задача 3. Задачи с линейно-функциональной распределенностью (различные ЛФР оперируют как с различными группами переменных, так и с разными группами ресурсов). Причем у разных ЛФР $_s$ могут быть общие группы переменных и ресурсов:

$$\begin{aligned} a_p^{(0)} x^{(0)} &= b_p^{(0)}, \quad p \in P, \quad x^{(0)} = \sum_{i=1}^n x_i^{(1)}, \\ \sum_{i \in I_s} a_{p,i} x_i^{(1)} &\leq b_p^{(0)}, \quad p \in P_s, \quad s = 1, \dots, S, \\ \bigcup_{s=1}^S I_s &= I = \{1, \dots, n\}, \quad I_{s_1} \cap I_{s_2} = \emptyset, \quad s_1 \neq s_2, \\ P_{s_1} \cap P_{s_2} &= \emptyset, \quad s_1 \neq s_2, \quad \bigcup_{s=1}^S P_s = P, \\ X^s &\rightarrow X^{(s)}, \quad s = 1, \dots, S, \quad \sum_{s=1}^S b_p^{(s)} = b_p^{(0)}, \quad p \in P, \\ X^{(s)} &= \left\{ x^{(s)} \mid x^{(s)} = \{x_i\}, i \in I_s, \sum_{i \in I_s} a_{p,i} x_i \leq b_p^{(s)}, \quad p \in P_s \right\}. \end{aligned}$$

Идея алгоритма 1 (A1) решения задачи 1 описана в первой части настоящего параграфа (сам алгоритм приведен в гл. 5).

Алгоритм 2. Идея алгоритма 2 (A2) решения задачи 2 (сам алгоритм приведен в гл. 5) следующая (рис. 4.5).



Рис. 4.5

Шаг 1. Общий ресурс делится между различными ЛФР_s, например, пропорционально начальному (или «базовому») состоянию системы $b^{(s)} \sim b^{(s,0)}$, где

$$b^{(s,0)} = \sum_{i \in I_s} a_{p,i} x_i^{(0)}.$$

Шаг 2. Для каждого s -го ЛФР_s решается задача 1 с фиксированным ресурсом 1.

Шаг 3. На основе решений локальных задач $x^{(s)}$ формируется новое приближение x , например, по формуле $x_i = x_i^{(s)}$ при $i \in I_s$.

Шаг 4. Если

$$\max_{p \in P} \left\{ \left| \sum_{i=1}^n a_{p,i} x_i - b_p^{(0)} \right| \right\} \leq \varepsilon,$$

где ε — требуемая точность решения задачи, то процедура заканчивает работу. Иначе фиксируется новое «начальное» приближение системы $x^{(0)} = x$, и алгоритм повторяет работу с шага 1.

Идея алгоритма 3 (А3) решения задачи 3 следующая (сам алгоритм описан в § 5.1). Среди множества подсистем S выделяются подсистемы $\tilde{S}$, имеющие одновременно общие группы переменных ($I_{s_1} \cap I_{s_2} = \emptyset$ при $s_1 \neq s_2$) и ресурсов ($P_{s_1} \cap P_{s_2} = \emptyset$ при $s_1 \neq s_2$).

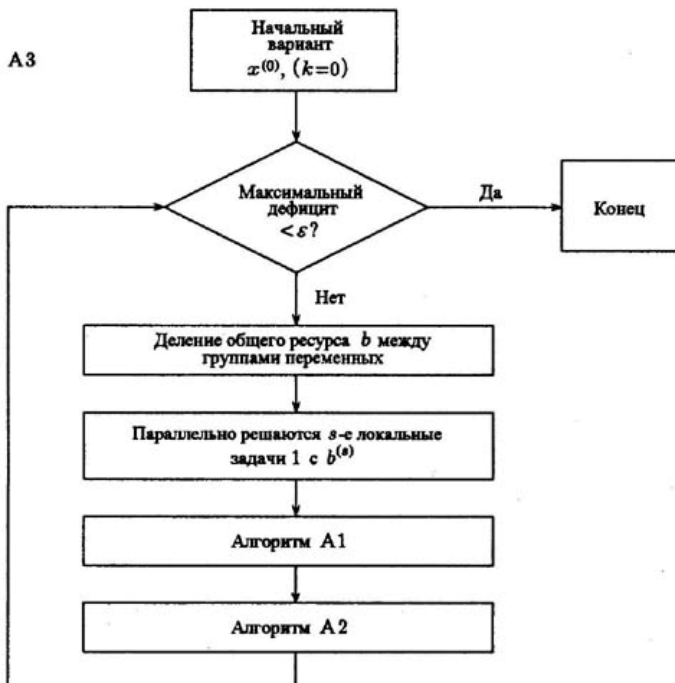


Рис. 4.6

Далее последняя система решается путем последовательного применения А1 и А2, т. е. алгоритм 3 включает в качестве своих элементов алгоритмы решения задач 1 и 2.

Алгоритм 3. Содержит следующие основные этапы (рис. 4.6).

Этап 1. Фиксируется начальное решение $x^{(0)}$.

Этап 2. Как в шаге 1 алгоритма 2, производится деление общего ресурса B между различными группами переменных.

Этап 3. Для каждой группы переменных различные ЛФР, (как в А1) формируют решения локальных s -х задач (по разным группам ресурсов).

Этап 4. По каждой группе переменных «увязываются» решения s -х локальных задач (как в А1, берется линейная свертка решения локальных задач в каждой группе переменных).

Этап 5. «Увязываются» результаты этапа 4, полученные по разным группам переменных (как в А2, новое решение x есть декартово произведение решений $x^{(s)}$ задач этапа 4 для разных групп переменных).

Этап 6. Если последняя система решена с требуемой точностью ε , то процедура заканчивает работу. Иначе фиксируется новое «начальное» состояние системы $x^{(0)}$, $x^{(0)} = x$, и алгоритм повторяет работу с этапа 1.

Перейдем теперь к формированию сбалансированного решения на многоуровневой структуре. Формальная постановка этой задачи (задача 4) приведена в § 5.1.

Идея алгоритма 4 (А4) решения задачи 4 следующая: каждый этап содержит два шага — «поток сверху вниз» и «поток снизу

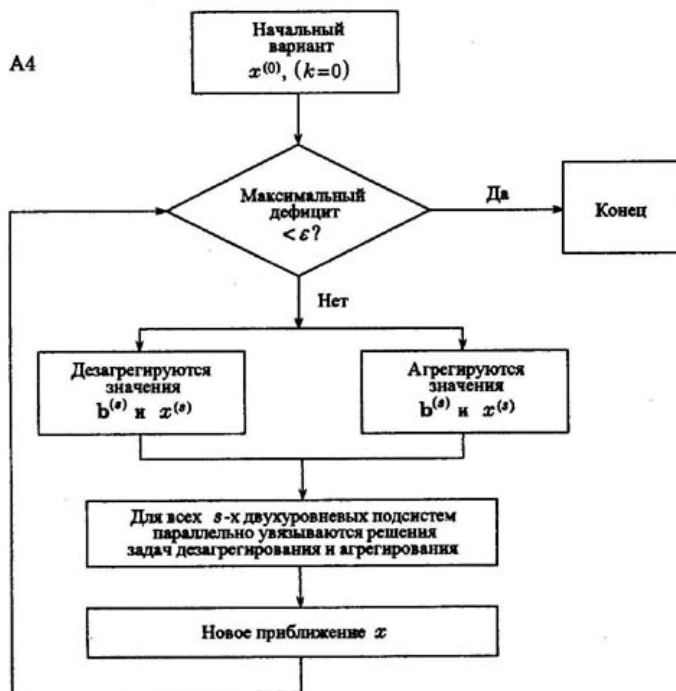


Рис. 4.7

вверх». На первом шаге («поток сверху вниз») последовательно сверху вниз, уровень за уровнем, решаются задачи 3 для двухуровневых систем. Происходит последовательное дезагрегирование как значений правых частей b , так и переменных x до тех пор, пока не будут решены задачи 3 для нижнего уровня информационной структуры.

На втором шаге («поток снизу вверх») происходит агрегирование сформированных (на первом шаге) решений нижнего уровня. При этом на всех промежуточных уровнях формируются решения $(b^{(s)}, x^{(s)})$, которые могут отличаться от решений первого шага. Далее берется суперпозиция решений первого и второго шагов (берется линейная свертка) и принимается за начальное приближение для следующего этапа алгоритма. Алгоритм 4 заканчивает работу, когда с требуемой точностью сформировано сбалансированное решение на многоуровневой структуре, т. е. А4 включает в себя как составные элементы алгоритмы А1–А3. Подробная схема А4 и доказательство утверждений о его сходимости (и, естественно, о сходимости А1–А3) приведены в § 5.1.

Алгоритм 4. Включает в себя следующие основные этапы (рис. 4.7).

Этап 1. Фиксируется начальное («базовое») решение $x^{(0)}$.

Этап 2. Для всех двухуровневых систем, решаемых алгоритмами А1–А3, происходит параллельное дезагрегирование переменных $x^{(s)}$, правых частей $b^{(s)}$, $b^{(s)} = A^{(s)} x^{(s)}$ и агрегирование переменных $x^{(s)}$, правых частей $b^{(s)}$, $b^{(s)} = A^{(s)} x^{(s)}$ («поток сверху вниз и снизу вверх»).

Этап 3. Для каждой двухуровневой системы производится «увязка» решений задач дезагрегирования и агрегирования («увязка» производится путем взятия линейной свертки решений задач агрегирования и дезагрегирования).

Этап 4. «Увязываются» решения задач 3, полученные для разных двухуровневых подсистем. «Увязывание» производится следующим образом: для каждой i -й компоненты вектора переменных x ; есть среднее арифметическое по всем $x_i^{(r)}$, где $x_i^{(r)}$ — решение задачи этапа 3 для r -й двухуровневой подсистемы.

Этап 5. Если сбалансированное решение многоуровневой системы x сформировано с требуемой точностью ε , то алгоритм оканчивает работу. Иначе фиксируется новое приближение $x^{(s)}, x^{(s)} = x$ и алгоритм повторяется с этапа 1.

4.3. Комплексный анализ и целенаправленное формирование условий развития (модели и методы системной организации)

4.3.1. Общие замечания. Как отмечалось в части I, условия развития организационной системы определяются перечнем мероприятий: научно-технических, изменяющих показатели эффективности системы, и строительных, меняющих уровни и структуру мощностей, и ограниченными возможностями обеспечивающих организаций, поставляющих материальные и другие ресурсы (создаваемые ими ограничения можно изменять, вкладывая финансовые и другие ресурсы в их развитие).

Совокупность значений показателей, характеризующих продукцию, мощности и эффективность системы, определяет ее состояние в любой момент времени (точку в пространстве показателей). Любой вариант развития системы описывается совокупностью ее состояний в различные моменты времени, т. е. совокупностью точек в пространстве показателей (траекторией). Понятие «траектория» можно использовать не только для динамических, но и для статических задач. При этом в качестве параметра траектории на разных этапах процедуры может быть выбран любой другой показатель, характеризующий развитие системы и наиболее существенный для решаемой задачи. Например, на этапе целеобразования это может быть уровень энергопотребления на заданный год, на этапе распределения ресурсов — уровень выделяемых суммарных капиталовложений и т. д.

Если на этапе целеобразования желаемая траектория развития выбрана, то на последующих этапах процедуры при учете ограничений она играет роль целевой установки: максимально продвинуться по траектории к ее конечной точке. Другими словами, требуется обеспечить достижение заданных значений показателей, а если это невозможно, то приблизиться к ним, сохраняя намеченные траекторией пропорции развития. В первом случае цель достигнута, в последнем случае полученное решение необходимо проанализировать и, возможно, пересмотреть, уточнить целевую установку (траекторию).

Далее мы рассмотрим модели и методы комплексного анализа условий развития, использующие в качестве целевой установки траекторию. Следует отметить, что это не ограничивает возможностей решения рассматриваемого класса задач, поскольку любая из них может быть представлена в траекторной форме (см. § 4.4, 5.2). Здесь, как и в предыдущем параграфе, ограничимся рас-

смотрением основных особенностей и идей соответствующих алгоритмов на упрощенном примере постановки задачи (общее математическое описание дано в § 5.2). Рассмотрим сначала задачу выбора при фиксированных условиях развития, а затем задачу формирования этих условий.

4.3.2. Постановка задачи выбора. Обычно формирование основной целевой установки (потребностей в продукции организации) производится для нескольких вариантов развития потенциальных потребителей выходных продуктов отрасли. Например, при формировании каждого варианта развития ЕЭЭС потребность в электроэнергии определяется для двух-трех различных уровней электропотребления, соответствующих различным темпам развития народного хозяйства.

Таким образом, в пространстве продуктов отрасли Φ или в пространстве энергетических мощностей X получается набор точек, наиболее предпочтительных для соответствующего уровня элек-

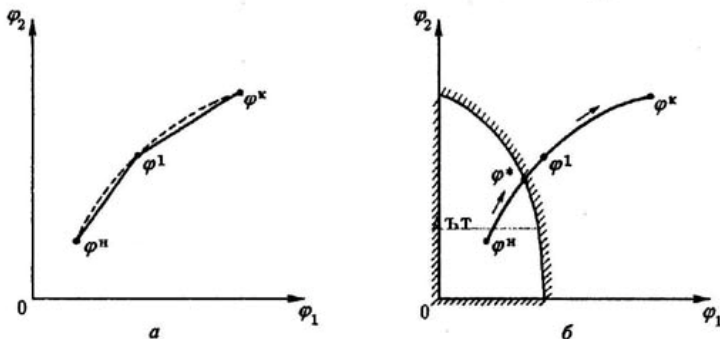


Рис. 4.8

тропотребления (рис. 4.8). Объединение такого множества точек для всех возможных значений параметра (в данном случае уровня электропотребления) образует траекторию наиболее предпочтительных решений (штриховая линия на рис. 4.8 а). При небольшом количестве точек (для получения каждой точки требуется около полугода работы ряда проектных институтов) можно получить приближенные траектории (сплошная линия на рис. 4.8 а) кусочно-линейной интерполяцией, точкам излома которой соответствует экспертно проработанные варианты φ^n , φ^1 , φ^k (исходная точка φ^n соответствует достигнутым значениям). Аналогично определяется траектория в пространстве мощностей X .

При учете ограничений уровень выработки, как правило, оказывается ниже желаемого (на начальных этапах планирования превышение потребности над возможностями является естественным для целенаправленно развивающихся систем). В связи с этим естественной целевой установкой при формировании наиболее предпочтительного допустимого решения (область допустимых решений на рис. 4.8б выделена штриховкой) является достижение точки траектории, соответствующей максимально возможной выработке (и потреблению) энергии, т. е. максимальное продвижение вдоль траектории от достигнутого уровня (φ^n) в сторону увеличения уровня выработки (стрелка на рис. 4.8б). Требуется найти допустимое и наиболее предпочтительное по этой целевой установке решение.

Очевидно, что искомое решение φ^* в этом случае находится как точка пересечения траектории с границей области допустимых решений. Этот факт является основой построения конкретных алгоритмов, определяемых конкретными ограничениями и видом траектории.

Для рассматриваемых задач область допустимых решений задается обычно в пространстве мощностей $\{X_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, системой линейных ограничений, которые для случая двух ограничений имеют вид

$$\sum_{i=1}^n a_{i1} x_i \leq B_1^0, \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{i2} x_i \leq B_2^0, \quad (4.5)$$

где x_i — мощность i -й технологии; a — удельный расход ресурса вида 1 или 2 с применением технологии i ; B_1 и B_2 — наличное количество ресурсов вида 1 или 2. В этих же показателях мощностей x_i будем здесь для простоты рассматривать и траекторию (другие случаи описаны в § 5.2).

Анализ свойств траектории для задач распределения ресурсов показывает целесообразность ее приближенного кусочно-линейного представления, рассмотрением которого мы и ограничимся. При этом для простоты будем считать, что траектория исходит из начала координат.

Область допустимых решений X^0 , образуемая каждым ограничением (рис. 4.9а), пересекает траекторию (далее для простоты рассмотрим только случай, когда пересечение происходит с первым

линейным участком траектории, от начала координат до точки x^{*1}). В этом случае целевой точкой (точкой «идеала» $x^{ид}$) является первая ближайшая к границе области допустимых решений точка излома траектории x^1 . Введем параметр λ , характеризующий степень достижения цели (точки x): в точке идеала $x^{ид}$ (цель

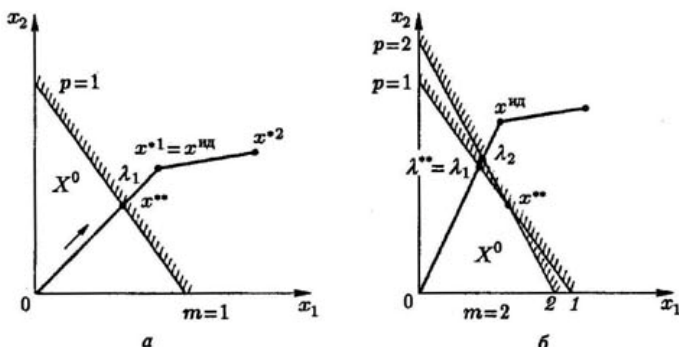


Рис. 4.9

достигнута) и в начале траектории (на рис. 4.9, это соответствует продвижению вдоль отрезка $[0, x]$). Задача выбора математически формализуется как задача линейного программирования:

$$\lambda \rightarrow \max, \quad (4.6)$$

$$x = \lambda x^{ид}, \quad (4.7)$$

$$x \in X^0, \quad (4.8)$$

где множество допустимых решений определяется неравенствами (4.4), (4.5). Оптимальное решение этой задачи находится в явном виде по формулам, которые для рассматриваемого случая двух ограничений имеют вид

$$x^* = \lambda^* x, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.9)$$

где

$$\lambda^* = \min \{\lambda_1, \lambda_2\}, \quad (4.10)$$

$$\lambda_1 = \frac{B_1^0}{B_1^{ид}} = \frac{B_1^0}{\sum_{i=1}^n a_{i,1} x_i^{ид}}, \quad \lambda_2 = \frac{B_2^0}{B_2^{ид}} = \frac{B_2^0}{\sum_{i=1}^n a_{i,2} x_i^{ид}}. \quad (4.11)$$

Это определяет алгоритм решения задачи.

мощности каждой технологии вводятся двусторонние ограничения на значения переменных x вида

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad (4.13)$$

алгоритм сохраняет свою структуру (правая часть рис. 4.10 — «учет локальных ограничений»).

В этом случае аналогично определяются степени дефицитности λ_i (по мощностям) каждого i -го ограничения: $\lambda_i = x_i^{\min}/x_i^{\max}$, наиболее существенное из ограничений («узкое место» локальных ограничений) и соответствующее значение $\lambda_{(i)}^* = \min_{1 \leq i \leq n} \{\lambda_i\}$. Обшая степень достижения цели определяется наиболее узким местом по общим и локальным ограничениям $\tilde{\lambda}^* = \min \{\lambda^*, \lambda_{(i)}^*\}$, после чего для нахождения λ используется та же формула. Эти вычисления могут проводиться параллельно различными исполнителями. Заметим, что если траектория не попадает в параллелепипед ($ABCD$ на рис. 4.10) ограничений (4.13), то траекторный подход не применим вообще. Однако последняя ситуация означает, что целевая установка (траектория) строилась недостаточно обоснованно. В рассмотренных процедурах такая ситуация невозможна, поскольку в качестве начальной точки траектории всегда берется существующее (уже реализованное и удовлетворяющее всем ограничениям) состояние. Поэтому из многих вариантов упорядочения процедуры рациональным является учет сначала общих ограничений и получение решения, а затем локальных с соответствующей корректировкой решения.

4.3.3. Диалоговый режим работы алгоритма. Описанный алгоритм может быть реализован вручную, с частичной или полной автоматизацией. При этом если цель $x^{\max}$ достигнута, то задача решена. Если нет, то начинается диалоговая процедура оценки результата $x^{\max}$ и уточнения целей (с учетом выявленных ограниченных возможностей), которая не может быть реализована без непосредственного участия ЛПР или ЛФР.

В основе регламентации сходящейся диалоговой процедуры лежат следующие общие принципы. Если бы оптимальная траектория была известна в явном виде, то, как отмечалось выше, точное решение x^* находилось бы как ее пересечение с границей области допустимых решений (см. рис. 4.9 а) за одну итерацию. В случае, если траектория существует, но в явном виде известны, как в рассматриваемом примере, лишь две ее конечные точки (x^0), то диалоговую процедуру целесообразно построить по схеме поэтапного уточнения (приближения) траектории с использованием для

этого кусочно-линейной интерполяции по точкам, которые дают ЛПР по следующей схеме (рис. 4.11).

Сначала по двум точкам строится начальное линейное приближение траектории, а по алгоритму — решение $x^{0(0)}$. Затем ЛПР формируется новая точка траектории ($x^{ид(1)}$ на рис. 4.11) и

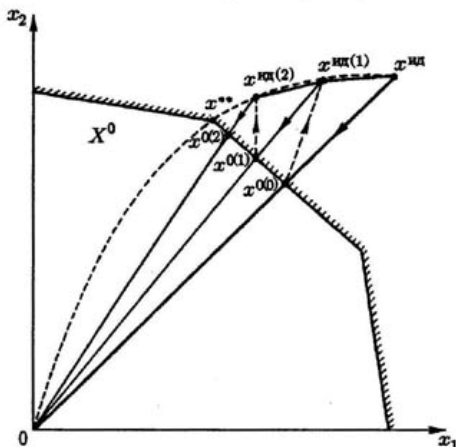


Рис. 4.11

строится уточненное кусочно-линейное приближение траектории по трем точкам $(0, x^{ид(1)}, x^{ид(2)})$, пересечение которого с границей дает новое решение $x^{0(1)}$, и т. д. (см. рис. 4.11).

Конкретный вариант регламентации диалога, в частности коррекции решения $x^{0(k)}$, зависит от решаемой задачи и возможностей ЛПР. Для иллюстрации рассмотрим здесь два варианта уточнения решения.

Предположение 1. Имеется хорошо проработанный опорный вариант решения $x^{ид(1)}$, оценка степени его дефицитности λ^* и полученное допустимое решение $x^{*(0)}$. ЛПР в состоянии сделать уступку от состояния «на отлично» $x^{ид(0)}$ к состоянию «на хорошо» $x^{ид(1)}$.

Предположение 2. Имеются те же исходные данные, что и в предположении 1, и ЛПР (или его подчиненные, ответственные за компоненты x_i) в состоянии покомпонентно указать минимально необходимые для получения приемлемого результата дополнительные к $x^{*(0)}$ значения Δx_i (или дополнительные ресурсы), что также соответствует оценке «на хорошо». При этом ЛПР не должен заботиться о допустимости вновь сформированного ре-

шения

$$x^{ид(1)} = x^{*(0)} + \Delta x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Для формирования ответа ЛПР может использовать справочную информацию, совещаясь с подчиненными и руководством, и т. д. Первая ситуация более типична, например, при формировании проектов развития отрасли, когда тщательно (полгода-год) прорабатывается опорный вариант, а ресурсные ограничения еще могут быть скорректированы. Вторая ситуация типична, например, при распределении ресурсов между программами, когда ограничения по ресурсам более жестки и являются основной причиной корректировки решений.

Но каким бы образом ни была определена новая точка, она должна удовлетворять требованию, что если бы она была допустимой, то была бы выбрана точкой ЛПР.

На каждом цикле диалога ЭВМ проверяется достаточное условие сходимости. Из свойств монотонности траектории следует, что таким условием может быть требование, чтобы расстояние по траектории от новой точки идеала до ее начальной точки (значение параметра траектории λ) сокращалось. Таким параметром, как отмечалось, может быть уровень потребности в энергии, объем капиталовложений или одновременное уменьшение значений всех показателей и др. Для рассматриваемой задачи распределения ресурсов удобно использовать условие сокращения степени дефицита ресурсов.

Заметим, что на практике степень дефицитности пользователем учитывается существенно и алгоритм сходится за несколько итераций. В случае если условие сходимости нарушено, ЛПР предлагается пересмотреть $x^{ид(k)}$, причем в ЭВМ формируется для него возможный скорректированный вариант.

Были исследованы вопросы сходимости диалоговой процедуры в случае, когда ЛПР может допускать ошибки. При этом необходимые и достаточные условия сходимости формулируются в форме принадлежности области (конусу) допустимых значений. Это позволяет дать максимальную свободу выбора ЛПР и облегчить диалог; в частности, от него не требуется попадание на траекторию, проверка допустимости и т. д.

По близкой схеме алгоритм реализуется и для случая двухуровневой задачи, когда ограничения задаются в пространстве целевых показателей.

Опыт решения практических задач распределения ресурсов при планировании программ НИР и ОКР показывает, что при рас-

пределении четырех-семи типов ресурсов примерно по десяти работам алгоритм сходится, как правило, за четыре-пять итераций. По-видимому, существенную роль при этом играет то, что пользователь анализирует степень дефицитности ситуации и последовательность решений $x^{*(0)}, \dots, x^{*(k)}$, «окоптуривающих», проявляющих для него границу допустимых решений, в совокупности с оценками их отклонения от оптимального решения.

4.3.4. Постановка задачи. Рассмотрим формальную постановку задачи формирования условий развития (подробное описание используемых алгоритмов приведено в § 5.2). Пусть в данный момент времени анализируется изменение производственной струк-

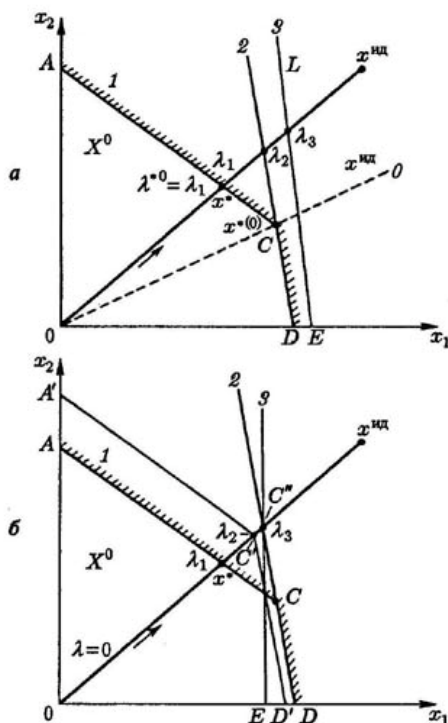


Рис: 4.12

туры (например, электроэнергетики), точнее, вводов x_i мощностей по технологиям $I = 1, 2, \dots, n$ на перспективу в десять лет (на рис. 4.12 это величины x_1, x_2 , их начальному значению со-

ответствует точка начала координат $(0, 0)$). Возможности отразили, например, на конец пятилетки, определяются ограничениями на ресурсы с фиксированными значениями коэффициентов удельных расходов ресурсов $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}$ по типам ресурсов p (они определяются используемыми техническими средствами) и с заданными значениями выделенных отрасли ресурсов $B_1^0, \dots, B_p^0$ каждого вида p (например, для электроэнергетики — газа, угля, железобетона, поставки оборудования, капиталовложений).

Эти ограничения (на рис. 4.12 a прямые AC, CD, LE) определяют область X^0 допустимых решений, выделенную на рис. 4.12 a штриховкой, которая соответствует стоящей на конец пятилетки цели $x^{ид}$ и, возможно, стоявшей ранее цели $x^{ид(0)}$. Однако допустим, что под влиянием внешних условий цель изменилась: при тех же суммарных мощностях требуется другая структура вводов (замена точки $x^{ид(0)}$ на рис. 4.12 a на точку $x^{ид}$).

Требуется достичь цель ($x^{ид}$) или максимизировать степень ее достижения λ , продвигаясь по траектории $(0, x^{ид})$ от начальной точки 0 ($\lambda = 0$) к точке идеала $x^{ид}$ ($\lambda = 1$). Сложившаяся структура ограничений плохо соответствует этой новой целевой установке: степень достижения конечной цели лимитируется одним наиболее дефицитным ограничением (на рис. 4.12 a — первым: $\lambda^{*0} = \lambda_1$) при наличии излишков (по отношению к целевой установке) других (второго и третьего) ресурсов. Возникает проблема: как привести структуру ограничений в соответствие с новой целью и соответственно изменить область допустимых значений так, чтобы максимизировать степень достижения цели.

Рассмотрим три группы мероприятий, которые могут быть полезны для решения этой проблемы устранения «узких мест» (диспропорций). Это — использование возможностей НТП (включение в состав действующих новых технологий и изменение объемов их внедрения), снижающих расход дефицитных ресурсов. Затем — рациональное (по конечному результату) перераспределение средств (в рамках выделяемых отрасли) за счет их снятия, насколько это возможно, с менее дефицитных и переброски на более дефицитные ограничения. Это мероприятие более эффективно в рамках комплекса отраслей (например, за счет перераспределения капиталовложений между топливдобывающими отраслями и электроэнергетикой, между ними и машиностроением, между производством и наукой и т. п.).

Наконец, при исчерпании этих ресурсов — выделение народным хозяйством дополнительных средств (например, капиталовложений), минимально необходимых для достижения цели (или

при их заданном уровне — обеспечение максимальной степени достижения цели), для чего снова необходимо решать задачу о рациональном распределении этих дополнительных средств.

Возможно использование этих и других (например, организационных) мероприятий как в отдельности, так и в комплексе. Причем, как показано в § 5.2, для получения оптимального решения (максимальной степени достижения цели) порядок анализа и выбора этих мероприятий не существен. Это дает свободу в построении различных итерационных процедур. Например (см. § 5.2), при автоматическом режиме решения задачи в целом на ЭВМ с точки зрения времени счета выгоднее учитывать все возможности. В практической процедуре, реализуемой в организационной системе, удобнее учитывать эти факторы (мероприятия) раздельно, поскольку ими занимаются различные ведомства. В связи с этим необходимо уметь решать соответствующие задачи как автономно, так и в комплексе.

Для иллюстрации основных идей алгоритмов рассмотрим несколько автономных ситуаций и соответствующие им дескриптивные процедуры.

Начнем с наиболее простого случая, когда НТП не учитывается (состав технологий и значение их удельных показателей фиксированы), однако на конец рассматриваемого планового периода известны предельные возможности изменения объемов выделенных ресурсов $B_p^{\min}$, $B_p^{\max}$ (значений правых частей ограничений):

$$B_p^{\min} \leq B_p \leq B_p^{\max}. \quad (4.14)$$

Кроме того, известен объем выделяемого дополнительно ресурса ΔB (например, капиталовложений) и эффективность a_{p0} его использования для увеличения значений B_p^0 каждого из ограничений. В линейном случае

$$\Delta B = \alpha_{1,0} \Delta B_1 + \alpha_{2,0} \Delta B_2, \quad (4.15)$$

где $\alpha_{1,0}$, $\alpha_{2,0}$, — например, удельные капиталовложения в добычу угля, газа и т. д.

Требуется построить пошаговый алгоритм (и соответствующую дескриптивную процедуру) распределения дополнительного ресурса ΔB , обеспечивающий максимальную степень достижения цели λ (т. е. выбрать такую форму области допустимых значений X^0 , которая обеспечила бы максимальное продвижение вдоль траектории).

Алгоритм 2. В этом случае изменению наличных ресурсов $B_1 = B_1^0 + \Delta B$ геометрически соответствует параллельный сдвиг границы области допустимых значений (рис. 4.12 б). Тогда для продвижения по траектории необходимо добавить ресурсы на дефицитное и существенное для достижения цели ограничение (сдвиг от прямой AC к прямой $A'C'$), возможно, сняв их с не-существенного. Новая область допустимых решений $O'A'C'D'$ по сравнению с прежней областью $OACD$ дает возможность даже при тех же средствах (при $\Delta B = 0$) продвинуться по траектории и увеличить степень достижения цели (от λ_1 до λ_2).

Было показано, что в этом случае в оптимальном решении все ограничения должны иметь одинаковую степень дефицитности (т. е. быть сбалансированными по отношению к степени достижения цели). Геометрически это соответствует тому, что прямые, соответствующие ограничениям, должны пересекаться в одной и той же точке, лежащей на траектории (C , C' и C'' на рис. 4.12 б). Такие ограничения естественно называть сбалансированными.

Можно убедиться (см. § 5.2), что максимальная степень достижения цели обеспечивается в том случае, если могут быть сбалансированы на одном уровне все ограничения. Если возможности поставок финансовых, трудовых и материальных ресурсов могут обеспечить сбалансированность всех ограничений, то такие поставки будем называть *комплектными*.

Следует отметить практическую важность наличия достаточно простых процедур, позволяющих формировать исходящие из конечной цели требования к перспективным комплектным поставкам и, таким образом, создавать основу для формирования согласованных долгосрочных программ развития отраслей или предприятий-поставщиков не от достигнутой базы, а от конечной цели.

Соответственно, основная идея алгоритма — это пошаговое «подтягивание» дефицитных ограничений, чтобы сделать их сбалансированными по конечной цели с менее дефицитными, с последующим балансированием их на одном уровне (если возможны комплектные поставки). Эти особенности определяют следующую схему алгоритма (А3).

Алгоритм 3. Формируются целевая установка в форме траектории, исходящей из начальной (существующей) точки, существующие на начальный временной период ограничения и предельные возможности (4.4), (4.5) их изменения на рассматриваемый период времени; фиксируются (или рассматриваются в диапазоне) выделяемые дополнительно ресурсы и их связи типа (4.15).

Шаг 1. Ограничения анализируются по степени дефицитности, для чего используется алгоритм 1: определяются и ранжируются значения степени дефицитности λ_p ($\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$ на рис. 4.12 а), выделяется «узкое место» — существенное ограничение с минимальным λ (это λ_1 на рис. 4.12 а) и определяется степень достижения цели $\lambda^* = \min(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \lambda_1$.

Шаг 2. Дополнительные ресурсы выделяются на существенное ограничение (АС рис. 4.12 б) так, чтобы степень достижения цели по этому ограничению повысилась до уровня следующего по дефицитности значения $\lambda = \lambda_2$; $\Delta B = (\lambda_2 - \lambda_1) B_1^{\text{ид}}$, где

$B^{\text{ид}} = \sum_{i=1}^n a_{i1} x_{i1}^{\text{ид}}$ — запрос ресурса первого типа в точке идеала.

Эта величина вычитается из общего наличия ресурса ΔB (если его хватает) или уменьшается до значения ΔB (если $\Delta B \geq \Delta B_1$). В случае возможности перераспределения эта величина ΔB_1 снимается с недефицитных ограничений. При этом возможны два исхода.

а) Ограничения 1 и 2 (рис. 4.12 б) не сбалансированы из-за условий (4.4), (4.5). В этом случае выделяется причина — «узкое место» и ищутся новые мероприятия по увеличению B_p^{max} или ΔB , снижению удельных затрат α_1, α_2 и т. д., и цикл повторяется с шага 2. Если необходимое расширение возможностей нереально, то, как и на шаге 1, определяется наиболее дефицитное ограничение, находятся степень достижения цели $\lambda^* = \lambda_1$, избытки недефицитных ресурсов $\Delta B_2 = B_2^0 - \lambda^* B_2^{\text{ид}}$, ΔB_3 и т. д. Эти избытки или изымаются (и тогда алгоритм закончил работу), или с их учетом пересматривается (в диалоге) целевая установка (и цикл повторяется с шага 1).

б) Оба ограничения 1 и 2 (рис. 4.12 б) сбалансированы и существенны.

Шаг 3. Ресурсы выделяются на оба существенных ограничения так, чтобы условия сбалансированности выполнялись на следующем, более высоком уровне достижения цели λ_3 :

$$\lambda_1 (B_1^0 + \Delta B_1) = \lambda_2 (B_2^0 + \Delta B_2) = \lambda_3 B_3^0$$

(т. е. чтобы оба ограничения одновременно и на одинаковую величину продвигались по траектории к λ_3) и т. д.

Алгоритм завершает работу, когда возникнет несбалансированная ситуация (а) или все дополнительные ресурсы и возможности перераспределения будут исчерпаны. В случае, если будет достигнута цель $x^{\text{ид}}$ ($\lambda = 1$), делается переход на следующий ли-

нейный участок траектории и цикл, начиная с шага 1, повторяется.

Если возможна комплектная поставка ресурсов, алгоритм предельно упрощается (см. § 5.2): максимальное значение λ находится сразу как отношение суммарно выделяемого ресурса B к необходимому для достижения цели $B^{ид}$, т. е. по формуле $\lambda = B/B^{ид}$, где $B = B^0 + \Delta B$, $B^0 = \sum_{p=1}^m \alpha_p B_p^0$ — исходное, ΔB — до-

полнительно выделяемое количество ресурса, $B^{ид} = \sum_{p=1}^m \alpha_p B_p^{ид}$ — запрос общего ресурса в точке идеала. Эта формула естественна: при комплектной поставке все ограничения сбалансированы на одном уровне λ , т. е. ресурсы используются наиболее эффективно, без потерь. Соответственно $x_i^* = \lambda x_i^{ид}$, $B_p^* = \lambda B_p^{ид}$.

Типовым в рассматриваемых процедурах является параметрический расчет при возможных значениях выделяемого ресурса ΔB от 0 до ΔB^{max} . Получается кусочно-линейная зависимость степени достижения цели от ресурса типа «затраты-эффективность», типичный вид которой приведен на рис. 4.13. Здесь участок $(0, \Delta B_1)$ соответствует продвижению вдоль траектории от $\lambda = \lambda_0$ до од-

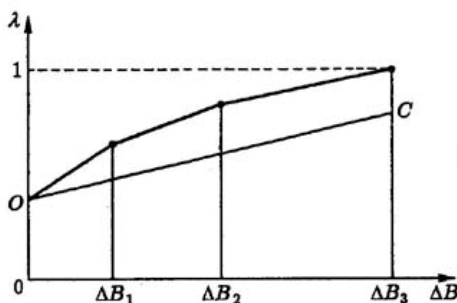


Рис. 4.13

ного первого ограничения до встречи со вторым ограничением; участок $(\Delta B_1, \Delta B_2)$ — продвижению первого и второго ограничений вместе до встречи с третьим; далее (участок $(\Delta B_2, \Delta B_3)$ и дальше) — трех ограничений с точкой идеала. Участок $(0, \Delta B_2)$ соответствует переходному режиму от начальных диспропорций к пропорциональному $(\Delta B_2, \Delta B_3)$ и т. д.) и согласованному развитию смежных отраслей и рациональному использованию выделенных средств. Для сравнения показана зависимость «затраты-

эффективность», получающаяся при использовании сложившейся практики формирования запроса «от достигнутого» (прямая OC), когда ресурс выделяется всем пропорционально их запросу. Видно, что предлагаемый алгоритм обеспечивает ту же степень достижения цели при значительно меньших затратах (например, при увеличении λ до $\lambda = \lambda_2$ затраты снижаются примерно втрое). Этот эффект резко усиливается при использовании возможностей НТП.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда ограничения на ресурсы фиксированы и единственным средством решения проблемы является использование возможностей НТП.

Увеличение степени достижения цели в этом случае происходит за счет изменения удельных расходов ресурсов a_{ip} . Геометрически это соответствует расширению области допустимых решений за счет сдвига границ и их повороту (переход на рис. 4.14 от прямых AC и CD к $A'C'$ и $C'D'$). Это позволяет скользить точке их

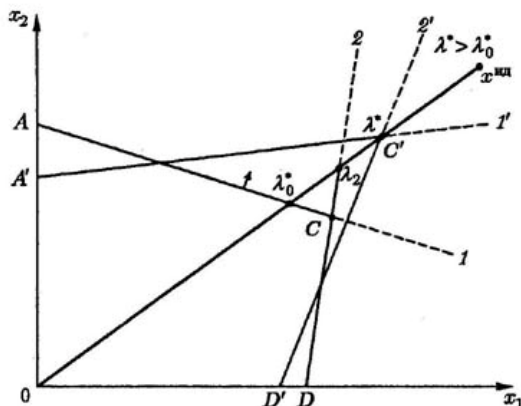


Рис. 4.14

пересечения с траекторией в сторону повышения степени достижения цели (стрелка на рис. 4.14), что и является основной схемой алгоритма целенаправленного использования возможностей НТП.

Пусть эти возможности конкретизируются в соответствии с технологической структурой отрасли следующим образом. Имеется n укрупненных технологий (например, выработка базисной электроэнергии на угле, на газомазуте и т. д. как на третьем уровне (см. рис. 1.15)) в пространстве мощностей x_i , для которых задана траектория. По каждой из укрупненных технологий i имеется

несколько альтернативных технических решений j (конкретных технологий нижнего уровня, например различные типы энергоблоков). Для каждой конкретной технологии ij , в том числе для существующей (замещаемой) j_0 , заданы коэффициенты удельного расхода ресурсов $a_{i1}^j, a_{i2}^j, \dots, a_{ip}^j$.

Требуется выбрать такой набор конкретных технологий (по одной для каждой укрупненной i), чтобы обеспечить максимальную степень достижения цели λ .

В этом случае решение задачи усложняется. Это связано с тем, что, как правило, улучшение какого-либо из показателей технологии (например, снижение расходов топлива) сопровождается ухудшением других (например, ростом капитальных вложений). При фиксированных ограничениях на ресурсы это выражается в том, что снижение степени дефицитности одного ограничения за счет замены старой технологии на новую ведет к увеличению степени дефицитности других ограничений и т. д., что в конечном счете приводит к необходимости перебора возможных наборов (комбинаций) технологий и их оценки по степени достижения цели. Математически эта задача относится к классу комбинаторных экстремальных задач, которые решаются методами сокращенного перебора. Проблема состоит в том, чтобы, используя особенности задачи, сделать перебор целенаправленным, сократив вычисление за счет отсева заведомо неконкурентоспособных вариантов.

В случае прямого перебора для каждого нового набора $\tilde{j}$ технологий достаточно вычислить новое значение потребности каждого ресурса p в точке идеала $x^{ид}$: $\tilde{B}_p^{ид} = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ip} x_i^{ид}$, найти новые сте-

пени дефицитности и определить степень достижения цели $\tilde{\lambda}$. Затем сравнить наборы по $\tilde{\lambda}^*$ и выбрать тот, который обеспечивает максимальное значение λ^* .

Однако предпочтительнее вариант пошагового алгоритма, сокращающий количество вычислений для каждого набора технологий за счет использования следующих особенностей задачи (см. свойства в § 5.2) на каждом шаге.

Во-первых, на каждом шаге улучшения степени достижения цели желательно рассматривать сначала существенные ограничения. Если устранение этих «узких мест» (увеличение λ_p за счет нового набора технологий) невозможно, то бессмысленно рассматривать другие ограничения: λ все равно не улучшится, и можно сразу отбросить данный набор. Кроме того, в рамках существенных ограничений можно выделить ограничение, являю-

шееся «сдерживающим фактором» по улучшению λ за счет изменения коэффициентов a_{pi} . Это будет наименее чувствительное по λ к изменению a_{ip} ограничение. Оказывается (см. § 5.2), что оно выделяется по максимальному значению запроса $B_p^{ид}$ ресурса в точке идеала. Отметим, что выделение существенных ограничений (и среди них — сдерживающего) не требует новых данных, поскольку используются известные при нахождении λ значения $\lambda_p = B_p/B_p^{ид}$ и $B_p^{ид}$.

Во-вторых, оказывается, что при переходе к новому набору технологий $\tilde{I}$ новое значение степени дефицитности $\tilde{\lambda}^*$ ограничения может быть вычислено в любой точке траектории через запросы ресурсов только в точке идеала по формуле

$$\tilde{\lambda}_p = \lambda_p^0 \frac{B_p^{0,ид}}{\tilde{B}_p^{ид}}, \quad (4.16)$$

где λ_p^0 — исходное значение степени дефицитности, $B_p^{0,ид}$ — исходный, а $\tilde{B}_p^{ид}$ — с учетом новой технологии запрос ресурса типа p в точке идеала $x^{ид}$. Тогда очевидно, что степень достижения цели $\tilde{\lambda}_p$ может возрасти по сравнению с λ_p^0 только в случае, если при переходе к новому набору технологий запрос ресурсов уменьшится, т. е. $\tilde{B}_p^{ид} < B_p^0$. Отсюда и из выражения $B_p^{ид} = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ip} x_i^{ид}$ следует, что бессмысленно рассматривать технологии, которые ни по одному показателю не выигрывают у исходной (т. е. $\tilde{a}_{ip} \leq a_{ip}^0$). Это дает возможность отсеять все не удовлетворяющие этому требованию (не эффективные, не оптимальные по Парето) технологии сразу, до расчетов.

При решении практических задач на этапе выделения эффективных технологий отсеивается, как правило, около их половины. Специфические условия, типичные для реальных задач (коэффициенты каждой новой технологии улучшаются, за редким исключением, лишь на 5–10 %, их число порядка 10 и более, т. е. вклад каждой отдельной технологии сравнительно невелик), приводят к тому, что ухудшение несущественных ограничений бывает незначительным и включение новых (обычно трех-четырех технологий) происходит на первых циклах, а остальные, как правило, служат для проверки того, что лучшей комбинации технологий нет. Кроме того, обычно есть информация по результатам решения задачи на начальных этапах, в частности о ранжировании наборов технологий по значению (4.16). Поскольку траектория от расчета к

расчету меняется мало (исходное состояние фиксировано), то это ранжирование наборов используется при расчете с целью получения основного увеличения степени достижения цели на первых циклах алгоритма (см. Приложение).

Алгоритм существенно упрощается в другом крайнем случае, т. е. когда возможны комплектные поставки ресурсов. В этом случае выбор оптимального набора конкретных технологий, максимизирующего степень достижения цели, производится по следующему правилу приоритетов (алгоритм 4).

Алгоритм 4.

Шаг 1. В каждой группе i конкурирующих технологий выделяются эффективные.

Шаг 2. Для каждой эффективной технологии вычисляется запрос общего ресурса, необходимый для увеличения общей мощности на единицу $B_{ij} = \sum_{p=1}^m \alpha_p a_{ip}^j$ и из каждой группы i выбирается технология с минимальным значением приоритета B_{ij}^* .

Шаг 3. Для этого набора определяется суммарный запрос $B_j^{*нл} = \sum_{i=1}^n B_{ij}^* x_i^{*нл}$ общего ресурса, необходимого для достижения цели: и степень достижения цели $\lambda^* = B^n / B^{*нл}$, где B^n — наличное количество общего ресурса.

По аналогичным схемам строятся алгоритмы (см. § 5.2) в случае, когда рассматриваются только укрупненные технологии. Они являются комбинациями конкретных технологий с различными долями их использования и описываются областью возможных значений средних удельных показателей. Эта область определяется всеми возможными комбинациями долей внедрения конкретных технологий.

Как правило, чаще всего возникает смешанная задача перераспределения ресурсов и использования НТП.

В § 5.2 рассмотрен ряд других ситуаций (в том числе с учетом динамики) и показана возможность без потери оптимальности комбинировать алгоритмы в любом порядке.

В частности, при упорядочении дескриптивной процедуры необходимо учитывать, что на практике при наличии «узких мест», как правило, анализируются и используются все средства, позволяющие локально решить проблему. Сначала используются внутренние ресурсы отрасли — это мероприятия по НТП (и аналогично анализируемые организационные), затем учитываются возможности перераспределения выделенных ресурсов между огра-

ничениями (как правило, уже в рамках комплекса отраслей) и, наконец, запрос на дополнительно выделяемые народным хозяйством ресурсы и их распределение.

Алгоритмы практически использовались при формировании комплексной программы научно-технического прогресса в энергетике — в основном на этапе комплексной оценки, а также на этапе управления при оценке мероприятий по устранению отклонения от плановых показателей (для выхода на траекторию пятилетнего плана). Расчеты показывают, что при сохранении установленных траекторией пропорций развития, за счет НТП и перераспределения средств степень достижения цели λ (например, означающая уровень выработки энергии) может быть увеличена при тех же суммарных средствах на 15–30 %, а при заданной выработке продукции затраты снижены на 10–20 %.

В системе поддержки решений процедура используется как основа для сопоставления мероприятий по их влиянию на степень достижения конечной цели, выделения «узких мест», целенаправленного изменения ограничений на показатели и регламентации процедур согласования решения реальных задач.

4.4. Календарное планирование комплексов работ

4.4.1. Постановка задачи. Пусть задан перечень работ $I = \{I\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, например, проектов строительства энергоблоков. Каждую из работ характеризуют три группы показателей:

результаты $Y_i = \{Y_k\}$, $k = 1, 2, \dots, K$. Например, $Y_1\{t\}$ — мощность энергоблока i по производству электроэнергии, $Y_2(t)$ — по производству теплоты, $Y_3(t)$ — удельный расход топлива и т. д., $Y_k(t) = 0$ при $t < t_i^0$, где t_i^0 — момент окончания работы i ;

продолжительность работы τ_i ;

необходимые для выполнения работы ресурсы $u_i(t) = \{u_i^p(t)\}$, где $u_i^p(t)$ — интенсивность потребления ресурсов типа p работой i в интервале времени t , $u_i^p(t) = 0$ при $t_i^H < t < t_i^0$, где t_i^H , t_i^0 — сроки начала и окончания работы i .

Кроме того, заданы технологические ограничения на порядок выполнения работ $\{r_{i_1 i_2}\}$, $i_1, i_2 \in I$, например:

работа i_2 не может быть начата, пока не окончена работа i_1 ;

работа i_2 может быть начата после выполнения работы i_1 на 80 % и т. п.

Требуется решить следующие типовые задачи.

Задача 1. Пусть заданы исходная нормативная потребность в ресурсах $u_i^0(t)$, время начала t_i^H и время окончания t_i^0 i -й работы.

Найти: новое время окончания работы $\bar{t}_i^0$ при новом заданном уровне потребления ресурсов $\tilde{u}_i(t)$; новую потребность в ресурсах $\tilde{U}_i(t)$ при изменении срока окончания t_i^0 на $\bar{t}_i^0$.

Задача 2 (анализ комплекса работ по времени). Пусть задан комплекс работ $G(I, R)$, где $I = \{i\}$ — множество работ, R — ограничения на порядок выполнения работ (например, технологические связи между работами). Известны продолжительности работ $\{\tau_i\}$, $i \in I$, и срок начала выполнения комплекса T^n . Требуется найти «левосдвинутый» календарный план (расписание) работ, т. е. минимально возможные (ранние) времена начала $\{t_i^{p,n}\}$ и окончания $\{t_i^{p,o}\}$ всего комплекса работ, продолжительность выполнения τ и срок завершения T^o всего комплекса работ $T^o = \max \{t_i^{p,o}\}$.

Если задан директивный срок T^{dnp} окончания комплекса работ, то требуется найти «правосдвинутый» календарный план, т. е. моменты раннего (максимально возможного) начала $\{t_i^{n,n}\}$ и окончания $\{t_i^{n,o}\}$ работ и поздний срок начала комплекса работ $t^{n,n}$.

Кроме того, может потребоваться определение:

резервов времени работ $\rho_i = t_i^{p,o} - t_i^{p,n} = t_i^{n,o} - t_i^{n,n}$ (время на которое можно задержать завершение i -й работы, не срывая директивного срока);

критических путей, т. е. цепочек работ $I_{кр}$, определяющих продолжительность выполнения комплекса и не имеющих резервов времени ($\rho_i^{кр} = 0$ для $i \in I$).

Задача 3 (анализ комплекса работ по ресурсам). Пусть заданы перечень работ $I = \{i\}$, моменты начала t_i^n и окончания t_i^o каждой работы, интенсивность потребления ресурсов $u_i(t) = \{u_i^p(t) \mid h \in P\}$ на каждой работе. Требуется определить суммарную потребность $u(t)$ в ресурсах типа $p \in P$, для всего комплекса работ:

$$u(t) = \sum_{i \in I} u_i(t), \quad u_i(t) \neq 0 \text{ при } t_i^n \leq t \leq t_i^o.$$

Если известны ограничения на ресурсы $u^0(t)$, то требуется определить степень дефицитности $D^p(t)$:

$$D^p(t) = \frac{u^p(t)}{u^{p0}(t)}.$$

Задача 4 (формирование (синтез) календарного плана при ограничениях на ресурсы). Пусть задан комплекс работ $G(I, R)$, $I = \{i\}$, $R = \{r_{ij}\}$, где I — множество работ, R — множество

ограничений на порядок выполнения работ. Известны продолжительности работ $\{\tau_i\}$ и исходная (например, нормативная) потребность каждой работы в ресурсах $u_i(t) = \{u_i^p(t)\}$. Задано ограничение $U^0(t)$ на суммарные ресурсы, выделяемые на комплекс работ в целом. Требуется сформировать допустимый календарный план работ: найти моменты начала $\{t_i^n\}$ и окончания $\{t_i^o\}$ работ; срок T^o завершения комплекса работ в целом; потребность в ресурсах $u_i^p(t) = \sum u_i^p(t) \leq U^{op}(t)$, $p \in P$; динамику изменения показателей, характеризующих результаты (вводы мощностей, производство продукции и т. п.).

Возможны разные модификации задачи, различающиеся условиями выполнения работ (возможности перерывов в работах, изменения их продолжительности и др.).

Рассмотрим сначала один объект (стройку) и перечислим основные допущения о связях между его показателями, сформировавшиеся при наблюдении за работой плановиков и положенные затем в основу диалоговой системы решения задач 1, 2.

4.4.2. Связь сроков с уровнем выделяемого ресурса. Пусть для выполнения i -й работы заданного, например, в человеко-сменах или в миллионах рублей СМР объема W_i выделены ресурсы типа мощностей в количестве u_i (численность или объем СМР, осваиваемый в год и характеризующий мощность строительной организации). Тогда продолжительность T_i работы i определяется по формуле

$$T_i = W_i / u_i. \quad (4.17)$$

Геометрически (рис. 4.15 а) уровню выделяемого ресурса u_i соответствует ордината, а объему работ $W_i = u_i T_i$ площадь прямоугольника, образованного величинами T_i и u_i . На рис. 4.15 а показаны два значения (T_1 и T_2) продолжительности работы, соответствующие двум уровням u_0 и u_1 выделяемого ресурса при неизменном объеме W . Если, например, количество фактически выделенного ресурса u_1 (штриховая линия на рис. 4.15 а) меньше планового u_0 , то это приводит к невыполнению в плановый срок T^1 части объема ΔW работ и перенесению его на следующий интервал времени. Его выполнение за дополнительное время ΔT_i приводит к задержке общего срока на

$$\Delta T_i = \Delta W_i / u_i. \quad (4.18)$$

Пусть были запланированы два этапа выполнения работ (на рис. 4.15 б это интервалы $[t_0, t_1]$, $[t_1, t_2]$ и уровни использования ресурсов u_1 и u_2). Пусть фактически на первом этапе был выделен

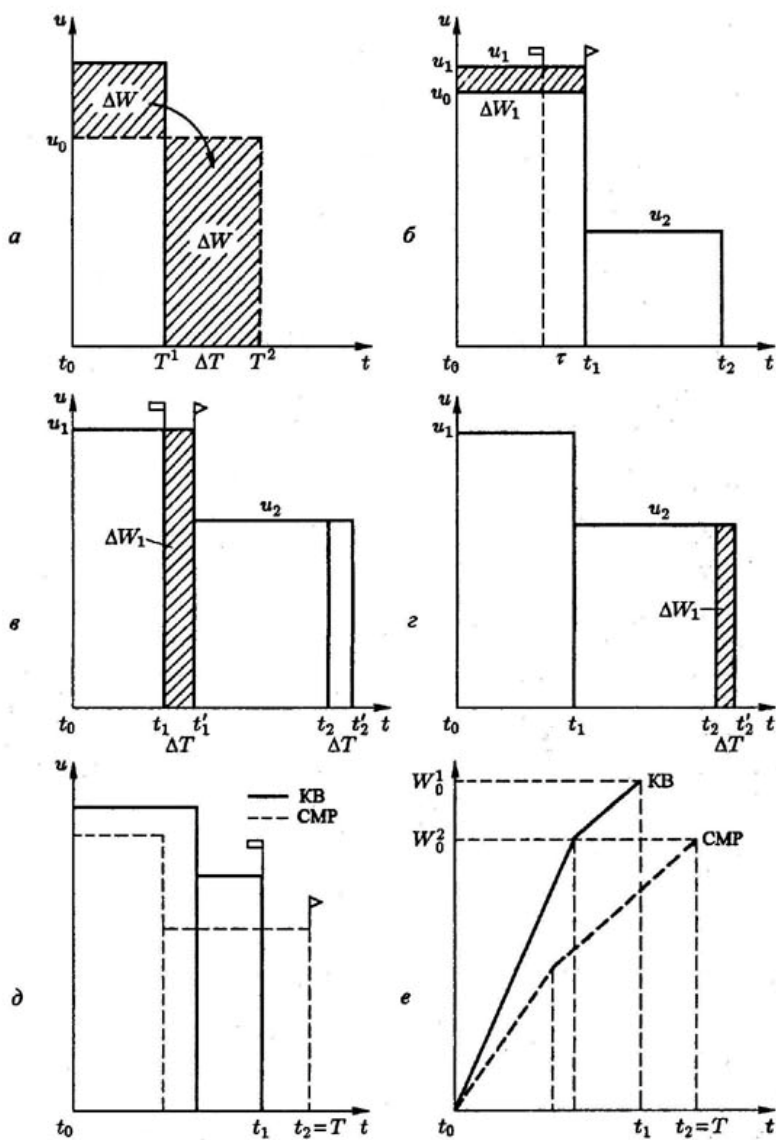


Рис. 4.15

ресурс u_0 и невыполнен объем работ ΔW_1 . Рассматриваются два варианта перенесения этого объема во второй интервал и его выполнения. Первый соответствует (рис. 4.15 в) случаю, когда работы двух этапов различны и ресурсы на них взаимно не

заменяются, что типично для различных этапов жизненного цикла. Тогда во втором интервале сначала теми же ресурсами и с той же интенсивностью u_1 выполняется невыполненный объем ΔW_1 (заштрихован на рис. 4.15 в), а затем рассматривается объем работ второго интервала. В этом случае задержка во времени составляет $\Delta T = \Delta W_1 / u_1$.

Второй вариант соответствует случаю, когда работы на разных этапах однородны и ресурсы взаимозаменяемы, что типично при разбиении общего объема работ одного этапа по интервалам времени (годам). Тогда объем работ ΔW_1 , невыполненных в первом интервале, добавляется (рис. 4.15 в) к объему работ следующего интервала времени и задержка во времени ΔT будет иной. В частности, если в этом интервале остается прежняя интенсивность ресурсов u_2 , то получим $\Delta T = \Delta W_1 / u_2$.

4.4.3. Связь различных типов ресурсов и сроков. Пусть работа i выполняется несколькими типами ресурсов $p = 1, 2, \dots, m$ (на рис. 4.15 в это капиталовложения и СМР) и общий плановый (проектный) объем работ W_p по каждому типу ресурсов p известен и не зависит от варианта календарного плана. Тогда условием выполнения полного комплекса работ по стройке (программе или ее этапу) является полное выполнение работ по всем видам ресурсов. Это означает, что срок завершения работы определяется наибольшим из сроков выполнения соответствующих объемов работ W_p по каждому типу ресурсов p :

$$T_p = \max_{1 \leq p \leq m} (T), \quad (4.19)$$

где T_p для одного этапа определяется по формуле (4.17). В случае нескольких интервалов времени t по каждому виду ресурсов вычисляется частичная сумма объемов по интервалам времени нарастающим итогом (рис. 4.15 в) и срок определяется достижением планового объема (на рис. 4.15 в это точка пересечения с горизонтальной линией уровня: для КВ — в момент t_1 , для СМР — в момент t_2 , общее время T равно большему, т. е. $T = t_2$).

Дополнительно может учитываться (по желанию пользователя) условие комплектности ресурсов (например, при растяжении работы доли использования ресурсов разных видов сохраняются).

4.4.4. Связь сроков поставок и вводов мощностей с ресурсами. Сроки поставок и вводов мощностей по очередям определяются точно так же, как срок выполнения работы в предыдущем пункте. Новый срок ввода мощности при изменении календарного плана определяется, как и в предыдущем пункте, сроком освоения этого объема (на рис. 4.15 δ ввод мощности условно помечен флажком). Аналогично определяется и срок поставки.

Другой вариант корректировки срока поставки (для оборудования) — сохранение проектного срока опережения поставки по отношению к сроку ввода мощности (на рис. 4.15 δ поставка помечена прямоугольником). Вариант расчета выбирается пользователем (второй вариант соответствует сохранению нормативного срока монтажа оборудования, а первый точнее учитывает сложившуюся на стройке ситуацию, связанную, например, с увеличением продолжительности монтажа из-за нехватки монтажников и т. п.).

4.4.5. Связь планов производства и сроков ввода. Календарный план производства продукции (электроэнергии), расхода материалов и ресурсов (топлива и т. д.) в процессе эксплуатации определяется: введенными (установленными) мощностями x_{it} ; коэффициентом их освоения α_{ip} (имеются соответствующие нормативы освоения по типам оборудования, данные о разрывах мощностей и т. д.); числом часов h_i работы электростанции (определяется ее участием в покрытии переменного графика нагрузки, условиями топливоснабжения и др.); удельными расходами ресурсов a_{ip} (топлива, численности и т. д.). При этих известных показателях выработка энергии E_{it} станцией I в году определяется прямым расчетом: $E_{it} = h_{it} \alpha_{it} x_{it}^y$; аналогично вычисляется расход топлива: $B_{it} = a_{i1} E_{it}$, и т. д.

Эти связи определяют достаточно простой дескриптивный алгоритм корректировки объемно-календарного плана отдельного объекта (стройки) при изменении выделяемых ресурсов и сроков выполнения работ по следующей схеме последовательного просмотра интервалов времени.

Алгоритм 1

Предварительный шаг. Задается проектный (плано-⁰вый) вариант стройки, включающий данные по годам об уровнях u_{ip}^0 выделяемых ресурсов каждого вида p в диапазоне их минимально и максимально возможных значений $[u_{ip}^{t\min}, u_{ip}^{t\max}]$, сроки и объемы ввода мощностей и поставок, удельные показатели, коэффициенты освоения мощностей и др.

Вычисляются (или задаются) объемы пусковых комплексов работ, необходимых для ввода заданной мощности, для поставки оборудования, объемы взаимно заменяемых работ и т. д.

Задаются новые значения u_{ip}^t , выделяемых ресурсов, определяется перечень рассматриваемых интервалов времени, выбирается вариант связи этапов и учета поставок (например, первый).

Шаг 1. Рассматривается первый интервал времени $[t_0, t_1]$. По каждому типу ресурсов определяется невыполненный объем работ ΔW_{ip}^t . Он переносится в следующий интервал. Если работы следующего интервала относятся к другому этапу (со взаимно не заменяемыми ресурсами), то вычисляется задержка времени ΔT_p (4.18) и общее время задержки ΔT (4.19). В противном случае объем ΔW_{ip}^t переносится в следующий интервал.

Шаг 2. Рассматривается второй интервал времени $[t_1, t_2]$ с измененным в результате шага 1 объемом работ или со сдвинутым на ΔT началом второго этапа; в последнем случае рассматривается новый интервал $[t_1, t_2]$ и шаг 1 повторяется, пока не будут просмотрены все интервалы времени до $t^{\max}$.

Шаг 3. Вычисляются нарастающим итогом объемы работ и по заданным их значениям определяются новые сроки поставок, вводов мощностей и окончания работ.

Те же формулы (4.17), (4.18) используются в случае перевыполненных объемов работ и для решения обратной задачи: по заданному сроку T_i (или его изменению ΔT_i) найти уровень ресурса ΔU или объем. В том случае, когда интервалов времени или этапов несколько, указывается коэффициент растяжения отдельных интервалов (например, связанных с наибольшим дефицитом ресурса) или, по умолчанию, их коэффициенты растяжения считаются одинаковыми. Аналогично срокам вводов пересчитываются желаемые изменения в конечном продукте — выработке энергии E_i , установленные мощности. Таким образом, пользователь может работать в категориях конечных показателей плана производства продукции или желаемых сроков ввода мощностей.

При решении задач управления пользователем на основе данных план-факта на год t^0 , исходя из содержательных представлений о причинах отклонений от плана части показателей и возможностях их устранения на данной конкретной стройке, указывается год t^* выхода на плановые их значения для трех вариантов (в случае срыва в году t^0).

1. Задается год t^* , к которому мощность строительной организации (по освоению КВ или СМР в год) выходит на плановую

u_t^0 , и в расчете предполагается, что в промежуточные годы мощности наращиваются равномерно (линейно). В этом случае плановый объем до конца пятилетки не будет выполнен, и это семейство вариантов с параметром t^* можно назвать пессимистическим (с нарастанием отставания общих объемов от плановых).

2. Мощность строительной организации выходит на плановую для всех лет, начиная со следующего за t^0 (срыв в году t^0 был случайным), а невыполненный объем работ доделывается в следующей пятилетке (средний вариант — без нарастания отставания объемов от плана).

3. Задается год t^* , к которому строительство выходит на плановый объем (нарастающим итогом) освоения ресурсов, установленных мощностей или выработки продукции, и принимается, что в промежуточные годы объемы нарастают равномерно (линейно). Это соответствует семейству оптимистических вариантов (пятилетний план выполняется и, возможно, перевыполняется).

Аналогично формулируются варианты для случая перевыполнения плана. Цикл диалога строится по следующей схеме. Сначала пользователь указывает вариант (или несколько) по перечисленным типам — пессимистический, средний, оптимистический; затем внутри варианта — параметр t^* (если он не указывается, то, по умолчанию, t^* выбирается крайним на последний год пятилетки). Далее он получает на экране полные данные (включая поставки, вводы мощностей, план производства и т. д. по годам), анализирует их и корректирует их любые показатели. Производится (ЭВМ) новый расчет и цикл повторяется.

Соответствующая диалоговая система автономно реализована персональной ЭВМ IBM PC. Время счета растет линейно от числа учитываемых показателей и интервалов времени. Для полного расчета по трем-пяти вариантам для одной станции требуется 5–10 с, время цикла диалога составляет 1–2 мин. Используется при формировании и анализе вариантов строительства электростанций. Входит как имитатор процессов строительства и разработки НТ программ в систему сопровождения процедур и как составная часть в оптимизационную и имитационную модели для решения задачи 2.

4.4.6. Формирование объемно-календарного плана для нескольких объектов. Рассмотрим алгоритмы решения этой задачи в ситуации, когда эксплуатационные и удельные характеристики фиксированы, а остальные производственные показатели являются функцией сроков T_i завершения работ (чем меньше сроки ввода мощно-

стей, тем лучше производственные показатели). Первый алгоритм основан на минимизации дефицита энергии с учетом коэффициента чувствительности.

Идея второго алгоритма основана на использовании понятия траектории Γ_T предпочтительных решений в пространстве сроков T_i окончания разработок. Соответственно общие приемы работы с ней аналогичны рассмотренным, однако с учетом специфики рассматриваемой динамической задачи 2 удобна несколько иная интерпретация целевой установки. Исходя из общих свойств траектории, распределение ресурсов должно осуществляться так, чтобы получающиеся сроки выполнения T_i соответствовали этой траектории и минимизировались. Полное построение траектории затруднено, поэтому используется ее кусочно-линейное приближение по ряду точек. В простейшем случае определяются две точки: $T_i^{\min}$, $T_i^{\max}$. Для каждой строки i устанавливаются желаемые значения («на отлично», директивные сроки минимальные $T_i^{\min}$), допустимые («на удовлетворительно», максимальные $T_i^{\max}$) и рассматривается линейное приближение траектории в пространстве отклонений $\Delta T_i = T_i - T_i^{\max}$ сроков от их желаемых минимальных значений. Точкой идеала является начало координат. Поскольку за исходное значение $T_i^{\min}$ берутся предельно достижимые или необходимые сроки, то удобнее не максимизировать степень достижения цели, а минимизировать степень α отклонения от нее.

Учет этого условия совместно с ограничением на суммарно выделяемые ресурсы B

$$\sum u_p^t \leq B_{pt} \quad (4.20)$$

приводит к системе линейных уравнений, из которых получаются простые формулы, дающие для каждого интервала явное решение задачи распределения ресурсов u_{ip}^t между n строками $i = 1, \dots, n$ и задержки сроков Δt_{ip}^t :

$$u_{ip}^t = \gamma_i u_{ip}^{0,t}, \quad (4.21)$$

$$\Delta t_{ip}^t = \bar{\lambda} \Delta T_i^{\max}. \quad (4.22)$$

Здесь $\gamma_i = 1 - B_{p,t+1} \Delta t_{ip}^t / \left(\Delta t \sum_{i=0}^n u_{ip}^{0,t} \right)$, $\bar{\lambda}$ — степень отклонения от цели ($0 \leq \bar{\lambda} \leq 1$) вдоль траектории, $u_{ip}^{0,t}$ — начальное значение (запрос) уровня потребления ресурса, Δt — продолжительность интервала t .

Коэффициент «урезания» запроса ресурсов γ_i является величиной, обратной относительному удлинению планового интервала Δt из-за отклонения от планового уровня потребления ресурсов. Это дает возможность построить следующий дескриптивный алгоритм решения задачи 2.

Алгоритм 2

Предварительный шаг. Формируются исходные данные по каждой стройке (см. алгоритм 1), задаются общие ограничения B_{pt}^0 на ресурсы по годам t , задается целевая установка в форме набора желаемых сроков $T_i^{\min}$ завершения каждой разработки $I = 1, 2, \dots, n$, предельно допустимых их задержек $\Delta T_i^{\max}$ и линейного участка траектории в пространстве задержек сроков ΔT с критерием минимизации продвижения вдоль нее от ΔT^0 к $\Delta T^{\max}$. Вычисляются доли (пропорции) α_i изменения сроков по траектории Γ_T .

Шаг 1. Рассматривается первый интервал времени $[t_1, t_2]$ и индекс $t_1 = t_1$ (далее опускается). По каждому типу ресурсов p (КВ, СМР) распределяются суммарные исходные запросы $\tilde{B}_{pt}^0 = \sum_{i=1}^n u_{ip}^{0,t}$ ресурсов, дефицит ΔB_p^0 и объем ΔW_p невыполненных в данном интервале работ, переходящих в следующий интервал:

$$\Delta W_p^t = \Delta B_{pt}^0 \Delta t; \quad \Delta B_{pt}^0 = \tilde{B}_{pt}^0 - B_{pt}^0.$$

Затем вычисляется отношение интенсивностей потребления суммарных ресурсов в этих периодах: $\delta_{p,t+2} = \tilde{B}_{pt}^0 / B_{pt}^0$, увеличение объема работ $W_p^{\max}$ в случае, если они будут продолжаться до $\Delta T_i^{\max}$, с интенсивностью u_{ip}^t : $\Delta W_p^{\max} = \sum u_{ip}^t \Delta T_i^{\max}$. Находится степень отклонения от цели $\lambda = \delta_{pt} \Delta W_p^t / W_p^{t,\max}$. Далее по формулам (4.21) и (4.22) находятся выделяемые ресурсы u_{ip}^t и задержка сроков Δt .

Шаг 2. Корректируется объем работ (с учетом невыполненного в предыдущем), выполняемых во втором интервале $W_1 = W_0 + \Delta W_1$, и повторяются все операции шага 1, делается переход к шагу 3 и т. д., пока не будут последовательно рассмотрены все K интервалов времени.

Заключительный шаг по каждой стройке (анализируются объемы). На начальном этапе исходный вариант значений объемно-календарных показателей ($u_{ip}^{0,t}$ и др.) каждой стройки (программы), а также календарный план на заключительном этапе

формирования расписания выполнения программы работ целесообразно получать с использованием модели комплекса операций (обычно сетевой). Имеется обширная (более 1000 публикаций) литература по этим моделям и алгоритмам. Здесь лишь отметим, что сетевые модели удобны для учета жестких технологических ограничений на порядок выполнения работ (типа «стены можно возводить только после завершения фундамента») и для получения и оценки предельно технологически допустимого плана с минимальным сроком окончания работ. Этот срок совпадает с продолжительностью работ $T_{кр}$ критического пути, т. е. таких работ, увеличение срока окончания хотя бы одной из которых неизбежно приводит к такому же срыву минимального срока завершения комплекса в целом. Это важная информация: во-первых, нереально назначать директивный срок меньше $T_{кр}$; во-вторых, выделяется небольшая часть (обычно 10–15 %) напряженных критических работ, с которыми связаны основные проблемы своевременной реализации программы. Именно эти работы и события и должны представляться на вышестоящий уровень руководства. Расчет резервов работ (для сетей типа «дерево») дает их приоритеты с точки зрения минимизации времени T выполнения комплекса в целом.

Получающийся календарный план работ i, j позволяет определить потребность в ресурсах u_{it}^0 и другие показатели по комплексу работ в целом. Эти данные могут служить исходными для решения задачи 2 в исследовательской процедуре.

Однако обычно это бывает вариант с очень неравномерным потреблением ресурсов. Поэтому для практических процедур целесообразно использовать другой, более разумно построенный вариант, учитывающий ориентировочно выделяемые ресурсы B^0 , точность строительства и т. д. Такой проектный (нормативный) вариант по продолжительности обычно имеет сроки ввода мощностей, равные (или несколько большие).

Имеются различные классы алгоритмов решения задач формирования календарного плана работ с учетом технологических ограничений на порядок их выполнения и при ограниченных ресурсах. Это в основном эвристические алгоритмы, например имитирующие реальный ход реализации комплекса работ. Соответствующая дескриптивная процедура имеет следующую типичную схему последовательной разборки сети.

Алгоритм 3

Предварительный шаг. Строится сетевая модель комплекса, учитывающая технологические ограничения на порядок выполнения работ (технологическая сеть), задаются характери-

стики каждой работы (продолжительность, необходимые ресурсы), вычисляются приоритеты каждой работы.

Общий шаг. Выделяется фронт работ, которые могут выполняться в данный момент времени по технологическим ограничениям. Работы фронта упорядочиваются по приоритетам, и ресурсы выделяются в первую очередь на приоритетные. Соответствующие работы ставятся на выполнение (в перечень начатых) и удаляются из технологической сети. Определяется очередной момент времени (окончание начатой работы, поступление дополнительных ресурсов и т. д.) и снова выполняется общий шаг, пока не будут «выполнены» все работы комплекса.

Анализ показывает, что сетевые модели основных работ НТ программ или строек близки к сетям типа «дерево», напоминающим технологические ограничения линии сборки: сначала выполняются работы по отдельным узлам, далее — по подсистемам и системе в целом и т. д. В этом случае решение, достаточно близкое к оптимальному (по времени), дает использование в качестве приоритета длины критического пути, оставшегося до конца выполнения комплекса (или, что то же самое, позднего времени начала работ или ее резерва).

В заключение отметим, что в целом необходимо решение комплекса задач и использование комплекса моделей трех типов: объемного планирования (определение объемов продукции, вводов мощностей и т. д. на конец планового периода); объемно-календарного планирования (определение объемов затрат ресурсов и получения продукции по укрупненным комплексам работ по годам); календарного планирования (определение сроков выполнения отдельных работ и определение потребности в ресурсах и сроков по комплексам работ).

Для решения сводных задач согласования программ и т. д. достаточно использования описанных выше укрупненных объемно-календарных моделей программ. Более детальные модели и задачи должны рассматриваться автономно головными разработчиками и служить источником информации для более точных укрупненных моделей и программ (запросы ресурсов, их максимально и минимально возможные по технологии работ уровни и т. д.). Объяснение этого расхождения и уточнение условий применимости укрупненной модели (на качественном уровне) следуют из известной оценки срока T выполнения комплекса работ: $T \leq \max(T_{\text{техн}}, T_{\text{рес}})$, где $T_{\text{техн}}$ — предельно технологически достижимая минимальная оценка срока, совпадающая с длиной критического пути $T_{\text{кр}}$, т. е. самой длинной технологической цепочки работ, получае-

мая из расчета технологической сетевой модели; $T_{\text{рес}}$ — предельно ресурсно достижимая оценка срока при условии выполнения полного объема работ W при полном (без простоев) использовании выделенных ресурсов, получаемая по формуле $T_{\text{рес}} = W/B$, совпадающей с формулой (4.17).

При неограниченных ресурсах, т. е. при отсутствии их дефицита по сравнению с запросом B_{max} по расчету технологической цепи, срок T определяется величиной $T_{\text{техн}} = T_{\text{кр}}$. При небольшом дефиците выделенных ресурсов получаемая в результате решения задачи календарного планирования эпюра использования ресурса характеризуется еще значительной неравномерностью и значительную роль играет оценка критического пути. Поэтому расчеты по первой оценке и алгоритмам 1, 2, соответствующие полному использованию выделенного ресурса с учетом u_{min} , u_{max} на начальных и конечных этапах, еще излишне оптимистичны и неточны.

При большой дефицитности ресурса (уровень B^2) эпюра использования ресурса сглаживается, ресурсная оценка срока становится больше технологической; не учитываемые в укрупненной модели простои ресурсов практически исчезают и ресурсная оценка (4.17), а с ней и алгоритмы 1, 2 становятся достаточно точными.

Это и определяет условия малых погрешностей алгоритмов 1, 2: степень дефицитности ресурсов, при которой ресурсная оценка начинает превосходить технологическую ($T_{\text{рес}} \geq T_{\text{техн}}$), неравномерность (провалы эпюры) потребления ресурсов (кроме начальных и заключительных этапов) и их простои становятся незначительными. На практике в качестве исходного варианта эпюры с минимальным временем обычно используется не технологически предельно допустимый, а вариант, учитывающий условия рационального использования ресурсов, поточную организацию работ и т. д. Такой вариант обычно имеет минимальные простои ресурсов, и при понижении уровня выделенных ресурсов оценка срока для него близка к ресурсно достижимой. Это создает условие для малой погрешности алгоритмов 1, 2 по срокам (хотя, безусловно, полезно иметь и оценку $T_{\text{кр}}$). Кроме того, при решении задач распределения ресурсов происходит снижение погрешности, так как для принятия решений не важны значения показателей $T_i(B_i)$, а их относительные значения, используемые в алгоритме формирования решения. Тогда для получения точного решения достаточно сохранить эти относительные значения, которые мало меняются в случае, если все значительно снижает требования к точности

$T_i(B_i)$. По-видимому, эти обстоятельства в значительной мере объясняют широкое распространение описанных упрощенных алгоритмов в практике планирования.

Отметим еще, что такая погрешность в рамках описанных процедур согласования объемных (статических) и объемно-календарных (динамических) задач влияет только на точность начального варианта распределения ресурсов между разработками (программами), уточняющегося затем итерационно в диалоге. По конечному же результату (вводы мощностей и выработка продукции) решение получается с точностью, определяемой моделью производства (объемной). В случае взаимодействия оптимизационных моделей (4.7) процедура сходится, как правило, за пять-семь итераций. В случае, если в объемных показателях известна траектория и связь с программами работ осуществляется через переход к траектории в категориях сроков, то оптимальное (по траектории) решение получается за одну итерацию (проход назад от производственных целей на конец планового периода к средствам-программам и проход вперед от существующей ситуации с учетом ограниченных ресурсов, уточнением сроков и целевых показателей на конец периода).

4.5. Многокритериальная оценка и оптимизация

В последние годы методам многокритериальной оптимизации посвящена обширная литература. Современный этап разработки и применения математических методов решения прикладных многокритериальных задач характеризуется разработкой комплексных средств решения практических задач в интерактивном режиме, ориентированных на массового пользователя, не имеющего специальной математической подготовки. Перечислим кратко некоторые из основных классов задач многокритериального анализа, возникающих в практических процедурах.

1. Задача индивидуального выбора («сосредоточенная» задача) с одним лицом, принимающим решения (ЛПР), и при полностью известных исходных данных, сосредоточенных в руках ЛПР. Этой классической задаче посвящено подавляющее число публикаций.

2. Двухуровневая задача выбора (к которой сводятся многие многоуровневые постановки), где часть исходных данных и результаты выбора ЛПР должно уточнять со своими подчиненными и экспертами. Этой задаче посвящены десятки (несколько процентов) публикаций, причем результаты далеки от выдачи конструктивных рекомендаций для решения реальных проблем.

3. Задача целенаправленного формирования допустимых решений.

а) При фиксированных ограничениях. Для этой задачи характерна следующая ситуация. Цели и требования формируются ЛПР в категориях выходных показателей (критериев). В этих же категориях производится выбор наиболее предпочтительного решения и обоснование его перед вышестоящими инстанциями. Связи и ограничения, определяющие множество допустимых решений, находятся вне сферы компетенции ЛПР, а входят в компетенцию технологов и др. и на уровне ЛПР в явном виде априорно неизвестны. Формирование допустимых вариантов решения сложных задач типа проектирования крупных технических систем, отраслевого планирования и т. д. является далеко не простой задачей и в практических процедурах занимает основную часть времени и усилий. Этой задаче посвящены лишь отдельные работы, в основном эвристического плана.

б) При варьируемой структуре ограничений (задачи системной оптимизации). В случае, если возможности (ограничения и набор мероприятий) не соответствуют потребностям (целям), то ЛПР в определенной мере может целенаправленно вносить структурные изменения как в сам объект управления, так и в его связи с внешней средой (выделение дополнительных объемов некоторых дефицитных ресурсов, снижение их удельных расходов, использование новых технологий и т. д.). Возникает задача целенаправленного формирования и выбора не только решения при фиксированной модели (как в задаче 3 а)), но и ее структурных изменений (например, варьирование перечня переменных, коэффициентов матрицы и правых частей ограничений). Комплексное исследование этой задачи только начинает разворачиваться.

4. Рассредоточенная (распределенная) задача формирования и выбора решений. Наиболее распространенными, типичными для практики решения сложных задач, являются процедуры решения комплекса взаимосвязанных подзадач коллективом специалистов в режиме многостороннего взаимодействия их между собой (и с ЭВМ). При этом процессы подготовки, формирования и уточнения данных параллельно выполняются на многих рабочих местах лицами, формирующими решение (ЛФР), и связаны не только с вычислениями, но и с частичным принятием решений. При этом компетенция, функции и ответственность ЛПР и ЛФР оказываются распределенными по рабочим местам.

По этим задачам еще только появляются единичные первые работы.

Следует отметить, что элементарными ячейками сложных задач являются задачи классов 2–4. Здесь в качестве примера будут рассмотрены схемы диалоговых процедур использования комплексных оптимизационных моделей: метод уступок (прямых ограничений) и метод индуцированных ограничений (комбинированные модели). Все рассматриваемые далее процедуры, как и решаемые исходные задачи, носят многокритериальный характер. Причем роль ЭВМ в человеко-машинной процедуре в основном сводится к проверке ограничений и связей (их сотни) и нахождению допустимого решения, роль человека — в основном к неформальной оценке и сопоставлению показателей (и в первую очередь показателей), характеризующих целевые установки или другие существенные факторы. В связи с этим удобно представить модель в виде

$$\begin{aligned} F(x) &= \sum_{i=1}^n d_i x_i = D x, \\ B(x) &= \sum_{i=1}^n a_i x_i = A x \leq B^0, \quad x \geq 0. \end{aligned} \quad (4.23)$$

В модели (4.23) первая строка представляет собой вектор показателей, служащих для оценки решения, вторая — ограничения на область возможных значений фазовых переменных x . Допустим для простоты, что нас будут интересовать только два показателя, например капиталовложения и расход топлива (при фиксированной выработке и фиксированных других показателях). Тогда пусть F_1 обозначает капиталовложения, F_2 — расход топлива, а остальные показатели равны фиксированным значениям F_i^* . Модель примет вид

$$\begin{aligned} \varphi_i(x) &= \varphi_i^*, \quad i = 3, \dots, l, \\ A x &\leq B, \quad x \geq 0. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Множество возможных значений переменной x , определяемое (4.24), обозначим X^0 (рис. 4.16 а). На множестве X^0 определены два интересующих нас показателя (φ_1 и φ_2), которые при разных $x \in X^0$ могут принимать различные значения. Множество возможных значений показателей φ_1 и φ_2 (рис. 4.16 б) обозначим через Φ^0 .

Таким образом, задача сводится к нахождению такого значения x^* , при котором значения $\varphi_1^* = \varphi_1(x^*)$ и $\varphi_2^* = \varphi_2(x^*)$ являлись бы наиболее предпочтительными из всех возможных, принадлежащих Φ^0 . На рис. 4.16 показано множество Φ^0 в координатах φ_1

и φ_2 . Каждый из показателей φ_1 и φ_2 желательно уменьшить, однако уменьшение одного из показателей, например расхода топлива, связано, как правило, с увеличением другого.

Рациональный выбор производится из множества эффективных решений Φ^0 , которые соответствуют границе множества (множества Парето). На рис. 4.16 б это множество выделено жирной линией AB . Перед решением задачи следует выяснить, какие ми-

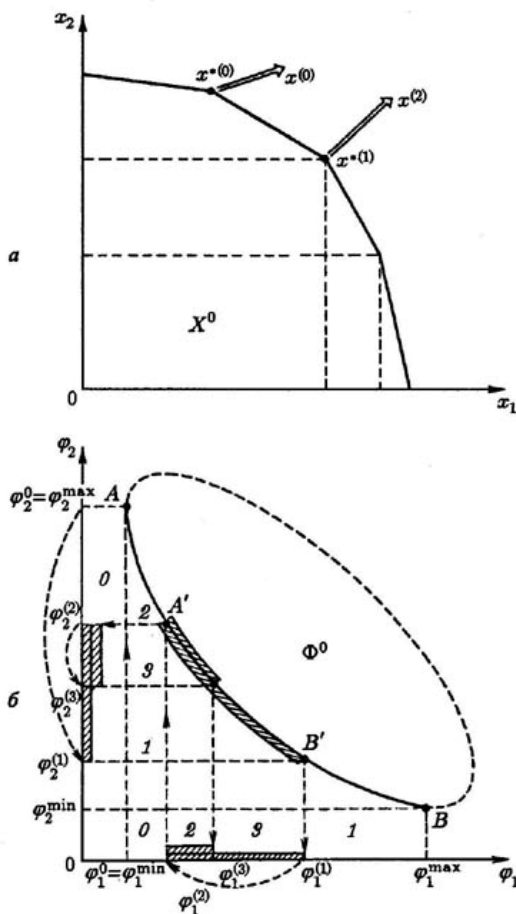


Рис. 4.16

нимальные значения каждого показателя (из числа эффективных) вообще возможны. Для этого нужно решить задачу

$$\min \{\varphi_i(x) \mid x \in X^0\}, \quad i = 1, 2, \quad (4.25)$$

т. е. найти абсолютный минимум каждого критерия на множестве X^0 . Этим значениям соответствуют крайние точки множества эффективных решений (точки A и B на рис. 4.16 б). Из рисунка видно, что одновременно точки A и B , а значит, $\varphi_1^{\min}$ и $\varphi_2^{\min}$ не реализуемы (соответствующая точка лежит вне множества допустимых значений X^0). Рассмотрим для иллюстрации простой пример регламентации диалоговой процедуры многокритериального анализа, являющейся одной из возможных модификаций известной схемы уступок. Пусть в результате решения оптимизационной задачи (4.25) сформировано начальное приближение φ^0 решения, например со значением $\varphi_1^{\min}$, т. е. $\varphi^0 = (\varphi_1^{\min}, \varphi_2^{\max})$, которому на рис. 4.16 б соответствует точка A . Затем ЛПР анализирует это решение, обращая внимание на ухудшение второго критерия (по сравнению с предельно возможным значением).

Будем считать, что выполняются следующие предположения о возможностях и поведении ЛПР.

1. С учетом полученного ухудшения второго критерия $\varphi_2^0 = \varphi_2^{\max}$ ЛПР в состоянии указать приемлемое улучшенное значение φ_2^1 или, другими словами, сделать приемлемую уступку $\Delta\varphi_2^1$ от предельно достижимого значения $\varphi_2^{\min}$ (с оценкой на «отлично») до значения $\varphi_2^1 = \varphi_2^{\min} + \Delta\varphi_2^1$ (с оценкой на «хорошо»).

2. Если получившееся при этом ухудшенное значение первого критерия $\varphi_1^1 = \varphi_1(\varphi_2^1)$ окажется для ЛПР также приемлемым, то он больше не возвращается ко второму критерию φ_2 , и процедура завершается фиксацией решения $\varphi^* = (\varphi_1^1, \varphi_2^1)$. Если φ_1^1 не приемлемо, то ЛПР может указать уступку $\Delta\varphi_1$ от значения $\varphi_1^{\min}$ (или, что то же, потребовать улучшения значения φ_1 от φ_1^2 до $\varphi_1^2 = \varphi_1^{\min} + \Delta\varphi_1$). Причем эта уступка не меньше выбранной единицы измерения ε_1 . Аналогичное предположение делается и по другому критерию, уступка по которому на каждом шаге не менее ε_2 .

3. Степень достижения конечной цели ЛПР (в данном случае неявной) тем больше, чем меньше значения φ_1 и φ_2 . Поэтому ЛПР делает уступки от $\varphi_1^{\min}$ и $\varphi_2^{\min}$ неохотно и только под давлением ухудшения других показателей.

Получаем следующую схему сходящейся диалоговой процедуры. Пусть на первом шаге ЛПР, проанализировав $\varphi_2^0 = \varphi_2^{\max}$,

указало (двойная стрелка на рис. 4.16 а) приемлемое значение φ_2^1 критерия φ_2 . Тогда ЭВМ фиксирует это значение как правую часть ограничения и рассчитывает, решая при этом задачу (4.25) минимизации первого критерия, значения $\varphi = (\varphi_1^1, \varphi_2^1)$ (стрелка на рис. 4.16 а). На втором шаге ЛПР анализирует приемлемость ухудшения φ_1 от $\varphi_1^0 = \varphi_1^{\min}$ до φ_1^1 . Допустим, что оно оказалось неприемлемым и ЛПР указало (двойная стрелка) в качестве приемлемого значения φ_1^2 . Аналогично первому шагу ЭВМ находит оптимальное решение φ^2 задачи (4.25) и новое минимально возможное при условии $\varphi_1 = \varphi_1^2$ значение φ_2^2 критерия φ_2 и т. д.

Заметим, что из сделанных предположений о поведении ЛПР следует, что область его рационального выбора предпочтительного решения сначала сужается от $[\varphi_2^{\min}, \varphi_2^{\max}]$ до $[\varphi_2^1, \varphi_2^{\max}]$, а область АВ — до $A\varphi^1$, а затем — до отрезка значений $[\varphi_2^1, \varphi_2^2]$. Действительно, улучшать φ_2^1 нельзя, так как на предыдущей итерации выяснилось, что лучшее значение φ_2^1 оказалось неприемлемым по второму критерию, и ЛПР его отклонило, а из свойства эффективных решений следует, что попытка улучшения значения φ_2 (т. е. уменьшения φ_2^1) приведет к еще большему ухудшению второго критерия, что будет в еще большей мере неприемлемо и отклонено самим же ЛПР. Ухудшать же φ_2 (увеличивать его значение более φ_2^2) нерационально, так как это значение приемлемо по первому критерию и только ухудшит значение φ_2 и, следовательно, снизит степень достижения цели. Совершенно аналогичные рассуждения для другого критерия приводят к тому, что область поиска наиболее предпочтительного решения φ^* сужается и ограничивается значениями критерия $[\varphi_1^1, \varphi_1^2]$, $[\varphi_2^1, \varphi_2^2]$ и соответствующей частью области эффективных решений (на рис. 4.16 в это участок кривой АВ между точками φ^1, φ^2 , выделенный двойной линией).

Уступка, сделанная ЛПР по критерию φ_2 (но теперь уже от значения φ_2^2 к φ_2^3), приводит (после расчета на ЭВМ) к уточнению значения φ_1^3 первого критерия, которое в соответствии с изложенным определяет новое значение верхней границы критерия, и φ_2 снова сужает область, в которой лежит наиболее предпочтительное решение (на рис. 4.16 она помечена тройной линией), и т. д. Допустим, что анализ этой области с учетом неопределенности исходных данных дал ЛПР основание прекратить процедуру дальнейшего уточнения решения. Результаты процедуры: наиболее предпочтительное решение лежит в области значений критериев $[\varphi_1^2, \varphi_1^3]$, $[\varphi_2^2, \varphi_2^3]$ на части множества эффективных решений между точками φ^2, φ^3 . В случае трех или более критериев алгоритм совершенно аналогичен. Только в этом случае в качестве верхней (худшей) границы

значения данного критерия берется наихудшее из расчетных значений, полученное по всем другим зафиксированным критериям, что дает дополнительную информацию о том, какое именно ограничение является сдерживающим. Кроме того, в этом случае необходимо регламентировать порядок анализа критериев ЛПР и оптимизации на ЭВМ. Эта очередность может быть установлена заранее (по номерам критериев) и на каждом цикле не меняться либо с учетом результата расчета меняться на каждом шаге, например, по следующей схеме. Фиксируется скорректированное ЛПР значение какого-либо критерия, рассчитывается минимальное значение (4.25) каждого из оставшихся φ_i^* при новом ограничении на скорректированный критерий и прежних остальных, находится относительное его ухудшение ρ_i и следующим корректируется критерий с наибольшим ρ_i .

Очевидно, что поскольку на каждом шаге отрезок возможных значений каждого критерия φ_i сокращается на ε_i , то изложенная схема сходится за число шагов k , не превышающее наибольшей из длин отрезков k_i :

$$k_i = \frac{\varphi_i^{\max} - \varphi_i^{\min}}{\varepsilon_i},$$

$$k = \max_i k_i,$$

измеренных с точностью ε_i , к некоторому решению φ_ε^* . Это решение в случае удовлетворения сделанных предположений совпадает с точностью до ε с наиболее предпочтительным решением. В общем случае изложенный пример процедуры (возможны и другие) может рассматриваться как эвристический прием, помогающий ЛПР сузить область неопределенности значений критериев.

Другой разновидностью процедуры такого рода служит метод, который можно назвать методом индуцированных ограничений, поскольку в нем информация о предпочтительности пар x^1 и x^2 решений φ^1 или φ^2 преобразуется в информацию, позволяющую сузить множество дальнейших возможностей выбора. Дадим лишь краткое содержательное описание этого метода на примере задачи выбора структуры генерирующих мощностей, возникающей при перспективном планировании энергетики. При ее решении в соответствии с существующими методиками оптимальный вариант плана формируется в результате решения оптимизационной задачи. В качестве целевой функции используются обычно приведенные затраты, описывающие предпочтительность варианта плана с экономической точки зрения.

Как правило, полученный таким образом вариант плана x^0 или φ^0 корректируется при его содержательном анализе со стороны планирующих органов отрасли (которые в данном случае играют роль ЛПР). В результате корректировки формируется более предпочтительный вариант плана x^1 , φ^1 , учитывающий ряд неформальных, но существенных для принятия решения факторов, не учтенных целевой функцией. Формально это соответствует доминированию предпочтений, задаваемых ЛПР, над предпочтениями, задаваемыми целевой функцией. Процедура имеет итерационный характер, причем на каждой итерации поправки Δx , $\Delta \varphi$, вносимые в первоначальный вариант плана со стороны ЛПР, могут нарушить его сбалансированность по ограничениям. Это вызывает необходимость в формировании (на ЭВМ) нового, сбалансированного варианта плана, учитывающего как предпочтения ЛПР, так и критерий приведенных затрат.

Иначе говоря, каждое решение модели обладает тем достоинством, что удовлетворяет ограничениям, и тем недостатком, что учитывает при этом лишь приведенные затраты. Любой план, скорректированный ЛПР, содержательно обоснован, но не обязательно допустим по ограничениям.

Наиболее распространенный подход к организации диалога в таком случае — это коррекция целевой функции

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i$$

путем изменения ее коэффициентов c_i с учетом парных предпочтений ЛПР (скорректированный вариант плана x^1 , φ^1 считается лучше исходного x^0 , φ^0). Однако такой подход «портит» имеющие содержательный экономический смысл коэффициенты целевой функции и при этом не удовлетворяет ряду необходимых требований к алгоритмам (см. § 2.3). Поэтому желательно, чтобы процедура, учитывая предпочтения ЛПР, в то же время позволяла оценивать экономический критерий и использовать его для выбора в случаях, когда частичной информации о предпочтениях ЛПР для выбора не достаточно.

Классической для метода уступок является следующая схема диалоговой процедуры. Сначала ЭВМ, решая в автоматическом режиме задачу, формирует начальный вариант решения x^0 , $\varphi^0 = \varphi(x^0)$, оптимального по заданному критерию $\varphi(x)$ (например, по приведенным затратам). Это решение представляется ЛПР, которое или принимает его (тогда процедура закончена), или ука-

зывает желаемые изменения $\Delta\varphi$; по отдельным критериям φ_i или Δx_i ; по вводам мощностей x_i (стрелка на рис. 4.16 а), возможно, фиксирует их по отдельным объектам, или вносит и то и другое изменение. ЭВМ проверяет скорректированный вариант решения на допустимость: если он допустим, то получено приемлемое решение и процедура закончена. Если вариант недопустим, то с учетом предпочтительности скорректированного варианта решения методом индуцированных (неявных) ограничений ЭВМ сужает область выбора и выделяет часть множества допустимых решений ($A'B'$, являющуюся частью AB на рис. 4.16 б), которое состоит из вариантов, безразличных по предпочтениям ЛПР, выявленным на данном этапе. На этой оставшейся части множества допустимых решений выбор производится по оптимизируемому критерию (приведенным затратам), и полученное таким образом ЭВМ решение снова представляется ЛПР и т. д. Снова происходит сужение области (до AB , выделенной на рис. 4.16 б тройной линией) и т. д., пока ЛПР не будет удовлетворено сформированным допустимым решением, или полученными интервалами (Δx , $\Delta\varphi$) значений показателей, или частью границы эффективных решений (AB). В случае, если число итераций ограничено (как это чаще всего бывает на практике из-за сложности задачи и дефицита времени), результатом процедуры является сужение области выбора и за счет этого частичная «настройка» модели с учетом содержательных соображений, учитываемых через предпочтения ЛПР.

Необходимо отметить, что для эффективного использования методов многокритериального анализа в диалоговом режиме необходимо быстро формировать на основе имеющейся базы данных матрицы ограничений моделей, целевые функции, менять ограничения и оптимизируемые критерии, степень агрегирования. Эти функции должна выполнять система сопровождения процедур, реализованная на распределенной системе поддержки решений.

4.6. Агрегирование и дезагрегирование

Как описывалось выше, типичными для практики планирования являются распределенные процедуры на сложной многоуровневой сетевой информационной структуре. На такой структуре происходит анализ и коррекция информации не только на нижнем уровне (на уровне терминальных вершин), но на любом, удобном для решения конкретной задачи агрегированном уровне. В этих условиях пользователь должен иметь возможность выполнения расчетов как «снизу вверх», так и «сверху вниз», спускаясь

по информационной структуре, например, от отрасли в целом до отдельных производственных объектов. Таким образом, необходимым условием успешного функционирования систем распределенных процедур является наличие встроенных в них алгоритмов агрегирования и дезагрегирования информации.

Рассмотрим сначала процедуры агрегирования. Если информационная структура имеет вид дерева, то процедура агрегирования с уровня I до уровня 0 сходится за I шагов. На каждом шаге происходит агрегирование по двухуровневым структурам:

$$X_p^{i-1} = \sum_{j \in Q} X_p^{i,j}, \quad p \in P^A.$$

Здесь i — номер уровня, с которого происходит агрегирование, Q — множество вершин нижнего уровня в двухуровневой структуре, P — множество показателей, подлежащих агрегированию.

В случае, когда информационная структура не является деревом, пользователь разбивает на группы множество показателей $P^A : P_1^A - P_n^A : \left(\bigcup_{k=1,n} P_k^A = P^A, P_{i_1}^A \cap P_{i_2}^A = \emptyset \right)$ и выделяет в модели РОТС (в $\tilde{G}$) древовидные структуры $G_1, \dots, G_n$, по которым агрегируется каждая группа показателей.

В отличие от процедур агрегирования процедуры дезагрегирования не столь однозначны. Они также могут работать последовательно, проходя «сверху вниз» уровень за уровнем информационной структуры. Однако даже когда модель РОТС $\tilde{G}$ имеет древесный вид, для выбора значений $\{X_p^{i,j}\}$, $j \in Q$ (4.26), необходимо внесение дополнительной информации. Другими словами, каждый раз приходится использовать ту или иную модель принятия решений.

Рассмотрим несколько примеров типовых процедур дезагрегирования (разверсток).

а) *Пропорциональные разверстки* — перераспределение в пределах ограничений в заданных пропорциях:

$$\begin{aligned} X_p^{i,j} &= \alpha_p^j X_p^{i-1}, \quad j \in Q, \quad p \in P^A, \\ \sum_{j \in Q} \alpha_p^j &= 1, \quad \alpha_p^j \in [0, 1]. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Пропорции $\{\alpha_p^j\}_{j \in Q}$ обычно выбирают на основании «базового» варианта состояния системы $\tilde{X}_p^{i,j}$. Это, например, или плановые

значения показателей, или «ретроспективные» значения

$$\alpha_p^j = \frac{\tilde{X}_p^{i,j}}{\sum_{j \in Q} \tilde{X}_p^{i,j}}. \quad (4.28)$$

б) *Приоритетные разверстки* — перераспределение с учетом приоритетов в пределах ограничений:

$$X_p^{i,j,\min} \leq X_p^{i,j} \leq X_p^{i,j,\max}. \quad (4.29)$$

Схема процедуры следующая. На шаге 1 выбирается наиболее приоритетная вершина j . Если $X_p^{i,j_1,\max} - X_p^{i,j_1,\min} \geq X_p^{i-1}$, то полагаем $X_p^{i,j_1} = X_p^{i-1} + X_p^{i,j_1,\min}$ и процедура заканчивается.

Иначе полагаем

$$\begin{aligned} X_p^{i,j_1} &= X_p^{i,j_1,\max}, \\ X_p^{i-1} &= X_p^{i-1} - X_p^{i,j_1,\max} + X_p^{i,j_1,\min} \end{aligned}$$

и исключаем из рассмотрения (из множества Q) вершину $Q \setminus j^1$. На следующем шаге повторяем процедуру с новым значением на «урезанном» (без вершин) множестве Q . По окончании процедуры все наиболее приоритетные ограничения будут достигать своих верхних границ ($X_p^{i,j} = X_p^{i,j,\max}$), наименее приоритетные — нижних ($X_p^{i,j} = X_p^{i,j,\min}$). Лишь для какого-то одного будут выполняться условия

$$X_p^{i,j,\min} < X_p^{i,j} \leq X_p^{i,j,\max}.$$

в) *Разверстка по траектории* — обобщение пропорциональной и приоритетной разверсток.

г) *Локально-оптимизационные разверстки* — перераспределение при оптимизации некоторого критерия $\Phi(x)$. Другими словами, решается задача

$$\Phi(x) \rightarrow \text{opt}$$

при ограничениях (4.26)–(4.29), $x^i \in X^i$, где X^i — некоторое множество допустимых решений.

д) *Многокритериальные разверстки* — перераспределение при многокритериальном анализе области допустимых решений (см. § 4.5 и Приложение):

$$\begin{aligned} \Phi(x) &\rightarrow \text{opt}, \\ x^i &\in X^i, \\ X_p^{i-j} &= \sum_{j \in Q} X_p^{i,j}, \quad p \in P^A. \end{aligned}$$

Следует заметить, что, строго говоря, к этому классу можно отнести и пропорциональные разверстки (выбор пропорций) и приоритетные (выбор приоритетов). Пример процедур данного типа рассмотрен в § 4.5.

е) *Прочие эвристические алгоритмы разверсток* — алгоритмы выбора и принятия решений.

4.7. Согласование плановых решений с системой вышестоящего уровня

Как отмечалось выше, в многоуровневой распределенной системе планирования «народное хозяйство—комплекс отраслей—отрасль—подотрасль—объединение—предприятие—подразделение» на рабочем месте руководителя каждого уровня должно иметься представление (модель) сопряженных с ним подсистем нижележащего уровня и системы вышестоящего уровня. Причем рассматриваемая в данном параграфе модель вышестоящего уровня должна достаточно полно отражать те основные аспекты и показатели, по которым идет взаимодействие с ней, и быть предельно упрощена в остальных аспектах.

Можно выделить два основных аспекта взаимодействия с вышестоящей системой в процессе формирования плана развития: уточнение требований по составу и объемам выпуска продукции и объемов выделяемых для этого ресурсов (в динамике). Другие аспекты взаимодействия (согласование параметров экономического механизма, например долей отчисления и др.) в данном разделе не рассматриваются.

Основными задачами, которые приходится решать при таком взаимодействии, являются задачи формирования сводных балансов (календарного планирования, агрегирования и дезагрегирования; см. § 4.2, 4.3, 4.6) и др. Причем эти задачи и информационные технологии являются типовыми для всех уровней. Несколько особенным является верхний уровень «народное хозяйство—комплекс отраслей», на примере которого (применительно к энергетике) мы и рассмотрим конкретизацию типовых задач, моделей и алгоритмов.

4.7.1. Содержательное описание задач и основных показателей. Данная задача решается в ходе исследования взаимодействия энергетики и экономики. При этом взаимодействия энергетики и экономики рассматриваются в следующих аспектах:

формирование потребности в различных видах энергии отраслями материального производства в рассматриваемом периоде;

определение объема народнохозяйственных ресурсов (капитальных вложений, численности занятых), выделяемых на развитие энергетики в соответствии с экономической концепцией развития народного хозяйства в рассматриваемом периоде.

Поскольку в концепциях экономического развития, а также в методиках, используемых для расчета энергопотребления, народное хозяйство представлено в виде совокупности отраслей материального производства, то целесообразно представить отрасль в модели как единую агрегированную технологию. В состав отраслей материального производства включаются промышленность, сельское хозяйство, строительство, транспорт и связь, прочие отрасли материального производства.

Поскольку промышленность является самой крупной и определяющей экономическое развитие отраслью материального производства, то она детализируется в системе моделей совокупностью отраслей, объединенных в отдельную модель фондов отраслей промышленности и модель «Распределение фондов отраслей промышленности», и включает агрегированные технологии по отраслям: черная металлургия, цветная металлургия, машиностроение, металлообработка и др.

Удельной характеристикой отдачи агрегированной технологии в модели служит показатель фондоотдачи по чистой продукции, а удельными характеристиками экономичности служат следующие показатели:

трудонасыщенность фондов — отношение численности занятых рабочих и служащих к стоимости основных производственных фондов (ОПФ);

энергонасыщенность фондов — отношение потребления различных видов энергии (в модели электроэнергии) к стоимости ОПФ;

материалонасыщенность фондов — отношение стоимости материальных затрат (без амортизации) к стоимости ОПФ.

Характеристикой смены агрегированной технологии (изменения ее состава во времени) служит в модели показатель интенсивности обновления фондов представляющий собой отношение объемов выбытия и ввода ОПФ.

Важными удельными характеристиками, используемыми в системе моделей, являются следующие показатели взаимосвязи между вводами ОПФ и капитальными вложениями:

коэффициент реализации капитальных вложений во вводы ОПФ;

норма амортизации на реновацию ОПФ, по которой определяется сумма амортизации, идущая на финансирование капитальных вложений.

Чем выше интенсивность обновления фондов и чем лучше их удельные характеристики, тем ближе характер экономического развития к интенсивному. Чем ниже интенсивность обновления фондов и стабильнее их характеристики, тем более экстенсивным является характер развития экономики.

Теперь опишем математическую модель и алгоритмы координации частных решений.

Данная система моделей предназначена для разработки одной из версий прогноза энергопотребления на длительную перспективу, а также исследования ретроспективного периода. Она должна позволять:

экспертно оценить реалистичность и согласованность различных концепций, содержательных гипотез, предпосылок, закладываемых в основу прогнозов экономического развития;

оценить уровень энергопотребления, обусловленный развитием отраслей материального производства;

исследовать реакцию отраслей на недопоставку энергии в случае, если возможности производства окажутся ниже потребностей отраслей.

Система моделей, реализующая указанные требования, состоит из балансовых ограничений, отражающих:

производство чистой продукции в отраслях материального производства (промышленности);

баланс основных производственных фондов (в дальнейшем — фондов);

потребление энергии (электроэнергии, теплоты, котельно-печного топлива, моторного топлива) и других важнейших народнохозяйственных ресурсов (численности занятых в материальном производстве, материальных ресурсов в стоимостном выражении, капитальных вложений).

Для отраслей материального производства эти ограничения в линеаризованном виде можно записать так:

$$K_j^{t+1} = K_j^t + \Delta K_j^t (1 - a_j^{5,t}), \quad (4.30)$$

$$\sum_{j=1}^n \nu_j^{1,k} K_j^t + \sum_{j=1}^n \Delta K_j^t (\varepsilon_j^{1,t} - a_j^{1,t} \nu_j^{1,t}) \leq B^{1,t+1}, \quad (4.31)$$

$$\sum_{j=1}^n \nu_j^{2,k} K_j^t + \sum_{j=1}^n \Delta K_j^t (\varepsilon_j^{2,t} - a_j^{2,t} \nu_j^{2,t}) \leq B^{2,t+1}, \quad (4.32)$$

$$\sum_{j=1}^n \nu_j^{3,k} K_j^t + \sum_{j=1}^n \Delta K_j^t (\varepsilon_j^{3,t} - a_j^{3,t} \nu_j^{3,t}) \leq B^{3,t+1}, \quad (4.33)$$

$$\sum_{j=1}^n \nu_j^{4,k} K_j^t + \sum_{j=1}^n \Delta K_j^t (\varepsilon_j^{4,t} - a_j^{4,t} \nu_j^{4,t}) \leq B^{4,t+1}, \quad (4.34)$$

$$\sum_{j=1}^n \nu_j^{5,k} K_j^t + \sum_{j=1}^n \Delta K_j^t (\varepsilon_j^{5,t} - a_j^{5,t} \nu_j^{5,t}) \leq B^{5,t+1}, \quad (4.35)$$

где K_j^t — фонды в j -й отрасли на начало планового периода; ΔK_j^t — вводы фондов в j -ю отрасль в t -м плановом периоде; n — число рассматриваемых отраслей; $\nu_j^{i,t}$ — удельные коэффициенты фондов на начало планового периода в i -м балансовом соотношении в j -й отрасли; $a_j^{i,t}$ — коэффициент интенсивности обновления фондов в i -м балансовом соотношении j -й отрасли в течение планового периода; $\varepsilon_j^{i,t}$ — удельные коэффициенты вводов фондов в i -м балансовом соотношении в j -й отрасли в течение планового периода t . Здесь $j = 1, 2, 3, 4, 5$ — номера балансовых соотношений (1 — по чистой продукции, 2 — по трудовым ресурсам, 3 — по материалам, 4 — по энергии, 5 — по фондам); $i = 1, 2, 3, 4, 5$ — номера переменных (1 — промышленность, 2 — сельское хозяйство, 3 — строительство, 4 — транспорт, 5 — прочие отрасли); $B^{i,t}$ — i -е балансовое ограничение в плановом периоде.

Таким образом, для формирования решений используется балансовая модель. Ее общее описание и алгоритмы приведены в § 4.2. Здесь отметим лишь следующие особенности.

В данной модели балансы формируются последовательно по плановым периодам. ЛПР, формирующее i -й баланс, вначале выбирает коэффициенты $\varepsilon_j^{i,t}$, $a_j^{i,t}$, $i = 1, 2, \dots, 5$, $j = 1, 2, \dots, n$. На множество значений коэффициентов наложен ряд в том числе неформальных ограничений. Предполагается, что множество допустимых вводов выпукло, т. е. если $\Delta K_j^{t,1}$ и $\Delta K_j^{t,2}$ — допустимые вводы фондов, то допустимыми вводами фондов будут $\beta \Delta K_j^{t,1} + (1 - \beta) \Delta K_j^{t,2}$, $j = 1, 2, \dots, n$, $0 \leq \beta \leq 1$. После формирования вводов фондов ΔK_j^t происходит расчет $K_j^{i,t}$, $a_j^{i,t}$, $j = 1, 2, 3, 4$, $i = 1, 2, \dots, n$ по формулам (4.30), (4.35).

Сделан ряд вспомогательных процедур (элементарных информационных технологий), помогающих ЛПР выбрать $\varepsilon_j^{i,t}$, $\alpha_j^{i,t}$, $i = 1, 2, \dots, n$, оформленных в виде следующего меню:

- 1) расчет начальных невязок;
- 2) расчет удельных коэффициентов для приростов;
- 3) проверка баланса фондов;
- 4) перерасчет вводов фондов с учетом выбытия;
- 5) расчет коэффициентов новых фондов по вводам фондов;
- 6) расчет коэффициентов новых фондов по пропорции вводов;
- 7) расчет коэффициентов новых фондов по равенству удельных коэффициентов;
- 8) суммирование старых и новых фондов;
- 9) обратный пересчет фондов (уменьшение);
- 10) суммирование новых и старых фондов;
- 11) расчет коэффициента интенсивности обновления фондов;
- 12) расчет потребности в энергии по вводам;
- 13) расчет капитальных вложений на перспективу;
- 14) расчет капитальных вложений на ретроспективу;
- 15) расчет фонда накопления.

При построении комплексной ИТ получения общего решения балансовых уравнений предлагается следующая схема координации частных задач. Рассматривается последовательность (по итерациям) решений:

$$x^{(k+1)} = \sum_{s \in S} \alpha_s P_s(x^{(k)}), \quad \sum_{s \in S} \alpha_s = 1, \quad \alpha_s \geq 0,$$

где S — множество балансов, P_s — оператор формирования s -го баланса, p — оператор выбора на множестве $\{X | x = \sum_{s \in S} \alpha_s \times P_s(x^{(p)}), \sum_{s \in S} \alpha_s = 1, \alpha_s \geq 0\}$, P_q — оператор возврата результата применения оператора p в выпуклую область Q , принадлежность к которой является обязательным условием для $x^{(k)}$ (например, Q задается нижними и верхними границами на вводы фондов по отраслям). Сходимость последовательности обеспечивается следующим образом: формируются достаточные условия сходимости в виде областей $Y^{(s)}(x^{(k)})$, $Y(P_1(x^{(k)}))$, ..., $P_s(x^{(k)})$, $Y^{(Q)}(P(Y))$, которым должны принадлежать $P_s(x^{(k)})$, $P\{x | x = \sum_{s \in S} \alpha_s \nu_s(x^{(k)}), \sum_{s \in S} \alpha_s = 1, \alpha_s \leq 0\}$ соответственно.

Если же результат какого-либо из этих операторов не принадлежит выделенной ему области сходимости, то производится кор-

рекция этого результата, минимальная в смысле некоторой нормы, например евклидовой, «возвращающая» результат в выделенную ему область.

4.8. Координация решений локальных задач

4.8.1. Алгоритмы регламентации, основанные на траекторном подходе. Рассмотрим сначала регламентирующую процедуру формирования решений в соответствии с дескриптивной схемой целенаправленного выделения и устранения узких мест.

Пусть имеется многоуровневая система, каждый элемент которой соответствует линейной производственной организационно-технической подсистеме (точнее, ее органам управления): отрасли, подотрасли, объединению, предприятию и т. д. В системе и каждой ее подсистеме автономно решается задача формирования допустимого и наиболее предпочтительного варианта плана. Допустимость определяется ограничениями, локализованными (распределенными) по каждой из подсистем (см. § 2.3, 4.4). Предпочтительность определяется по степени достижения цели, целевая установка задается в форме траектории предпочтительных решений.

Функции координатора выполняет каждый элемент вышестоящего уровня по отношению к элементам нижестоящего уровня. Целью процедуры координации, развивающейся «сверху вниз» и «снизу вверх» по многоуровневой системе, является получение решения, согласованного по всей совокупности распределенных ограничений и по конечным результатам. Первая функция координации выполняется автоматически распределенной системой поддержки решений (см. § 2.3, 4.4 и Приложение), вторая — в процессе построения и корректировки траекторий подсистем.

Выделим в общей сетевой структуре древесную технологическую структуру. Обозначим через $x_0^{j,r}$ мощность в r -й вершине j -го уровня иерархии. Тогда в линейном случае показатели $x_p^{j,r}$, $p \in P$ (P — множество показателей: расход топлива, металлопотребление и т. д.) данной вершины будут определяться согласно

$$x_p^{j,r} = a_p x_0^{j,r}, \quad (4.36)$$

где a_p — удельные коэффициенты использования мощности.

Пусть на верхнем уровне иерархии выдана целевая установка ($j = 1$) траектории наиболее предпочтительных решений, под которой мы будем понимать пропорции между мощностями вершин

уровня $j = 2$. Вообще под траекторией наиболее предпочтительных решений для вершины (j, r) будем понимать линию $\Gamma^{j,r}(\lambda)$, задающую пропорции между мощностями среди множества $Q_{j,r}$ вершин уровня $j + 1$, доминируемых вершиной (j, r) в технологической структуре:

$$\Gamma^{j,r}(\lambda) = \{(x_0^{j+1,s})_{s \in Q_{j,r}} \mid x_0^{j+1,s} = x_0^{j+1,s} + \lambda(x_0^{k,j+1,s} - x_0^{n,j+1,s}), \lambda \in [0, 1], s \in Q_{j,r}\}, \quad (4.37)$$

где $x_0^{n,j+1,s}$, $x_0^{k,j+1,s}$ — начальная и конечная точки s -го линейного отрезка кусочно-линейной траектории. В этих условиях возникает задача максимального продвижения вдоль траектории верхнего уровня в сторону увеличения параметра λ траектории, которая сводится к задаче математического программирования:

$$\lambda \rightarrow \max, \quad (4.38)$$

$$x_0^{j,s} = \sum_{l \in Q_{j,s}} x_0^{j+1,l}, \quad (4.39)$$

$$\{x_0^{j+1,s}\}_{s \in Q_{j,r}} \in \Gamma^{j,r}(\lambda). \quad (4.40)$$

Предлагается распределенная процедура решения данной задачи, состоящая на каждой итерации из следующих четырех этапов:

- 1) построение траектории (целеобразование);
- 2) поиск «узких мест» (по степени достижения цели);
- 3) целенаправленная коррекция ограничений (устранение «узких мест»);
- 4) исключение части локальных задач («фиксация» состояний соответствующих подсистем).

Этап 1 (построение траектории). Последовательно с верхнего уровня иерархии ($j = 1$) до нижнего ($j = J - 1$) строятся траектории $\Gamma^{j,r}(\lambda)$, согласованные в смысле соотношения (4.40). Эти траектории могут строиться как формальными методами, так и экспертным путем.

Рассмотрим пример алгоритма построения траектории. Пусть на уровне j для вершин k задана траектория (4.37), определяющая пропорции между показателями вершин из множества $Q_{j,r}$. Построим траекторию для вершины $(j + 1, l)$, где $(j + 1, l) \in Q_{j,r}$.

Шаг 1. Этап 1 начинается с построения начальной точки траектории. Требуется найти набор показателей типа мощности

$\{x_0^{n,j+1,l}\}$, $l \in Q_{j,r}$ для вершин, доминируемых вершиной (j, r) , так, чтобы выполнялось условие

$$x_0^{n,j,r} = \sum_{l \in Q_{j,r}} x_0^{j+1,l}. \quad (4.41)$$

Как отмечалось в гл. 1, 2, всегда имеется некоторый опорный вариант состояния системы $\{x_0^{*,j+1,l}\}$, полученный, например, на этапе предварительной проработки задачи. Компоненты начальной точки траектории можно задать пропорционально опорному варианту, что содержательно соответствует сохранению намеченных в опорном варианте пропорций развития:

$$x_0^{n,j+1,l} = x_0^{*,j+1,s} \frac{x_0^{n,j,r}}{\sum_{l \in Q_{j,r}} x_0^{n,j+1,l}}. \quad (4.42)$$

Шаг 2. Определение направления траектории. Требуется найти вектор $\{x_0^{k,j+1,l}\}$, $l \in Q_{j,r}$ такой, что

$$\begin{aligned} x_0^{k,j,r} + \lambda (x_0^{k,j+1,l} - x_0^{n,j,r}) &= \\ &= \sum_{l \in Q_{j,r}} x_0^{n,j+1,l} + \lambda \sum_{l \in Q_{j,r}} (x_0^{k,j+1,l} - x_0^{n,j+1,l}). \end{aligned} \quad (4.43)$$

Точку $\{x_0^{k,j+1,l}\}$, $l \in Q_{j,r}$ можно так же, как и на этапе 1, выбирать из условия пропорциональности некоторому опорному варианту $\{x_1^{*,j+1,l}\}$, $l \in Q_{j,r}$:

$$x_0^{k,j+1,l} = x_0^{*,j+1,s} \frac{x_0^{k,j,r}}{\sum_{l \in Q_{j,r}} x_0^{*,j+1,l}}. \quad (4.44)$$

Шаг 3. Учет ограничений на предельно допустимые значения показателей. При построении траектории необходимо соблюдать условие ее допустимости с точки зрения ограничений на предельно допустимые значения показателей:

$$x_p^{j+1,l,\min} \leq x_p^{j+1,l} \leq x_p^{j+1,l,\max}, \quad p \in P, \quad l \in Q_{j,r}. \quad (4.45)$$

На данном шаге находится значение параметра λ^1 , при котором траектория становится недопустимой по ограничениям (4.45) для какой-либо вершины $(j+2, l^*) \in Q_{j,r}$:

$$\lambda^1 = \min_{l \in Q_{j,r}} \min_{p \in P} \frac{x_p^{j+1,l,\max} - a_p^{j+1,l} x_0^{n,j+1,l}}{a_p^{j+1,l} (x_0^{k,j+1,l} - x_0^{n,j+1,l})}. \quad (4.46)$$

Обозначим:

$$L^* = \left\{ l^* \mid \min_P \frac{x_p^{j+1,l^*,\max} - a_p^{j+1,l^*} x_0^{n,j+1,l^*}}{a_p^{j+1,l^*} (x_0^{k,j+1,l^*} - x_0^{n,j+1,l^*})} = \lambda \right\}.$$

Для всех значений параметра $\lambda > \lambda^1$, где λ^1 задается выражением (4.46), траектория строится следующим образом:

- а) при $l \in L^*$, $x_0^{j+1,l} = x_0^{j+1,l,\max}$;
- б) для всех вершин $(j+1, l)$, где $l \in Q_{j,r} \setminus L^*$, находится точка $\{x_1^{*,j+1,l}\}$, $l \in Q_{j,r}$ такая, что при $\lambda > \lambda^1$ справедливо

$$\begin{aligned} x_0^{k,j,r} + \lambda (x_0^{k,j,r} - x_0^{n,j,r}) &= \sum_{l \in L^*} x_0^{j+1,l,\max} + \\ &+ \sum_{l \in Q_{j,r} \setminus L^*} x_0^{n,j+1,l} + \lambda \sum_{l \in Q_{j,r} \setminus L^*} (x_0^{k,j+1,l} - x_0^{n,j+1,l}), \end{aligned}$$

где

$$x_1^{*,j+1,l} = x_1^{*,j+1,l} \frac{x_0^{k,j,r}}{\sum_{l \in Q_{j,r} \setminus L^*} x_0^{*,j+1,l}}, \quad l \in Q_{j,r} \setminus L^*.$$

Затем снова происходит обращение к началу этапа (к шагу 1), находятся самые жесткие из ограничений (4.45), фиксируются показатели в соответствующих вершинах и процесс повторяется до тех пор, пока не будут исследованы все ограничения (4.46). Заметим, что шаги данного этапа выполняются параллельно по всем вершинам уровня. Геометрически процедура соответствует последовательному проектированию траектории (4.37) на гиперплоскости, задаваемой ограничениями (4.45).

Этап 2* (поиск «узких мест»). Начиная с верхнего уровня иерархии ($j = 2$), параллельно во всех вершинах (j, r) уровня j определяется максимально возможное значение параметра $\lambda^{j,r}$ траектории — степень продвижения вдоль траектории. Решение локальных задач общей задачи — степень достижения цели, будет определяться вершиной, имеющей минимальную степень продвижения вдоль траектории:

$$\lambda^* = \min_{(j,r)} \lambda^{j,r}, \quad (4.47)$$

$$x_1^{j,r} = \Gamma^{j,r}(\lambda^*). \quad (4.48)$$

Имеет место

Утверждение 4.1. На каждом уровне иерархии $j = 2, 3, \dots, J - 1$ решение задачи (4.38)–(4.40) определяется вершиной, которой соответствует минимальный параметр траектории $\lambda^{j,r}$.

Это позволяет построить следующий алгоритм поиска «узкого места» — сдерживающей вершины (локальной задачи).

Шаг 1. Для каждой вершины уровня $j = 1, \dots, J - 1$ определяем (одновременно)

$$\lambda_p^{j+1,l} = \frac{x_p^{j+1,l,\max} - a_p^{j+1,l} x_0^{k,j+1,l}}{a_p^{j+1,l} (x_1^{k,j+1,l} - x_1^{n,j+1,l})}, \quad (4.49)$$

$$\lambda^{j+1,l} = \min_{p \in P} \{\lambda_p^{j+1,l}\}. \quad (4.50)$$

Шаг 2. Определяем «узкое место» — вершину $(j + 1, l^*)$:

$$(j + 1, l^*) = \arg \min_{l \in Q_{j,r}} \{\lambda^{j+1,l}\}.$$

Шаг 3. Переход на следующий уровень: полагаем $j = j + 1$, $r = l^*$, переходим к шагу 1.

После просмотра всех уровней иерархии в рассматриваемой древесной технологической структуре будет выделен «путь», состоящий из вершин с минимальным параметром траектории (для всех одинаковым и равным λ^*). Будем называть этот путь существенным путем.

Этап 3, (коррекция ограничений). Пусть на этапе 2 выяснилось, что наименьшая степень достижения цели λ достигается в вершине (j, r) , причем сдерживающим является ограничение по p -му показателю:

$$x_p^{j,r,\max} = a_p^{j,r} \Gamma^{j,r}(\lambda) = a_p^{j,r} x_0^{j,r}. \quad (4.51)$$

Увеличить степень достижения цели в этом случае можно тремя способами:

- а) скорректировать «верхнее» ограничение на p -й показатель, т. е. увеличить $x_p^{j,r,\max}$;
- б) скорректировать соответствующий удельный коэффициент $a_p^{j,r}$;
- в) скорректировать траекторию $\Gamma^{j,r}(\lambda)$.

Если удалось увеличить степень достижения цели $\lambda^{j,r}$ вершины (j, r) , а одновременно с этим увеличиваются показатели дефицитности всех вершин, доминирующих над вершиной (j, r) , то опять выполняется этап 2. Если нет, то переходим к этапу 4.

Остановимся подробнее на способах увеличения параметра вершины (j, r) .

Шаг 1. Коррекция ограничений $x_p^{j,r,\max}$. Пусть параметры $x_p^{j,r,\max}$ не фиксированы жестко, а связаны соотношением

$$x_p^{j-1,l,\max} = \sum_{r \in Q_{j-1,r}} x_p^{j,r,\max}, \quad p \in P, \quad (4.52)$$

где $(j-1, l)$ — вершина, доминирующая под вершиной (j, r) . Рассмотрим двухуровневую систему, состоящую из вершины $(j-1, l)$ и доминируемых ею вершин $Q_{j,r}$. Для этой системы по p -му показателю имеются ограничения (4.45, 4.52), причем существенным будет ограничение с номером p . В этих условиях можно применить алгоритм 1 (см. § 4.3), который увеличит верхнюю границу по p -му показателю на существенных ограничениях и уменьшит ее на несущественных, увеличив тем самым $\lambda^{j,r}$.

Шаг 2. Коррекция удельных коэффициентов. Рассмотрим двухуровневую систему, состоящую из вершины (j, r) и доминируемых ею вершин $Q_{j,r}$. В силу (4.36), (4.42) имеет место соотношение

$$a_p^{j,r} = \sum_{r \in Q_{j,r}} a_p^{j+1,p} \frac{x_0^{j+1,l}}{x_0^{j,r}}, \quad (4.53)$$

где

$$x_0^{j,r} = \sum_{l \in Q_{j,r}} x_0^{j+1,l}. \quad (4.54)$$

Для того чтобы увеличить параметр траектории $\lambda^{j,r}$ в вершине (j, r) , надо выбрать минимально возможный коэффициент $a_p^{j,r}$. Это можно сделать с помощью описанного в § 4.3 алгоритма 3. А именно:

- полагаем $x_1^{j+1,l} = x_1^{j+1,l,\min}$, $l \in Q_{j,r}$;
- на множестве $Q_{j,r}$ выбираем вершину l_1 такую, что

$$a_p^{j+1,l_1} = \min_{l \in Q_{j,r}} a_p^{j+1,l}$$

и полагаем

$$x_0^{j+1,l_1} = \min \{x_0^{j+1,l_1,\max}, x_0^{j,r} - \sum_{l \in Q_{j,r} \setminus l_1} x_0^{j+1,l}\}.$$

Если $x_0^{j+1,l_1} - \sum_{l \in Q_{j,r} \setminus l_1} x_0^{j+1,l} = 0$, то процесс оканчивается, если нет, то среди оставшихся вершин в $Q_{j,r}$ (т. е. без учета вершины l_1) опять выбирается вершина с минимальным показателем $a_p^{j+1,l}$ и т. д. до тех пор, пока ограничение p остается существенным.

В результате данного процесса мы формируем новое значение $\tilde{a}_p^{j,r}$ коэффициента $a_p^{j,r}$ ($\tilde{a}_p^{j,r} < a_p^{j,r}$), которое позволяет уменьшить «жесткость» ограничений в вершине (j, r) и увеличить параметр $\lambda^{j,r}$. Одновременно формируются новые пропорции между мощностями вершин множества $Q_{j,r}$, т. е. новые траектории для вершин, доминируемых вершиной (j, r) . Параметр $\lambda^{j,r}$ увеличивается при этом на величину $\Delta \lambda^{j,r}$:

$$\Delta \lambda_p^{j,r} = \frac{x_p^{j,r,\max} (a_p^{j,r} / \tilde{a}_p^{j,r} - 1)}{a_p^{j,r} (x_0^{k,j,r} - x_0^{n,j,l})}. \quad (4.55)$$

Шаг 3. Коррекция траектории. Заметим, что, корректируя удельные показатели на шаге 2, мы тем самым уже меняем «направление» траектории наиболее предпочтительных решений.

Рассмотрим двухуровневую систему, состоящую из вершины $(j-1, l)$, доминирующей вершину (j, l) , и вершин $Q_{j-1,l}$, доминируемых вершиной $(j-1, l)$. Очевидно, что максимальное продвижение вдоль траектории верхнего уровня будет достигнуто, если ограничения (4.45) будут пересекаться на траектории (так как в этом случае будут достигаться верхние значения всех ограничений (4.45): $x^{j,r} = x^{j,r,\max}$). Поэтому надо «сдвинуть» траекторию параллельно самой себе в вершину многогранника (4.45) так, чтобы выполнялось условие

$$\sum_{r \in Q_{j-1,l}} x_0^{k,j,r} = \sum_{r \in Q_{j-1,l}} \tilde{x}_0^{k,j,r}, \quad \sum_{r \in Q_{j-1,l}} x_0^{n,j,r} = \sum_{r \in Q_{j-1,l}} \tilde{x}_0^{n,j,r}, \quad (4.56)$$

где $\tilde{x}^n, \tilde{x}^k$ — получившиеся «новые» начальные и конечные точки траектории.

Условие (4.56) необходимо для сохранения «согласованности» новой траектории с траекториями верхнего уровня в смысле ограничений (4.40). Новое значение $\tilde{\lambda}^*$ параметра траектории будет определяться выражением

$$\tilde{\lambda}^* = \frac{\sum_{r \in Q_{j-1,l}} (x_0^{j,r,\max} - x_0^{n,j,r})}{\sum_{r \in Q_{j-1,l}} (x_1^{k,j,r} - x_1^{n,j,r})}. \quad (4.57)$$

Этап 4 (исключение вершин). Если на этапе 3 не удалось уменьшить «жесткость» ограничений в вершине (j, r) , параметры траектории этой вершины и поддерева подчиненных ей вершин фиксируются на предельно достижимом уровне. В дальнейшем процедура работает, начиная с этапа 1, на сокращенной структуре — без учета «замороженных» вершин и соответствующих им частных моделей. Это равносильно тому, что на уровне $j - 1$ траектория строится в пространстве на единицу меньшей равномерности, чем в начале работы, так как показатели, относящиеся к вершине (j, r) , фиксированы.

Процедура оканчивает работу после того, как будут зафиксированы показатели всех вершин (это означает, что ни в одной вершине на этапе 3 не удалось уменьшить «жесткость» ограничений) или будет достигнуто значение параметра траектории верхнего уровня $\lambda^* = 1$.

Рассмотрим алгоритмы координации решения частных задач по схеме уступок. Рассмотрим двухуровневую распределенную систему, в которой основной функцией элемента нижнего уровня является автономное решение задачи минимизации своего критерия или группы критериев, а верхнего уровня — координация решения частных задач. Причем имеются общие ограничения, минимизация одного критерия приводит к ухудшению других, частные решения разных элементов несовместны и основной целью итерационной процедуры координации является формирование допустимого компромиссного решения, учитывающего предпочтение элементов нижнего уровня.

Примерами такой распределенной системы являются сводный отдел и комплекс функциональных служб РОТС (материально-техническое снабжение, кадры, капитальное строительство, сбыт и др.) и сводный орган. Критериями могут быть затраты (в том числе по статьям расходов), численность (в том числе по специальностям) и т. п.

Математическая постановка задачи такого рода описана в § 4.4, 4.5. Она сводится к проблеме многокритериального анализа и выбора.

Для координации частных решений в данном случае может быть использована схема уступок (см. § 4.5), сходящаяся к допустимому приемлемому решению и использующая следующие свойства.

1. Критерии выбраны так, что минимизация каждого из них приводит к наиболее предпочтительному решению. В случае недопустимости этого варианта более предпочтительным считается ва-

риант, имеющий меньшее значение хотя бы одного критерия при прочих равных (т. е. решение должно быть парето-оптимальным).

2. Координатор способен установить величину требуемого улучшения неприемлемого значения одного критерия и сделать уступку (не менее заданной величины) по сдерживающему критерию.

3. При фиксированном механизме формирования новых вариантов ЭВМ для каждого критерия, имеющего неудовлетворительное значение, может указать критерий (или их группу), уступка по которому необходима для улучшения неудовлетворительного критерия.

4.8.2. Схема процедуры координации (см. подробнее в § 4.5)

Предварительный шаг. Каждая l -я частная задача решается автономно, и находятся минимальные значения $\varphi_l^{\min}$ и $\varphi_l(\varphi_l^{\min})$, $l \neq l$. Для каждого критерия l определяется наихудшее (максимально возможное) значение $\varphi_l^{\max} = \max_l \varphi_l(\varphi_l^{\min})$.

Общий k -й шаг:

а) координатором выделяется критерий $l^{(k)}$ с неприемлемым значением $\varphi_l^{\max(k)}$;

б) ЭВМ указывает критерии $L^{(k)}$, по которым необходимо сделать уступку, чтобы улучшить критерий $l^{(k)}$;

в) исполнители, отвечающие за критерии $L^{(k)}$, делают по ним уступки $\Delta\varphi_l^{(k)}$ (не менее чем на заданную величину ε):

$$\varphi_l^{\min(k+1)} = \varphi_l^{\min(k)} + \Delta\varphi_l^{(k)}, \quad \Delta\varphi_l^{(k)} \geq \varepsilon l k;$$

г) ЭВМ производит пересчет новых значений $\varphi_l^{\min(k+1)}$;

д) делается оценка интервала области значений каждого критерия $d_l^{(k+1)} = \varphi_l^{\max(k+1)} - \varphi_l^{\min(k+1)}$. Если $d_1 < \delta_1$, где δ_1 — заданная величина, то значение критерия l фиксируется $\varphi^* = \varphi_l^{\min(k+1)}$; этот критерий исключается из дальнейшего рассмотрения;

е) если число оставшихся критериев не меньше двух, то делается переход к следующему шагу. В противном случае процедура заканчивается.

4.9. Выделение существенных факторов и связей (формирование модели минимальной сложности)

Задача выделения существенных факторов и связей возникает при попытке пользователя РСФСР сформировать модель, содержащую минимально необходимое число показателей и связей, но тем

не менее позволяющую решить стоящую перед пользователем задачу. Следует заметить, что говорить о существенных факторах, о минимальной сложности модели можно лишь по отношению к какой-либо целевой установке. Задача может быть сформулирована в двух вариантах.

Задача 1. Имеется многоуровневая иерархическая модель распределенной системы. Каждой вершине (или объединению некоторого подмножества вершин) этой модели, имеющей ярко выраженную сетевую структуру, соответствуют: своя подсистема; своя локальная модель этой подсистемы; свой исполнитель, решающий в рамках этой подсистемы какие-то частные задачи. Для решения каждой из частных задач в исходной, априорно существующей в РСФСР информационной модели: имеется избыточное количество уровней агрегирования; на каждом уровне агрегирования имеется избыточное количество вершин (избыточная детализация в представлении информации); в каждой вершине учитывается избыточное количество показателей и связей между ними.

Требуется разработать процедуру, позволяющую для решения интересующей пользователя частной подзадачи выбрать подмодель минимальной сложности с минимальным количеством уровней агрегирования, минимальным количеством вершин на каждом уровне, минимальным количеством показателей в каждой вершине, минимальным количеством связей между этими показателями.

Задача 2. Имеется некоторая агрегированная модель. Требуется определить: адекватно ли данная модель описывает исследуемую пользователем проблему; если нет, то в каком направлении требуется изменение исходной модели — добавлять ли новые уровни агрегирования (детализации) информации, добавлять ли новые вершины на каждом уровне, проводить ли укрупнение информации по отдельным вершинам и т. п.

При формализации задач 1 и 2 требуется уточнить следующие вопросы: что является целевой установкой задачи; что понимается под степенью адекватности модели; в чем выражается минимальная сложность модели?

Легко видеть, что задачи 1 и 2 по сути близки. Главной проблемой при решении каждой из этих задач является выделение существенных факторов и связей (и определение степени этой существенности).

Рассмотрим теперь возможные примеры формализации поставленных задач.

Для определенности будем полагать, что модель исследуемой распределенной системы имеет иерархическую сетевую структуру, принятую в *диалоговой имитационной системе* (ДИС) СТРАТЭК. Это означает, что вершинами такой сети являются локальные модели (для определенности — линейаризованные) вида

$$X_{i,r} = a_{i,r} X_{i,r}, \quad (4.58)$$

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}, \quad (4.59)$$

где r — индекс вершины сети, принимающий значения на множестве R ; i — индекс показателя вершины r , принимающий значения на множестве I естественно, $a_{1,r} = 0$ для всех r).

Связи между показателями соседних вершин определяются соотношениями вида

$$X_{i,r} = \sum X_{i,q}, \quad (4.60)$$

где q принимает значения из $Q(r)$ — множества вершин, непосредственно доминируемых вершиной r .

Пусть в вершине r задана целевая установка в виде траектории наиболее предпочтительных решений (для определенности):

$$\lambda \rightarrow \max, \quad (4.61)$$

$$X_{1,r} = X_{1,r}^0 + \lambda (X_{1,r}^{\text{ид}} - X_{1,r}^0), \quad (4.62)$$

где X^0 и $X^{\text{ид}}$ — начальная и конечная точки траектории, а λ — параметр траектории.

Для решения задачи (4.61), (4.62) в вершине r пользователь может ограничиться рассмотрением локальной модели (4.58), (4.59), соответствующей вершине r .

Легко показать (см. § 4.3), что решение задачи в этом случае определяется (при естественном предположении, что X^0 удовлетворяет условию (4.59)) соотношениями

$$\lambda_{i,r} = \frac{X_{i,r}^{\max}/a_{i,r} - X_{1,r}^0}{X_{1,r}^{\text{ид}} - X_{1,r}^0}, \quad (4.63)$$

$$\lambda^{\text{opt}} = \lambda_{i^*,r}, \quad \text{где } i^* = \arg \min \{\lambda_{i,r}\} \quad (4.64)$$

$$X^{\text{opt}} = X^0 + \lambda^{\text{opt}} (X^{\text{ид}} - X^0). \quad (4.65)$$

Эти особенности системы позволяют построить простые и эффективные алгоритмы формирования адекватных моделей минимальной сложности.

Рассмотрим (см. § 4.2) граф G , все вершины которого разбиты на K уровней, причем на первом уровне находится одна доминирующая дерево вершина. Каждая вершина r графа имеет следующие характеристики:

$P(r)$ — показатели данной вершины;

$U(r)$ — связи с вершинами, доминирующими данную, и с вершинами одного с ней уровня;

$F(r)$ — функции на связях.

Совокупность G, U, P, F образует модель распределенной системы (см. § 4.2, а далее просто систему C).

Сложностью системы C с графом G назовем функционал

$$W = \frac{1}{3} \sum (\|p(r)\| + \|u(r)\| + \|f(r)\|), \quad (4.66)$$

где норма зависит от вида решаемой задачи.

Рассмотрим две системы: C^0 и C^* , где C^0 — исходная система, C^* — система выбранной сложности $W^* < W^0$. Обозначим состояние всех элементов этих систем соответственно Y^0 и Y^* .

Адекватностью систем C^0 и C^* назовем совпадение Y^0 и Y^* по некоторым, заранее заданным критериям.

Пусть Φ — целевая функция системы, $X_{1,r}$ — переменные в вершинах графа. Примером критерия в определении адекватности может быть:

а) $|\Phi^0 - \Phi^*|$ — условие адекватности по степени достижения цели;

б) $|X_{1,r}^*/X_{1,q}^* - X_{1,r}^0/X_{1,q}^0| < \delta$, где q из $Q(r)$, а X^0 и X^* — решение данной задачи в системе C^0 и C^* соответственно — условие адекватности по сохранению пропорций.

Теперь можно сформулировать одну из задач выделения системы минимальной сложности в процессе решения задачи Z :

$$\begin{aligned} W &\rightarrow \min, \\ |\Phi^0 - \Phi^*| &< \delta_0. \end{aligned}$$

Рассмотрим пример алгоритма выделения системы минимальной сложности.

Уточним формальную постановку задачи с учетом многоуровневой структуры рассматриваемых систем. Вершину r обозначим парой чисел (k, i) , где k — номер уровня, i — номер вершины в уровне. Соответственно далее $X_{k,i} = X_{1,r}$. Система C включает следующие элементы: G — граф-дерево, $J_{k,i}$ — множество вершин графа, доминируемых вершиной (k, i) ; $X_{k,i}$ — переменную

в вершине (k, i) ; $a_{k,i}$ — вектор удельных показателей в вершине (k, i) . Заданы следующие ограничения и связи:

$$\sum_i X_{k+1,i} = X_{k,i}^0, \quad i \in J_{k,i}^0, \quad (4.67)$$

$$a_{k,i^0} = \frac{\sum_i a_{k+1,i} X_{k+1,i}}{X_{k,i^0}}, \quad i \in J_{k,i}^0, \quad (4.68)$$

$$\begin{aligned} \sum_i X_{k,i^0}^{\max} &> X_{k+1,i}^{\max}, \\ \sum_i X_{k,i^0}^{\min} &< X_{k+1,i}^{\min}, \quad i \in J_{k,i}^0, \\ 0 &< X_{k,i}^{\min} < X_{k,i} < X_{k,i}^{\max}. \end{aligned} \quad (4.69)$$

$$Ax < B. \quad (4.70)$$

Известно начальное состояние системы $X_{k,i}^0 < F_{k,i}^0$, и задана траектория Γ в виде $X_{k,i} = X_{k,i}^{\text{ид}} - \lambda_{k,i} (X_{k,i}^{\text{ид}} - X_{k,i}^0)$, где k, i — номера крайних нижних вершин графа.

Задание траектории на нижнем уровне определяет пропорции изменения переменных на всем дереве, поэтому условие адекватности б) выполняется автоматически. С другой стороны, критерием такой задачи является степень достижения цели, которую можно однозначно вычислить по любому $X_{k,i} \in \Gamma$. Следовательно, критерий адекватности а) также выполнен для графа любой сложности $W < W^0$. Для определения сложности системы будем использовать функционал W с нормами $|f_{k,i}| = |u_{k,i}| = 1$; $|p_{k,i}| = l_{k,i}$, где $l_{k,i}$ — число компонент вектора $a_{k,i}$, соответствующих активным ограничениям в (4.69), (4.70). Таким образом $W = (1/3) \sum_{k,i} (2 + l_{k,i})$, $(k, i) \in g$, — множество вершин, где происходит нарушение ограничений в (4.69), (4.70).

Теперь можно сформулировать задачу выделения системы минимальной сложности при наличии траектории:

$$\begin{aligned} W &\rightarrow \min, \\ X_{1,1} &= X_{1,1}^0 + \Delta X_{1,1}, \\ X_{k,i} &\in \Gamma, \\ Ax &< B. \end{aligned}$$

Содержательно задача сводится к выявлению вершин, в которых на интервале $[X_{1,1}, X_{1,1} + \Delta X_{1,1}]$ происходит нарушение ограничений фиксации номеров этих ограничений. Соответственно строятся множества g и $g1$, где $g1$ — множество вершин, доминирующих вершины из g и $g1$.

Алгоритм 1

Шаг 1. Вводится требуемое изменение $\Delta X_{1,1}$.

Шаг 2. По формуле

$$X_{k,i} = \frac{\Delta X_{1,1}(X_{k,i}^{\text{ид}} - X_{k,i}^0)}{\sum_{k,i}(X_{k,i}^{\text{ид}} - X_{k,i}^0)} + X_{k,i}^0$$

пересчитываются переменные по вершинам нижнего уровня.

Шаг 3. По формулам (4.67), (4.68) пересчитываются показатели и переменные для остальных вершин $k < K$.

Шаг 4. Проверяется выполнение ограничений (4.69), (4.70).

Шаг 5. Вершины, в которых нарушены ограничения (4.70), вносятся в множество g ; номера нарушенных ограничений — в множество $q_{k,i}$; строится множество $g1$.

Шаг 6. Из вершин, принадлежащих g и $g1$, строится дерево сложности $\bar{W}^*$ для данного $\Delta X_{1,1}$.

В данном конкретном случае из свойств системы и по построению видно, что сложность $\bar{W}^* < W^0$ однозначно зависит от $\Delta X_{1,1}$ и является минимальной.

Алгоритм сходится за один шаг, поэтому его можно использовать в диалоговом режиме, последовательно изменяя $\Delta X_{1,1}$ до получения подсистемы, приемлемой по сложности и конфигурации. Очевидно, что сложность монотонно растет с увеличением $\Delta X_{1,1}$.

Замечание. Поскольку траектория однозначно связывает все вершины $X_{k,i}$ графа, то вместо $\Delta X_{1,1}$ можно задавать возмущение в любой вершине дерева.

Рассмотрим задачу формирования модели минимальной сложности для системы C в случае существования на верхнем уровне билинейной целевой функции $\Phi(a, x)$ с положительными коэффициентами, где a и x удовлетворяют (4.67)–(4.69), и решается задача

$$\Phi(a, x) \rightarrow \max \quad (4.71)$$

при условиях (4.67)–(4.70).

Пусть существует опорное допустимое решение этой задачи $\{X_{k,i}^*, a_{k,i}^*, \Phi^*\}$. Производя возмущение в вершине (k, i) , мы по-

лучим приращение целевой функции

$$\Delta\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial X_{k,i}} \Delta X_{k,i} + \sum_p \frac{\partial\Phi}{\partial a_{k,i}^p} p \Delta a_{k,i}^p, \quad (4.72)$$

где $p = 1, \dots, l$ — компоненты вектора $a_{k,i}$.

Практически бывает удобно рассматривать относительные изменения показателей в вершинах:

$$\frac{\Delta X_{k,i}}{X_{k,i}} < T, \quad \frac{\Delta a_{k,i}}{a_{k,i}} < s. \quad (4.73)$$

Таким образом,

$$\Delta\Phi_{k,i} = T \frac{\partial\Phi}{\partial X_{k,i}} X_{k,i} + s \sum_p \frac{\partial\Phi}{\partial a_{k,i}^p} a_{k,i}^p. \quad (4.74)$$

Пусть имеется некоторое поддерево сложности $W^* < W^0$ с различной глубиной детализации для разных ветвей. Нижние вершины такого поддерева разобьем на два множества:

L — множество крайних вершин поддерева, не требующих дальнейшей детализации при решении задачи;

M — множество крайних вершин, которые необходимо детализировать.

Общее изменение целевой функции при возмущении крайних вершин имеет вид

$$\Delta\Phi = \sum_{k,i} \Delta\Phi_{k,i}, \quad (k, i) \in M \cup L;$$

при значениях $X_{k,i}^*$, $a_{k,i}^*$ мы не учитываем нелинейности системы. Поэтому в дальнейшем будем выбирать T и s достаточно малыми, чтобы отклонениями производных можно было пренебречь. Для отбрасывания вершин, существенно не влияющих на целевую функцию, воспользуемся критерием адекватности α) в виде $\Delta\Phi^* < \nu$. Сложность модели будем определять с помощью (4.66), где $|u_{k,i}| = |p_{k,i}| = |f_{k,i}| = 1$, т. е. W — количество вершин в дереве минимальной сложности. Таким образом, нами решается задача

$$\begin{aligned} W &\rightarrow \min, & a_{k,i} &= a_{k,i}^*, \\ \Delta\Phi^* &< \nu, & X_{k,i} &= X_{k,i}^*, \end{aligned}$$

при условиях (4.67)–(4.70), (4.73).

Шаг 1. Задается величина относительного возмущения элементов системы T, s .

Шаг 2. Задается точность ν .

Шаг 3. Задается исходное состояние: $L = 0$; $u = 0$; M состоит из вершины $(1, 1)$.

Шаг 4. Предварительный шаг ($k = 2$). По формуле (4.74) вычисляются все $\Delta\Phi_{2,i}$ и ранжируются: $\Delta\Phi_{2,i_1}, \dots, \Delta\Phi_{2,i_t}, \dots, \Delta\Phi_{2,i_n}$, $i = 1; \dots, n$ (n — число вершин второго уровня, t — индекс). Находится $t^* = \max t$ такое, что $\sum_{t=1}^t \Delta\Phi_{2,i_t} < \nu$. Вершины $(2, i_1), \dots, (2, i_{t^*})$ вводятся в L ; $(2, i_{t^*+1}), \dots, (2, i_n)$ — в M .

Если $t^* = n$, процедура окончена. Переход к шагу 6.

Шаг 5. Общий шаг. Все вершины $(k, i)^*$ из M детализируются до следующего уровня. Вершины, полученные в процессе детализации, вносятся в M , вершины $(k, i)^*$ выводятся из M . Далее вершины из M и L ранжируются, как в шаге 4, находятся t^* , заполняются M и L . Если в M найдутся вершины с $k = K$ (крайние нижние вершины), они переводятся из M в u . Если $M = 0$, алгоритм работу заканчивает. Переход к шагу 6.

Переход на начало общего шага.

Шаг 6. Из вершин $(k, i) \in L \cup U$ и всех вершин, доминирующих их, строится дерево минимальной сложности.

Алгоритм сходится не более чем за $W - R$ шагов, поскольку на каждом шаге детализируется, как минимум, одна вершина (R — число крайних нижних вершин). В свою очередь, $W = f(T, s, \nu)$, и при фиксированных T и s величина W монотонно убывает с возрастанием ν .

Глава 5

Математические обоснования основных алгоритмов принятия решений

5.1. Математические модели и алгоритмы распределенной системы поддержки формирования решений балансовых задач

5.1.1. Формальное описание алгоритмов формирования частных и сводных балансов и их свойства. Рассмотрим класс задач формирования решений балансовых уравнений, определяемых следующими условиями.

Ограничение на множество допустимых решений задается в виде

$$Ax \in B, \quad (5.1)$$

где B — выпуклое множество в пространстве «ресурсы–продукты» ($\{B\}$). Далее для простоты изложения ограничимся рассмотрением системы вида (хотя полученные результаты справедливы и для системы (5.1))

$$\underline{b} \leq Ax \leq \bar{b}, \quad (5.2)$$

где $x = (x_i)$, $i \in I$ — вектор решения в пространстве переменных ($\{X\}$); $\bar{b} = (\bar{b}_p)$, $\underline{b} = (\underline{b}_p)$, $p \in P$ — вектора ограничений в пространстве «ресурсы–продукты» ($\{B\}$); $A = (a_{i,p})$, $i \in P$ — матрица коэффициентов.

Решение x будем считать согласованным, если оно является допустимым решением системы (5.2), и несогласованным — в противном случае.

Введем меру несогласованности $F(x)$. Будем рассматривать выпуклые по x функционалы $F(x)$; например,

$$F(x) = \|Ax - b\| \quad \text{или} \quad F(x) = \min_Y \{\|x - y\| \mid \underline{b} \leq Ax \leq \bar{b}\},$$

где $\|\cdot\|$ — любая норма (далее для определенности рассматривается евклидова норма).

В ряде случаев в системе (5.2) естественным образом можно выделить ряд локальных подсистем

$$\underline{b}^{(s)} \leq A^{(s)} x \leq \bar{b}^{(s)}, \quad (5.3)$$

где $s = 1, 2, \dots, S$ — индекс подсистемы, $A^{(s)}$ — матрица, состоящая из p -х строк матрицы A , $p \in P_s$, $\bigcup_{s=1}^S P_s = \{1, 2, \dots, m\}$, $\underline{b}^{(s)}$, $\bar{b}^{(s)}$ — подвектора векторов $\underline{b}$, $\bar{b}$ с индексами из P_s .

С подсистемами (5.3) могут работать разные специалисты (как последовательно, так и параллельно во времени).

Обозначим через x допустимое решение подсистемы (5.3), а через $X^{(s)}$ множество ее допустимых решений:

$$X^{(s)} = \{x \mid \underline{b}^{(s)} \leq A^{(s)} x \leq \bar{b}^{(s)}\}.$$

Определим оператор проектирования π_s на подмножество ограничений P_s :

$$\pi_s(x) = \text{Arg min} \{\|x - y\| \mid y \in X^{(s)}\}.$$

Введем расстояние от точки x до точки $\pi_s(x)$, удовлетворяющей всем ограничениям подсистемы (5.3): $\rho_s(x) = \|x - \pi_s(x)\|$.

Те же понятия для системы в целом (5.2) имеют аналогичный вид. Введем $\pi(x)$, $\rho(x)$:

$$\pi(x) = \text{Arg min} \{\|x - y\| \mid \underline{b} \leq Ay \leq \bar{b}\},$$

$\rho(x) = \|x - \pi(x)\|$, где $\|\cdot\|$ — евклидова норма.

Рассмотрим кратко общую схему построения и обоснования сходимости алгоритмов.

Общий k -й шаг. Оценим функционал F сверху в виде аддитивной схемы функционалов f_s :

$$F(x) \leq \sum_{s=1}^S f_s(x) \quad (5.4)$$

так, чтобы в точке $x^{(k)}$ неравенство обращалось в равенство, где $f_s(x)$ оценивает сверху несогласованность решения подсистемы (5.3).

После этого будем параллельно решать s -е локальные задачи, минимизируя функции f_s .

Пусть $y_s = \text{Arg min} \{f_s(x)\}$. Если имеется конструктивное правило построения очередного общего приближения решения $\bar{y}$ системы (5.1) по локальным решениям y_s такого, что

$$F(x^{(k)}) = \sum_{s=1}^S f_s(x^{(k)}) > \sum_{s=1}^S f_s(\bar{y}) \geq F(\bar{y}),$$

то, приняв это значение $\bar{y}$ в качестве нового приближения $x^{(k+1)}$, мы получим приближение решения $x^{(k+1)}$ на $(k+1)$ -м шаге с меньшим значением степени несогласованности F .

Замечание. Учитывая выпуклость $F(x)$ по x , можем ускорить сходимость, сделав шаг по направлению от $x^{(k)}$ к $\bar{y}$, например,

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha^* (\bar{y} - x^{(k)}),$$

где $\alpha^* = \text{Arg min } \{F(x^{(k)} + \alpha(\bar{y} - x^{(k)})) \mid \alpha \geq 0\}$.

При такой схеме построения алгоритмов сходимость обеспечивается монотонным убыванием значения несогласованности (функционала $F(x)$), хотя, как обычно, для каждого конкретного типа задач необходим аккуратный учет ее особенностей (формы множества допустимых решений, выбор величины шага и др.).

Отметим еще, что можно установить достаточные условия сходимости в виде условия принадлежности очередного приближения $x^{(k+1)}$ области сходимости $D_k^{(k+1)}$.

Рассмотрим теперь конкретные типы задач формирования сводных балансов (согласования частных балансов) и соответствующие модификации алгоритмов в различных распределенных системах.

5.1.2. Функционально распределенная система. Разбиению на подсистемы $\{s\}$ соответствует разбиение множества ограничений P на подмножества P_s :

$$P = \bigcup_{s=1}^S P_s.$$

Выберем в качестве функции f_s для оценки сверху степени несогласованности решения локальной задачи и определенное выше расстояние $\rho_s(x)$ от точки x до множества допустимых решений (по проекции $\pi_s(x)$). В качестве $F(x)$ возьмем аналогичное расстояние $\rho(x)$ для всей системы (5.1).

Алгоритм А1 (проектирование)

$$x^{(k+1)} = \pi_{s_0}(x^{(k)}), \quad \text{где } s_0 = \text{Arg max } \{\rho_s(x^{(k)})\}.$$

Утверждение 5.1. *Алгоритм А1 (проектирование) сходится со скоростью геометрической прогрессии.*

Утверждение 5.1 широко известно в учебной литературе.

Случай последовательного согласования частных задач соответствует рассмотрению на каждом шаге только одного ограничения (в функционале $F(x)$ (5.4) этому соответствует вырожденный случай одного слагаемого в правой части (5.4)).

Утверждение 5.2. Если на каждом шаге итерационного алгоритма $x^{(k+1)} = \pi_{s_0}(x^{(k)})$ значение $x^{(k+1)}$ принадлежит области сходимости

$$D(x^{(k+1)}) = \{x \mid \|x - \pi_s(x^{(k)})\| \leq \text{const } \rho_s(x^{(k)})\},$$

то этот алгоритм сходится со скоростью геометрической прогрессии.

Это обосновывает следующий

Алгоритм А2 (последовательное диалоговое согласование частных балансов)

Общий k -й шаг:

- а) Выполняется (ЭВМ) алгоритм А1 и находится $\tilde{x}^{(k+1)}$;
- б) строится (ЭВМ) в окрестности точки $\tilde{x}^{(k+1)}$; область сходимости $D(x^{(k+1)})$;
- в) пользователем, отвечающим за s_0 -ю подсистему, в диалоге указывается коррекция $\Delta x^{(k+1)} \geq 0$ решения $\tilde{x}^{(k+1)}$;
- г) проверяется (ЭВМ) принадлежность нового решения $\tilde{x}^{(k+1)} = \tilde{x}^{(k+1)} + \Delta x^{(k+1)}$ к области сходимости $D(\tilde{x}^{(k+1)})$. Если $\tilde{x}^{(k+1)} \notin D(x^{(k)})$, то ЭВМ корректирует его так, чтобы $x^{(k+1)}$ лежало на границе области $D(x^{(k)})$.

Утверждение 5.3. Алгоритм А2 сходится со скоростью геометрической прогрессии.

Доказательство следует из утверждений 5.1, 5.2 и построения алгоритма.

Алгоритм А3 (параллельное диалоговое согласование частных балансов)

Общий k -й шаг:

- а) Формируются (ЭВМ) проекции точки $x^{(k)}$ на все подсистемы $\{s\}$ и находятся значения $\tilde{x}_s^{(k+1)}$;
- б) в каждой подсистеме s выполняются шаги б), в) и г) алгоритма А2 и формируются точки $x_s^{(k+1)}$ для всех s ;
- в) по значениям локальных решений $x_s^{(k+1)}$ определяется значение $x^{(k+1)} = \bar{y}$ для системы в целом, например, по формуле

$$x^{(k+1)} = \sum_{s=1}^S \beta_s x_s^{(k+1)}, \quad \beta_s \geq 0, \quad \sum_{s=1}^S \beta_s = 1.$$

Конкретизируем описанную выше общую схему применительно к рассматриваемому классу задач.

В качестве функционалов f_s оценки несогласованности локальных задач (s) выберем квадратичные, выпуклые вниз функционалы, имеющие единственный минимум в виде

$$f_s(x) = (x - y^{(s)})^T V (x - y^{(s)}) + u_s, \quad (5.5)$$

где x — текущее приближение к решению ($x = x^{(k)}$ на k -м шаге), $y^{(s)}$ — локально-оптимальное решение s -й задачи

$$y^{(s)} = \text{Arg min } \{f_s(x) | x \in X^{(s)}\}, \quad (5.6)$$

X_s^0 определяется (5.3), V_s — симметричная неотрицательно определенная матрица: если $V_s = E$ (единичной матрице), то $f_s = \rho_x$, характеризующее невязку решений расстояние до множества допустимых решений в пространстве переменных x .

Если $V = (A^{(s)})^T A^{(s)}$, где $A^{(s)}$ определяется (5.3), то $f_s = \rho_B$, характеризующее невязку правых частей расстояние до множества допустимых решений системы (5.3) в пространстве «ресурсы–продукты» ($\{B\}$); u^s — константа, определяемая из условия $u^s = \min_X f(x)$.

Выберем оператор перехода к решению системы $\bar{y}$ от решений $y^{(s)}$ подсистем (5.2) в виде

$$\bar{y} = V^{-1} \sum_{s=1}^S V_s y^{(s)}. \quad (5.7)$$

В пространстве переменных ($\{X\}$) это означает, что

$$\bar{y} = S^{-1} \sum_{s=1}^S y^{(s)}. \quad (5.8)$$

В пространстве «ресурсы–продукты» ($\{B\}$)

$$\bar{y} = \left(\sum_{s=1}^S (A^{(s)})^T A^{(s)} \right)^{-1} \sum_{s=1}^S (A^{(s)})^T A^{(s)} y^{(s)},$$

$$b^{(s)} = A^{(s)} y^{(s)}.$$

Утверждение 5.4. Алгоритм АЗ при условиях (5.5)–(5.7) сходится.

Доказательство. По построению алгоритма АЗ на каждой его итерации по каждой подсистеме (s) формируются алгоритмом А2 локальное решение $x^{(s)}$ и общее решение

$$x^{(k+1)} = \bar{y} = V^{-1} \sum_{s=1}^S V_s x^{(k,s)}.$$

Тогда алгоритм сходится, если степень несогласованности $F(x^k)$ монотонно уменьшается на каждом шаге k :

$$F^{(k+1)} = F(x^{(k+1)}) = F(\bar{y}) < F^{(k)} = F(x^{(k)}) = F(x),$$

т. е. если выполняется условие

$$F(\bar{y}) = F(x) \quad \text{при} \quad x = x^* = \operatorname{Arg} \min \{F(x) | x\},$$

$$F(\bar{y}) < F(x) \quad \text{при} \quad x \neq x^*.$$

Докажем последние соотношения, используя условия (5.5)–(5.7).

Покажем сначала, что $F(x)$ — квадратичная функция, если $f_s(x)$ квадратичны (5.5). Прямой подстановкой (5.5) в (5.4) получаем

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^S f_s(x) &= \sum_{s=1}^S ((x - y^{(s)})^T V_s (x - y^{(s)}) + u_s) = \\ &= \sum_{s=1}^S x^T V_s x - 2 \sum_{s=1}^S x^T V_s y^{(s)} + \sum_{s=1}^S (y^{(s)})^T V_s y^{(s)} + \sum_{s=1}^S u_s = \\ &= x^T V x - 2 x^T V \bar{y} + \sum_{s=1}^S (y^{(s)})^T V_s y^{(s)} + \sum_{s=1}^S u_s = \\ &= (x - \bar{y})^T V (x - \bar{y}) + \sum_{s=1}^S (y^{(s)})^T V_s y^{(s)} + \sum_{s=1}^S u_s - (\bar{y})^T V \bar{y}. \end{aligned}$$

Таким образом, $F(x)$ квадратична и имеет вид

$$F(x) = (x - \bar{y})^T V (x - \bar{y}) + \text{const},$$

для которого известно, что ее минимум достигается в точке $x = \bar{y}$,

т. е.

$$F(\bar{y}) < F(x) \quad \text{при} \quad x \neq \operatorname{Arg} \min \{F(x) | x\},$$

$$F(\bar{y}) = F(x) \quad \text{при} \quad x = \operatorname{Arg} \min \{F(x) | x\},$$

что и требовалось доказать.

5.1.3. Линейно распределенная система. Разбиению на подсистемы $\{s\}$ соответствует разбиение множества переменных I на подмножества I_s :

$$I = \bigcup_{s=1}^S I_s, \quad I_{s_1} \cap I_{s_2} = \emptyset \quad \text{при} \quad s_1 \neq s_2.$$

Алгоритм А4

а) Формируется начальное приближение $x^{(0)}$ решения (например, $x^{(0)}$ — базовый существующий вариант, или $x = x^{\text{нл}}$, или $x = x^{\text{мин}}$ и т. д.) и определяется невязка: $\Delta b^{(0)} = b - Ax^{(0)}$;

б) невязки $\Delta b^{(k)}$ распределяются между подсистемами $\{s\}$, например, пропорционально $\Delta b_s^{(k)} = \alpha_s \Delta b^{(k)}$:

$$\alpha_s = b_s^{(k)} / b^{(k)}, \quad b_s^{(k)} = \sum_{i \in I_s} a_i x_i, \quad b^{(k)} = \sum_{i \in I} a_i x_i; \quad (5.9)$$

в) подзадача $A_s x_s = b_s^{(k)} + \Delta b_s^{(k)}$ решается алгоритмом А1, А2 или А3 и находится значение $x_s^{(k+1)}$, где A_s и x_s — подматрица и подвектор матрицы A и вектора x с индексами столбцов и компонент из I_s ;

г) общее решение задачи формируется по условию

$$x_i^{(k+1)} = y_i = x_i^{(k+1,s)}.$$

Утверждение 5.5. Алгоритм А4 при условиях (5.5)–(5.7) сходится.

Доказательство. Рассмотрим оценку несогласованности решений в пространстве $\{B\}$. На каждом k -м шаге распределим ресурс $\{b\}$ по s -м подсистемам $b^{(s)}$ по правилу (5.8) алгоритма А4. Затем решим каждую s -ю задачу алгоритмом А3. В соответствии с утверждением 5.4 полученное решение $x_i^{(k+1,s)}$ локальной задачи приводит к снижению несогласованности $\delta_s > 0$, т. е. $\|\Delta b_s^{(k+1)}\| = \|\Delta b_s^{(k)}\| - \delta_s^{(k)} < \|\Delta b_s^{(k)}\|$.

Тогда алгоритм А4 сходится, если общий функционал $F(x)$ несогласованности решения системы в целом является монотонно убывающей функцией:

$$\begin{aligned} F^{(k+1)} = F(x^{(k+1)}) &= \|Ax^{(k+1)} - b\| \leq \|Ax^{(k)} - b\| - \sum_{s=1}^S \delta_s = \\ &= F(x^{(k)}) - \sum_{s=1}^S \delta_s = \|\Delta b^{(k)}\| - \sum_{s=1}^S \delta_s. \end{aligned}$$

Докажем, что оно выполняется. Поскольку $\|\cdot\|$ — евклидова норма, то она в пространстве правых частей b индуцирует метрику (и, следовательно, выполняется неравенство треугольника).

Так как по построению все $\Delta \tilde{b}_s$ коллинеарны, то (вследствие неравенства треугольника) для любого другого набора $\Delta \tilde{b}_s$ такого, что $\|\Delta \tilde{b}_s\| \leq \|\Delta b_s\| - b_s$, верно $\left\| \sum_{s=1}^S \Delta \tilde{b}_s \right\| \leq \left\| \sum_{s=1}^S \Delta b_s \right\| - \sum_{s=1}^S \delta_s$. Учитывая тот факт, что $Ay - b = \sum_{s=1}^S (A_s y_s - A_s x_s - \Delta b_s)$, получаем справедливость рассматриваемого соотношения и утверждения 5.5.

5.1.4. Учет особенностей сбалансированного роста при самофинансировании. В условиях хозрасчета народнохозяйственное объединение (НХО) должно само зарабатывать средства на свое развитие. В связи с этим становится актуальной задача построения устойчивых оптимальных траекторий развития, где под устойчивой оптимальной траекторией здесь понимается траектория, обеспечивающая наиболее быстрое развитие НХО и не имеющая «скачков» при малом изменении внешней обстановки.

При планировании развития НХО приходится решать динамическую задачу (5.10)–(5.15):

$$\sum_{j=1}^n a_j^{t,r} x_j^t \leq \rho^t \otimes \sum_{j=1}^n a_j^{t-1,p} x_j^{t-1}, \quad (5.10)$$

$$x^t \leq 0, \quad (5.11)$$

$$a_j^t \in P_j^t, \quad (5.12)$$

$$\sum_{t=1}^T (c^t, x^t) \rightarrow \max, \quad (5.13)$$

$$(c^t, x^t) \rightarrow \max, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (5.14)$$

$$c^t \in C^t, \quad (5.15)$$

где $a_j^{t,r}$ — вектор-столбец удельных показателей затрат ресурсов в плановом периоде t мощностью (переменной) j -го типа; $a_j^{t,p}$ — вектор-столбец удельной производительности в плановом периоде t мощностью x_j^t (j -й переменной) j -го типа; $(a_j^t) = ((a_j^{t,p}) : (a_j^{t,r}))$; $A^t = a_1^t, \dots, a_n^t$; P_j^t — выпуклое множество; c^t — линейный критерий в плановом периоде t (например, вектор прибылей на единицы j -х мощностей); $\otimes$ — оператор покомпонентного умножения векторов; ρ^t — вектор-столбец отчислений различных видов прибыли на развитие; C^t — выпуклое множество.

Однако при выполнении некоторых условий можно переходить от задачи (5.10)–(5.15) к задачам (5.10)–(5.12), (5.14), (5.15) (к квазидинамической постановке) без потери качества решения в смысле функционалов (5.13), (5.14).

Предполагается, что НХО получает валовый доход в виде вектора размерности m (например, различные виды платежных средств), из которого часть идет на производство (доля ρ_i от i -го вида дохода), а остальное — на другие статьи расходов (социальные нужды). Требуется определить, при каких условиях сформированные прогнозные варианты развития НХО будут инвариантными (устойчивыми) к выбору функционалов c^t из множеств C^t .

Обозначим:

$$K_+^t = \left\{ \sum_{j=1}^n a_j^{t,r} x_j^t \mid x_j^t \geq 0 \right\}, \quad K_-^t = \left\{ \sum_{j=1}^n a_j^{t,r} x_j^t \mid x_j^t \leq 0 \right\}.$$

Сделаем предположения о выполнении следующих свойств модели:

Свойство 5.1 (комплектность потребления). В t -м плановом периоде потребляются все средства, выделенные на развитие производства:

$$\sum_{j=1}^n a_j^{t,r} x_j^t = \rho^t \otimes \sum_{j=1}^n a_j^{t-1,p} x_j^{t-1}.$$

Свойство 5.1 означает, что НХО не производит ненужных продуктов. При выполнении свойства 5.1 конуса оптимальных функционалов вершин многогранника допустимых по ресурсам состояний НХО сливаются в один большой конус. Следующие свойства 5.2 и 5.3 означают, что множество оптимальных функционалов c^t есть линейная свертка функционалов по каждому виду продукта (свойство 5.2) или ресурса (свойство 5.3).

Свойство 5.2

$$C^t \subseteq \left\{ \gamma^{t,p} \left(\sum_{i=1}^m \rho_i^t \beta_i^t a_i^{t,p} \right) \mid \gamma^{t,p} \in \Gamma^{t,p}, \rho_i^t \geq 0, \beta_i^t \in B^{t,p} \right\},$$

где $a_i^{t,p}$ — i -я строка матрицы $A^{t,p}$, $B^{t,p}$, $\Gamma^{t,p}$ — выпуклые множества.

Свойство 5.3

$$C^t \subseteq \left\{ \gamma^{t,p} \left(\sum_{i=1}^m \beta_i^t a_i^{t,r} \right) \mid \gamma^{t,r} \in \Gamma^{t,r}, \beta^t \in B^{t,r} \right\},$$

где $a_i^{t,r}$ — i -я строка матрицы $A^{t,r}$, $B^{t,r}$, $\Gamma^{t,r}$ — выпуклые множества.

Свойства 5.2, 5.3 обеспечивают инвариантность оптимального варианта по критериям (5.13), (5.14) развития НХО к изменению структуры цен на продукты (свойство 5.2) и ресурсы (свойство 5.3).

Свойство 5.4. *Отсутствуют производственные мощности, которые хуже других по всем параметрам*

$$K_+^{t+1} \cap K_-^{t+1} = 0,$$

т. е. если j -я мощность не выдерживает конкуренции, то она демонтируется.

Все, что произведено в плановом периоде t (свойства 5.5, 5.6) и выделено на развитие производства в плановом периоде $t+1$, может быть использовано в плановом периоде $t+1$ (иначе говоря, не производится ненужной продукции).

Свойство 5.5

$$\left(\rho^t \otimes a_j^{t,p} - k_j^{\max,t} a_j^{t+1,r} \right) \in K_+^{t+1}.$$

Свойство 5.6

$$\left(\rho^t \otimes a_j^{t,p} - k_j^{\min,t} a_j^{t+1,r} \right) \in K_-^{t+1}.$$

Свойства 5.7, 5.9 описывают допустимые ограничения на структуру цен на продукты в плановом периоде t .

Свойство 5.7

$$B^{t,p} \subseteq \left\{ \beta^{t,p} \mid 0 \leq \beta_{\min}^{t,p} \leq \beta^{t,p} \leq \beta_{\max}^{t,p}, \sum_{i=1}^m \beta_i^{t,p} = 1 \right\}.$$

Свойства 5.8, 5.10 описывают допустимые ограничения на структуру цен на ресурсы в плановом периоде t .

Свойство 5.8

$$B^{t,r} \subseteq \left\{ \beta^{t,r} \mid 0 \leq \beta_{\min}^{t,r} \leq \beta^{t,r} \leq \beta_{\max}^{t,r}, \sum_{i=1}^m \beta_i^{t,r} = 1 \right\}.$$

Свойство 5.9

$$\Gamma^{t,p} = \{\gamma^t \mid \gamma^t \geq 0\}.$$

Свойство 5.10

$$\Gamma^{t,r} = \{\gamma^t \mid \gamma^t \geq 0\}.$$

Допустимые изменения структуры цен в будущем должны быть заложены с самого начала (в свойствах 5.2, 5.3).

Свойство 5.11.

$$B^{t+1,r} \subseteq B^{t,p} \subseteq B^{t,r}.$$

При выполнении этих условий можно без потери качества решения (по функционалам (5.13), (5.14)) переходить от динамической постановки задачи формирования вариантов развития НХО к квазидинамической постановке. Формально это означает, что если мы в плановом периоде находимся в вершине многогранника допустимых по ресурсам состояний НХО, то и в плановый период $t+1$ мы тоже сможем попасть в вершину.

Достаточными условиями существования траектории являются следующие условия.

Теорема 5.1. Если для любого t выполняются свойства 5.2, 5.3, 5.4, 5.7–5.10 и для всех j верно $\rho^t \otimes a_j^{t,p} \in K_+^{t+1}$, то существует такая оптимальная по функционалам траектория (5.13), (5.14), что выполняется свойство 5.1, и ее можно строить квазидинамически последовательно по плановым периодам $t = 1, 2, \dots, T$.

Доказательство. Из свойства 5.3 следует, что для оптимальной траектории должно выполняться свойство 5.1 и

$$(c^t, x^t) = \gamma^{t,r} \sum_{i=1}^m \beta_i^{t,r} b_i^{t,r},$$

где $b_i^{t,r}$ — ресурс i -го типа, потребленный в плановом периоде t .

Из свойства 5.2 следует

$$(c^t, x^t) = \gamma^{t,p} \sum_{i=1}^m \rho_i^t \beta_i^{t,p} b_i^{t,p} = \gamma^{t,p} \sum_{i=1}^m \beta_i^{t,p} b_i^{t+1,r}.$$

Теперь из свойства 5.11 и $(c^t, \tilde{x}^t) = \max$ следует существование $\tilde{x}^{t+1}$ и $\tilde{A}^{t+1}$ таких, что $(c^{t+1}, \tilde{x}^{t+1}) = \max$. Теорема 5.1 доказана.

Теорема 5.2. Если при условии теоремы 5.1 для каждого вектора $a_j^{t,p}$ существуют такие векторы $a_{j,\max}^{t+1,r}$, $a_{j,\min}^{t+1,r}$ и числа $k_j^{\max,t}$, $k_j^{\min,t}$, $t = 1, 2, \dots, T$, что выполняются свойства 5.5, 5.6, то для оптимальной траектории $\{A^t, x^t\}$, $t = 1, 2, \dots, T$, выполняется условие

$$0 \leq k^{\min,t} \otimes x^t \leq x^{t+1} \leq k^{\max,t} \otimes x^t. \quad (5.16)$$

Теорема 5.2 следует из леммы 5.1.

Лемма 5.1. Если $l \in K_+^t + A_{\min}^{t,r} k^{\min,t}$, $l \in K_-^t + A_{\max}^{t,r} k^{\max,t}$, $0 \leq k^{\min,t} \leq k^{\max,t}$, $a_{\min,j}^t \in P_j^t$, $a_{\max,j}^t \in P_j^t$, то существуют k^t , A^t такие, что верно $0 \leq k^{\min,t} \leq k^t \leq k^{\max,t}$, $a_j^t \in P_j^t$, и $A^{t,r} k^t = l$.

5.2. Формальное описание алгоритмов

5.2.1. Алгоритм системной оптимизации. К классу задач системной оптимизации относятся задачи, в которых возникает проблема выбора не только значений неизвестных переменных, но и параметров модели, включая элементы матрицы коэффициентов и значения правых частей ограничений.

К этому классу относятся, например, задачи отраслевого перспективного планирования, формально представимые в виде

$$\Phi \geq \Phi^{\text{дир}}, \quad (5.17)$$

$$\Phi = D x, \quad (5.18)$$

$$A x \leq B, \quad (5.19)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max}, \quad (5.20)$$

$$A \in F_A, \quad (5.21)$$

$$B \in F_B. \quad (5.22)$$

Здесь x есть n -мерный вектор вводимых мощностей, Φ — l -мерный вектор продуктов отрасли, $\Phi^{\text{дир}}$ — вектор потребностей, D — матрица $l \times n$ удельных коэффициентов использования мощности, B — вектор ресурсов, A — матрица $m \times n$ коэффициентов удельных расходов ресурсов, F_A и F_B — области возможных значений параметров модели.

Ограничения (5.17), (5.18) определяют потребности в продукции отрасли на перспективу. Ограничения (5.19), описывающие возможности отрасли, могут сильно варьироваться как за счет дополнительных поставок ресурсов (вектор B), так и за счет влияния научно-технического прогресса (матрица A).

Уточним особенности рассматриваемого класса задач. Основной особенностью является наличие целевой установки в форме траектории наиболее предпочтительных решений в пространстве продуктов Γ_Φ или (и) в пространстве мощностей Γ_x :

$$\Gamma_\Phi(\lambda) = \left\{ \Phi \mid \Phi_j = \gamma_j(\lambda), j = 1, 2, \dots, l \right\},$$

$$\Gamma_x(\lambda) = \left\{ \Phi \mid x_j = x_j(\lambda), j = 1, 2, \dots, l \right\}.$$

В этом случае задача поиска решения, наиболее близкого по траектории к желаемому $\Phi^{\text{дир}}$, сводится к следующей задаче математического программирования.

Задача 1

$$\lambda \rightarrow \max, \quad (5.23)$$

$$\Phi \in \Gamma_\Phi(\lambda), \quad (5.24)$$

где параметр λ характеризует степень приближения к цели, причем на Φ накладываются дополнительные ограничения.

В дальнейшем будем рассматривать ситуацию, когда траектория $\Gamma(\lambda)$ задана в кусочно-линейном виде (в виде ломаной) с узлами в точках $s = 1, 2, \dots, m$:

$$\Gamma_\Phi(\lambda) = \left\{ \Phi \mid \Phi = \Phi^{s-1} + \lambda_s (\Phi^s - \Phi^{s-1}), \lambda = \lambda + \lambda_s, \lambda_s \in [0, 1] \right\}. \quad (5.25)$$

Второй особенностью рассматриваемого класса задач является специальный вид областей F_A и F_B возможных значений элементов матрицы A удельных расходов ресурсов и вектора B ресурсов. Конкретизируем эти области. Заметим, что каждый столбец $a_i = (a_{1,i}, \dots, a_{m,i})$ матрицы A имеет смысл коэффициентов удельных расходов ресурсов i -й технологией, где под технологией имеется в виду комплекс оборудования, обеспечивающий производство конечного продукта. В связи с этим исключение какой-либо технологии из плана не влияет на значения техникоэкономических показателей остальных технологий. Тогда естественной является следующая гипотеза.

Гипотеза 5.1. Области возможных значений параметров a_i различных технологий не зависят друг от друга. Иными словами, область возможных значений элементов матрицы A имеет вид

$$F_A(A) = \left\{ A \mid A = \|\tilde{a}_i\|, i = 1, \dots, n \ \& \ \tilde{a}_i \in S_i, i = 1, \dots, k_i \right\}. \quad (5.26)$$

В зависимости от того, учитывается НТП на уровне укрупненных технологий или на уровне конкретных технологий, области S будут иметь различный вид:

$$S_i = \{a_i^1, \dots, a_i^j, \dots, a_i^{k_i}\}, \quad (5.27)$$

$$S_i = \left\{ a_i \mid a_i = \sum_{j=1}^{k_i} \gamma_i^j a_i^j, \gamma_i^j \in [\underline{\gamma}_i^j, \overline{\gamma}_i^j] \mid, \gamma_i^j \geq 0, \sum_{j=1}^{k_i} \gamma_i^j = 1 \right\}, \quad (5.28)$$

Условие (5.27) соответствует выбору технологии i -го типа из дискретного набора k_i конкурирующих между собой технологий a_i^j (МГДЭС, ПГУ и т. д.). Таким образом, условие (5.12) описывает учет НТП на уровне конкретных технологий. Условие (5.12) соответствует выбору из области возможных значений укрупненных технологий, образуемых комбинацией конкретных технологий i с различными долями x_i использования. Область F_B возможных значений вектора правых частей ограничений определяется ограничениями вида

$$B = B^0 + \Delta B, \quad (5.29)$$

$$B \geq B^{\min}, \quad (5.30)$$

$$\sum_{p=1}^m \alpha_p \Delta B_p = \Delta K. \quad (5.31)$$

Эти условия содержательно означают возможность перераспределения имеющихся в наличии ресурсов B^0 и распределения дополнительно выделенных средств ΔB (в денежном исчислении) по статьям расходов. Параметры α_p имеют смысл удельных капиталовложений в производство ресурса p -го типа, например в добычу топлива, необходимого для электростанций.

Заметим, что в реальных условиях при планировании на перспективу дефицит ресурсов по отношению к запросу обычно составляет 20–30 %. В этих условиях может стать существенной зависимость удельных капиталовложений в добычу ресурсов α_p от

объема поставок ресурсов ΔB_p , т. е.

$$\alpha_p = \alpha_p(\Delta B_p), \quad p = 1, \dots, m.$$

На практике обычно ограничиваются линейным приближением

$$\alpha_p = \alpha_p^0 + \delta_p(\Delta B_p), \quad (5.32)$$

где

$$\delta_p = \frac{\partial \alpha_p(\Delta B_p)}{\partial (\Delta B_p)} \geq 0. \quad (5.33)$$

В случае, если из общего количества ресурса R (в денежном исчислении) часть средств ΔK_n расходуется на научные исследования и опытно-конструкторские работы, имеют место ограничения

$$R = \Delta K + \Delta K_n, \quad (5.34)$$

$$\Delta K_n = \sum_{i=1}^n f_i(a_i). \quad (5.35)$$

Величины $f_i(a_i)$ имеют смысл затрат на НИОКР по технологии i (например, на разработку МГДЭС-500).

В случае, если учитываются средства ΔK_m , необходимые для производства различного оборудования, нужного отрасли, т. е. средства, выделенные на развитие машиностроения, добавляются ограничения

$$\sum_{i=1}^n \delta_i x_i^{\max} \leq \Delta K_m, \quad (5.36)$$

где δ_i имеют смысл удельных капиталовложений в производство оборудования по i -й технологии.

Исследуем основные свойства задачи 1. Будем предполагать, что траектория обладает рядом естественных свойств.

Гипотеза 5.2. Если в условиях задачи 1 точка $\Gamma(\lambda_1)$ траектории допустима, то допустима и любая точка траектории с меньшим значением параметра $\Gamma(\lambda_2)$, где $\lambda_2 < \lambda_1$.

Свойство 5.12. В условиях гипотезы 5.2 решение задачи 1 сводится к решению последовательности задачи 2 для нескольких линейных отрезков кусочно-линейной траектории.

Задача 2

$$\lambda \rightarrow \max, \quad (5.37)$$

$$x = x^{s-1} + \lambda \Delta x^{nd}, \quad (5.38)$$

$$\Delta x^{нл} \in \hat{X}^{нл} = \{x \mid D x = \Phi^s - \Phi^{s-1}\}, \quad (5.39)$$

$$x^{s-1} \in X^{s-1} = \{x \mid D x = \Phi^{s-1}\}, \quad (5.40)$$

$$A x \leq B, \quad (5.41)$$

$$x \geq 0, \quad (5.42)$$

$$A \in F_A, \quad (5.43)$$

$$B \in F_B. \quad (5.44)$$

Свойство 5.12 позволяет решать исходную задачу 1 в пространстве фазовых переменных X , а результаты решения представлять для анализа ЛПР (лицу, принимающему решение) в категориях показателей Φ .

Введем обозначения, удобные для описания перемещения вдоль траектории. Пусть

$$B_p^n = \sum_{i=1}^n a_{p,i} x_i^{s-1}, \quad (5.45)$$

$$\Delta B_p^{нл} = \sum_{i=1}^n a_{p,i} x_i^{нл}, \quad (5.46)$$

где B_p^n и $\Delta B_p^{нл}$ — запрос ресурсов в начальной точке траектории x^{s-1} и при переходе из x^{s-1} в точку идеала $x^s + \Delta x^{нл}$ ($\Delta x^{нл} = x^{нл} - x^{s-1}$).

Тогда показатель дефицитности λ_p ограничения, соответствующего ресурсу p -го вида, будет равен отношению имеющегося в наличии ресурса B_p^n к запросу ресурса, необходимого для перехода из точки траектории x^{s-1} в точку $x^{s-1} + \Delta x^{нл}$. Показатель дефицитности λ_p задается соотношением

$$\lambda_p = \frac{B_p^0 - B_p^{нл}}{\Delta B_p^{нл}}. \quad (5.47)$$

Определение 5.1. Ограничения с минимальным уровнем дефицитности будем называть существенными. Множество существенных ограничений будем обозначать

$$P^0 = \{p_0 \mid \lambda_{p_0} = \min_p \lambda_p\}. \quad (5.48)$$

Определение 5.2. Ограничения будем называть сбалансированными на уровне λ , если они имеют одинаковый показатель дефицитности, равный λ . Множество сбалансированных на уровне λ ограничений будем обозначать

$$P^\lambda = \{p \mid \lambda_p = \lambda\}. \quad (5.49)$$

Отметим, что если траектория задана в фазовом пространстве X , т. е. когда x^{s-1} и $\Delta x^{нд}$ фиксированы, имеет место свойство, согласно которому степень достижения цели λ^* равна показателю дефицитности существенных ограничений, т. е. ограничений с наиболее дефицитными ресурсами.

Гипотеза 5.3. Движение вдоль траектории в сторону увеличения параметра траектории при фиксированных значениях элементов A (в отсутствие НТП) требует дополнительных затрат ресурсов (т. е. $\Delta B^{нд} > 0$).

Свойство 5.13. При изменении параметров B и A , $B = B^0 + \Delta B$, $A = A^0 + \Delta A$ изменения показателя дефицитности p -го ограничения определяется выражением

$$\Delta \lambda_p = - \frac{-\Delta B_p + \sum_{i=1}^n \Delta a_{p,i} (x_i^{s-1} + \lambda_p \Delta x_i^{нд})}{\Delta B_p^{нд} + \Delta(\Delta B_p^{нд})}. \quad (5.50)$$

Следствие 1. При изменении элементов A и B от A^0, B^0 до $A^0 - \Delta A, B^0 + \Delta B$ необходимым и достаточным условием возрастания показателя дефицитности λ_p ограничения, соответствующего ресурсу p -го вида, является условие

$$\Delta B_p - \sum_{i=1}^n \Delta a_{p,i} (x_i^{s-1} + \lambda_p \Delta x_i^{нд}) > 0.$$

Следствие 2. Чувствительность показателя дефицитности p -го ограничения к изменению параметров B и A определяется выражениями

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda_p}{\partial B_q} &= 0, \quad p \neq q, \quad \frac{\partial \lambda_p}{\partial B_p} = \frac{1}{\Delta B_p^{нд}}, \\ \frac{\partial \lambda_p}{\partial a_{q,i}} &= 0, \quad q \neq p, \\ \frac{\partial \lambda_p}{\partial a_{p,i}} &= - \frac{x_i^{s-1} + \lambda_p x_i^{нд}}{\Delta B_p^{нд}}. \end{aligned} \quad (5.51)$$

Доказательство следствия 2 вытекает непосредственно из формулы (5.47) (так как $\Delta B_p^{нд} > 0$).

Определение 5.3. Будем говорить, что область F_B возможных значений компонент вектора B допускает комплектные поставки ресурсов при некотором фиксированном значении A^* параметра A , если существует такой вектор $B^* \in F_B$, что все ограничения будут сбалансированы на одном уровне. Соответствующие поставки ресурсов (вектор B) будем называть комплектными.

Свойство 5.14. Пусть множество ограничений P сбалансировано на уровне λ_1 , т. е. $P = P^{\lambda_1}$. Для того чтобы при изменении параметра B от B^0 до $B^0 + \Delta B$ ограничения из P остались сбалансированными, т. е. $P = P^{\lambda_2}$, где λ_2 — новый уровень сбалансированности, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\sum_{p \in P} \alpha_p \Delta B_p}{\sum_{p \in P} \alpha_p \Delta B_p^{н\Delta}}, \quad (5.52)$$

$$\Delta B_p = (\lambda_2 - \lambda_1) \Delta B_p^{н\Delta}, \quad p \in P. \quad (5.53)$$

Доказательство. Необходимость. Пусть при $B = B^0 + \Delta B$ их ограничения P стали сбалансированными на уровне λ_2 , тогда из свойства 5.14 следует (5.53). Просуммировав по $p \in P$, получим (5.52).

Достаточность. Пусть выполняются (5.52), (5.53). Из свойства 5.13 следует, что $\lambda_p + \Delta \lambda_p = \lambda_2$ для любого $p \in P$, т. е. $P = P^{\lambda_2}$.

Свойство 5.14 позволяет распределять ресурс $\Delta K = \sum_{p \in P} \alpha_p \Delta B_p$ между ограничениями так, чтобы сохранялась их сбалансированность. Содержательно свойство 5.14 означает, что ресурсы должны распределяться пропорционально запросам $\Delta B_p^{н\Delta}$.

Свойство 5.15. При фиксированном значении параметров x^0 , $x^{н\Delta}$, A необходимым и достаточным условием оптимальности решения $\langle x^*, B^*, \lambda^* \rangle$ задачи 2 является выполнение условий

$$\lambda^{**} = \frac{\Delta K + \sum_{p \in P^2} \alpha_p (B_p^0 - B_p^n) + \sum_{p \in P^1} \alpha_p (B_p^0 - B_p^{\min})}{\sum_{p \in P^2} \alpha_p \Delta B_p^{н\Delta}}, \quad (5.54)$$

$$B_p^* = B_p^{\min}, \quad p \in P^1, \quad (5.55)$$

$$B_p^* = \lambda^* \frac{\Delta B_p^{нл}}{B_p^n}, \quad p \in P^2, \quad (5.56)$$

$$x^* = x^0 + \lambda^* \Delta x^{нл}, \quad (5.57)$$

где B_p^n , $\Delta B_p^{нл}$ определяются согласно (5.45), (5.46), а P^1 и P^2 имеют вид

$$P^2 = \left\{ p \mid \frac{B_p^{\min} - B_p^n}{\Delta B_p^{нл}} \leq \lambda^* \right\}, \quad (5.58)$$

$$P^1 = \left\{ p \mid \frac{B_p^{\min} - B_p^n}{\Delta B_p^{нл}} > \lambda^* \right\}. \quad (5.59)$$

Свойство 5.15 означает, что дополнительно выделенные ресурсы ΔK должны распределяться только среди существенных ограничений P^2 , которые должны быть сбалансированы на одном уровне (т. е. поставки ресурсов комплектные). При перераспределении ресурсов по статьям расходов ресурсы должны отбираться из несущественных ограничений P^1 и распределяться среди существенных.

Совершенно аналогично можно показать, что свойство 5.15 будет иметь место и в случае, если удельные капиталовложения в добычу ресурсов α_p линейно зависят от ΔB_p , т. е. если имеет место ограничение (5.59).

Следствие 1. Если при фиксированных значениях A^* , x^{*-1} , $x^{нл}$ область F_B допускает комплектные поставки ресурсов, то для оптимальности решения λ^* , B^* , x^* задачи 2 необходимо и достаточно, чтобы все ограничения были сбалансированы на уровне λ^* , причем справедливы

$$\lambda^* = \frac{\Delta K + \sum_{p=1}^m \alpha_p B_p^0 - \sum_{p=1}^m \alpha_p B_p^n}{\sum_{p=1}^m \alpha_p \Delta B_p^{нл}}, \quad (5.60)$$

$$B_p^* = \lambda^* \Delta B_p^{нл} + B_p^n, \quad p = 1, \dots, m, \quad (5.61)$$

$$x^* = x^0 + \lambda^* \Delta x^{нл}. \quad (5.62)$$

Следствие 2. Если значение удельного коэффициента α_p в увеличении прироста ресурса зависит от ΔB_p , т. е. $\alpha_p = \alpha_p^0 + \delta_p \Delta B_p$, то в условиях свойства 5.13 уровень сбалансированности

λ^* является положительным корнем уравнения

$$G\lambda^2 + B\lambda + C = 0,$$

где

$$G = \sum_{p \in P^2} \delta_p (\Delta B_p^{нл})^2,$$

$$B = \sum_{p \in P^2} (\alpha_p B_p^{нл} + 2\delta_p \Delta B_p^{нл} (B_p^n - B_p^0)),$$

$$C = \sum_{p \in P^2} (\delta_p (B_p^n - B_p^0)^2 + \alpha_p^0 (B_p^n - B_p^0)) - \Delta K.$$

Гипотеза 5.4. Движение вдоль траектории в сторону увеличения параметра траектории не может приводить к уменьшению мощностей в пространстве X , т. е. если точке $x^1 \in X$ соответствует точка $\Gamma(\lambda_1)$ траектории, а точке $x^2 \in X$ — точка $\Gamma(\lambda_2)$ траектории, причем $\lambda_2 > \lambda_1$ то $x_i^2 \geq x_i^1$ ($i = 1, 2, \dots, n$) и $\exists j : x_j^2 > x_j^1$.

Свойство 5.16. Пусть область F допускает комплексные поставки ресурсов для всех значений элементов $A \in F$. Тогда необходимым и достаточным условием оптимальности решения λ^*, x^*, B^*, A^* задачи 2 является сбалансированность всех ограничений на одном уровне λ^* , который определяется первым уравнением в (5.61), причем B^* и x^* определяются выражениями (5.61) и (5.62); $x^{s-1}, x^{нл}$ находятся как решение задачи линейного программирования (5.61), (5.64), а a_i^* , $i = 1, 2, \dots$, определяются как решение задачи математического программирования (5.66):

$$\sum_{i=1}^n \left(x_i \sum_{p=1}^m \alpha_p a_{p,i}^* \right) \rightarrow \min, \quad (5.63)$$

$$x \in X^{s-1},$$

$$\sum_{i=1}^n \left(x_i \sum_{p=1}^m (\alpha_p a_{p,i}^*) \right) \rightarrow \min, \quad (5.64)$$

$$x \in X^{нл}, \quad (5.65)$$

$$\sum_{p=1}^m \alpha_p a_{p,i}^* \rightarrow \min, \quad (5.66)$$

$$a_i \in S_i. \quad (5.67)$$

Свойство 5.17 (о согласованности изменения элементов A). Пусть при $A = A^1$ ограничения r, q имеют показатели дефицитности λ_r^1, λ_q^1 , так что $\lambda_r^1 < \lambda_q^1$, а при $A = A^1 + \Delta A$ соответственно $\lambda_r^1 > \lambda_q^1$. Тогда существует $\gamma^* \in [0, 1]$ такое, что при $A^3 = A^1 + \gamma^* \Delta A$ выполняется $\lambda_r^3 = \lambda_q^3$.

Следствие 1. В условиях свойства 5.13 величина γ^{**} находится как решение уравнения

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_r^1 - \gamma \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_{r,i} x_i^{s-1}}{\sum_{i=1}^n a_{r,i}^1 x_i^{n\Delta}} \right)}{\left(1 + \gamma \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_{q,i} \Delta x_i^{n\Delta}}{\sum_{i=1}^n a_{q,i}^1 \Delta x_i^{n\Delta}} \right)} = \\ = \left(\lambda_q^1 - \gamma \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_{r,i} x_i^{s-1}}{\sum_{i=1}^n a_{r,i}^1 x_i^{n\Delta}} \right) \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_{q,i} \Delta x_i^{s-1}}{\sum_{i=1}^n a_{q,i}^1 \Delta x_i^{n\Delta}} \times \\ \times \left(1 + \gamma \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_{r,i} x_i^{n\Delta}}{\sum_{i=1}^n a_{r,i}^1 x_i^{n\Delta}} \right). \quad (5.68) \end{aligned}$$

Следствие 2. В случае линейного приближения траектории ($x^{s-1} = 0$) величина γ^* в условиях свойства 5.17 определяется из выражения

$$\gamma^* = \frac{\lambda_q^1 - \lambda_r^1}{\lambda_r^1 \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_{q,i} \Delta x_i^{n\Delta}}{\sum_{i=1}^n a_{q,i}^1 \Delta x_i^{n\Delta}} \right) - \lambda_q^1 \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_{r,i} x_i^{n\Delta}}{\sum_{i=1}^n a_{r,i}^1 x_i^{n\Delta}} \right)}. \quad (5.69)$$

Свойство 5.17 позволяет балансировать ограничения за счет изменения элементов матрицы Φ .

Свойство 5.18. Оптимальное решение задачи 2 лежит на множестве Парето $P(F_A)$ области F_A .

Свойство 5.19. Если возможна комплектная поставка ресурсов, то оптимальное решение задачи 1 лежит только на множестве Парето области F_A (необходимое условие оптимальности).

Свойство 5.20:

а) Если F_B и F_A — выпуклые области, а $(\lambda^*, B^*, A^*, x^*)$ — локально-оптимальное решение задачи 2 при фиксированных x^0 , Δx^{nd} , то это решение будет глобально-оптимальным.

б) Если $\tilde{F}(B)$, X^0 , Δx^{nd} — выпуклые области, а λ^{**} , B^{**} , $x^* = x^{0,0} + \lambda^* \Delta x^{nd}$ — локально-оптимальное решение задачи 2 при фиксированных элементах матрицы Φ , то это решение будет глобально-оптимальным.

Это свойство дает возможность построить процедуры, в которых параметры модели B , x^{s-1} , x^{nd} определяются в произвольном порядке (например, сначала A при фиксированном B , затем B при фиксированном A или наоборот).

Рассмотренные свойства задачи 2 носят конструктивный характер и позволяют создать простые, легко интерпретируемые алгоритмы (см. гл. 4) решения задачи 1 как в частных случаях (когда НТП учитывается или нет, на уровне отдельных технологий или на уровне укрупненных технологий, когда возможна или невозможна комплектная поставка ресурсов), так и в общем случае.

5.2.2. Алгоритмы. Рассмотрим сначала алгоритмы для перечисленных частных случаев задачи 2 при фиксированных значениях компонент A , B , $B^{\min}$.

Идея алгоритма оптимального распределения дополнительно выделенных ресурсов и перераспределения имеющихся в наличии средств по статьям расходов при фиксированных значениях A состоит в том, что он на каждом k -м шаге выделяет множество существенных ограничений P^0 по (5.48) и распределяет на них дополнительные ресурсы так, чтобы сохранялась сбалансированность (5.53). При этом показатель дефицитности λ_p этих ограничений увеличивается. Если показатель дефицитности ограничений из P^0 стал больше, чем показатель дефицитности какого-либо ограничения p_1 , $p_1 \in P^0$, то определяется самое дефицитное ограничение из несущественных:

$$p_1 \in P_k^1 = \{ \tilde{p} \mid \lambda_{\tilde{p}} = \min_{p \notin P_k^0} \lambda_p \}. \quad (5.70)$$

Согласно свойству 5.14, для изменения ограничений из P_k^0 выделяется столько ресурсов, сколько необходимо, чтобы их показатель дефицитности сравнялся с показателем дефицитности ограничений из P_k^1 .

Затем происходит расширение множества существенных ограничений $P_{k+1}^0 = P_k^0 \cup P_k^1$ и переход к следующему шагу. Если на

некотором k_0 -м шаге не происходит расширения множества P_k^0 , то это означает, что весь дополнительный ресурс распределен и проверяется возможность перераспределения имеющихся в наличии ресурсов. Для этого у несущественных ограничений отбирается «излишек» ресурсов и распределяется среди существенных. Геометрически процесс работы алгоритма эквивалентен последовательному сдвигу ограничений, приводящему к увеличению λ^* .

Алгоритм 1

Предварительный шаг. Определение возможности сбалансировать ограничения λ^* , B^* , x^* определяется согласно (5.60)–(5.62).

Если B^* удовлетворяет ограничениям (5.29)–(5.31), то алгоритм работу заканчивает, если нет, то полагаем $\Delta K_0 = \Delta K$, λ_0^* , $p_0 \in P_0^0$, где $P_0^0 = P^0$, (определяется согласно (5.48)).

Общий шаг (распределение дополнительного ресурса):

а) Определяем P_k^1 . Если $P_k^1 = \emptyset$, то переходим к шагу г), если $P_k^1 \neq \emptyset$, то

$$\Delta_k = \lambda_1 - \lambda_k^* - \frac{\Delta K_k}{\sum_{p \in P_k^0} \alpha_p \Delta B_p^{n\Delta}};$$

б) если $\Delta_k \geq 0$, то переходим к шагу г), если $\Delta_k < 0$, то переходим к шагу в);

в) $\Delta K_{k+1} = \Delta K_k - (\lambda_1 - \lambda_k^*) \sum_{p \in P_k^0} \alpha_p \Delta B_p^{n\Delta}$,

$P_{k+1}^0 = P_k^0 \cup P_k^1$, $\lambda_{k+1} = \lambda_1$; полагаем $k = k + 1$ и переходим к шагу а);

г) распределение остатка ресурса ΔK_k :

$$\lambda^* = \lambda_k^* + \frac{\Delta K_k}{\sum_{p \in P_k^0} \alpha_p B_p^{n\Delta}}; \quad \lambda_p = \lambda^*, \quad p \in P_k^0;$$

$B_p^* = B_p^0 + (\lambda^* - \lambda_p^0) \Delta B_p^{n\Delta}$, $p \in P_k^0$ и переход к шагу д);

д) перераспределение наличных средств; определение $P^2 = P \setminus P^0$ — множества несущественных ограничений; если

$$\exists p \in P^2 : B_p > B_p^{\min},$$

то алгоритм заканчивает работу; если

$$\exists p \in P^2 : B_p \leq B_p^{\min},$$

то переход к шагу е);

е) снятие ресурсов с несущественных ограничений:

$$\Delta K_0 = \sum_{p \in P^2} (B_p - \max \{ \lambda^* \Delta B_p^{нд}; B_p^{\min} \}),$$

$$\lambda_0^* = \lambda^*, \quad P_0^0 = P_k^0, \quad K = 0,$$

переход к шагу а).

Утверждение 5.6. Алгоритм сходится к оптимальному решению задачи 2 с траекторией вида (5.38) и с фиксированными значениями A , x^0 , $\Delta x^{нд}$ не более чем за $m - m_0 + 1$ шагов, где $m_0 = \text{card } P_0^0$, $m = \text{card } P$ (P — множество всех ограничений).

Заметим, что вид ограничений (5.57), (5.36), определяющий выбор значений $x^{\max}$ — ограничений по машиностроению, формально не отличается от ограничений вида (5.29)–(5.33) при $B^{\min} = 0$.

Следовательно, в этом случае применимо следствие 1 из свойства 5.14, т. е. оптимальные значения $x^{*,\max}$ выбираются по формулам

$$\tilde{\lambda}^* = \frac{\Delta K_m - \sum_{i=1}^n \delta_i x_i^0}{\sum_{i=1}^n \delta_i \Delta x_i^{нд}}, \quad (5.71)$$

$$x^{*,\max} = x^0 + \tilde{\lambda}^* \Delta x^{нд}. \quad (5.72)$$

Для учета ограничений по машиностроению предложен алгоритм 2, идея которого состоит в том, что сначала задача 2 решается только с ограничениями (5.20)–(5.36), затем с ограничениями (5.29)–(5.33), и из полученных решений отбирается решение, допустимое для всех ограничений.

Алгоритм 2

Шаг 1. Учет ограничений по машиностроению. Значения $\tilde{\lambda}^* = x^{*,\max}$ определяются по (5.71).

Шаг 2. Распределение средств по статьям расходов:

- а) алгоритм 1 получает решение $\langle \lambda^*, B^*, x^* \rangle$;
- б) если $\tilde{\lambda}^* \leq \lambda^*$, то полученное решение оптимально и алгоритм работу заканчивает;
- в) если $\tilde{\lambda}^* > \lambda^*$, то формируется новое решение $\lambda^* = \tilde{\lambda}^*$, $x^* = x^{*,\max}$, B^* и алгоритм заканчивает работу.

Утверждение 5.7. *Алгоритм 1 за один цикл (шаги 1, 2) дает оптимальное решение задачи 1 при фиксированных A , x^0 , Δx^{nd} с учетом ограничений (5.36).*

Алгоритм 3

Учет НТП при комплексных поставках ресурсов используется в случае, если область $\tilde{F}(B)$ допускает балансирование ограничений за счет перераспределения средств по статьям расходов.

Алгоритм использует свойство 5.14 задачи 2, минимизируя дефицит суммарных ресурсов системы.

Этап 1. Выбор перспективных технологий.

Общий i -й шаг:

а) если S_i имеет вид (5.27), то переходим к шагу б), если S_i имеет вид (5.28), то переходим к шагу в);

б) $M_j = \sum_{p=1}^m \alpha_p a_{p,i}^j$, $j = 1, \dots, K_i$; $j^* = \operatorname{Arg} \min_j M_j$; $a_i^* = a_i^{j^*}$,

переходим к шагу е);

в) полагаем $\gamma_j = \gamma_j$, $j = 1, \dots, K_i$;

г) если $\sum_{j=1}^m \gamma_j = 1$, то переходим к шагу е);

д) $M_j = \sum_{p=1}^m \alpha_p a_{p,i}^j$, $j^* = \operatorname{Arg} \min_j M_j$, $\gamma_j^* = \min \{\gamma_j^*\}$, переходим

к шагу г);

е) если $i = n$, то переходим к этапу 2, если $i < n$, то $i = i + 1$ и переходим к шагу а).

Этап 2. Определение степени достижения цели λ^{**} , вектора ресурсов B^* , значений x^* , Φ^* по формулам (5.54)–(5.59).

Утверждение 5.8. *Оптимальное решение задачи 2 с траекторией вида (5.38) в случае, если возможны комплекные поставки ресурсов (т. е. вектор $B^{**} \in \tilde{F}_B$ получается за одну итерацию, включающую выполнение этапов 1 и 2).*

Доказательство утверждения 5.8 непосредственно следует из свойства 5.14 задачи 2.

Алгоритм 4 выбора конкретных технологий из дискретного набора при фиксированных поставках ресурсов. Алгоритм используется в случае, если F_A имеет вид (5.26), (5.27), что соответствует выбору технологии a_i из дискретного набора K_i конкурирующих между собой конкретных технологий и фиксированных значений компонент вектора B . Алгоритм основан на свойстве 5.14 задачи 2. Идея алгоритма состоит в том, что при некоторых

фиксированных $A, x^0, \Delta x^{нл}$ находится множество P^0 существенных ограничений. Из P^0 выбирается наименее чувствительное (в смысле (5.51)) к изменению матрицы A ограничение p_1 . Это — ограничение, которому соответствует наибольший запрос ресурса $\Delta B_p^{нл}$. Далее, путем сокращенного перебора выбираются значения элементов матрицы A , позволяющие максимально увеличить показатель дефицитности λ_{p_1} p_1 -го ограничения так, чтобы улучшилось общее решение λ^{**} , и цикл повторяется. Критерием останова алгоритма является невозможность увеличить показатель дефицитности какого-либо из существующих ограничений.

Геометрически это эквивалентно повороту плоскостей, соответствующих существенным ограничениям, приводящему к увеличению степени достижения цели.

Алгоритм 4

Предварительный шаг. Для $I = 1, \dots, n$ в множестве S_i выделяем множество $\tilde{S}_i$ недоминируемых (парето-оптимальных) технологий

$$\tilde{S}_i = \{a_i^j \mid \exists a_i \in S_i : a_{p,i} \geq a_{p,j}^i\}.$$

Общий s -й шаг:

а) полагаем $G = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$, где $I_r = \{1, 2, \dots, K_r\}$ — множество индексов технологий, принадлежащих набору $\tilde{S}_r$;

б) определяем P^0 по (5.33), $p_1 = \underset{p \in P^0}{\text{Arg max}} B_p^{нл}$;

в) формируем вектор $q = \{q_1, \dots, q_n\} \in G$:

$$M_{p_1} = \sum_{i=1}^n (a_{p_1,i}^{q_i} - a_{p_1,i}) (x_i^0 + \lambda p_i \Delta x_i^{нл});$$

г) если $M_{p_1} \geq 0$, то $G = G \setminus q$, и переходим к шагу з), если $M_{p_1} < 0$, то переходим к шагу д);

д) контроль монотонности: $P^1 = \{p \mid M_p \geq 0\}$, где

$$M_p = \sum_{i=1}^n (a_{p,i}^{q_i} - a_{p,i}) (x_i^0 + \lambda p_i \Delta x_i^{нл});$$

если $P^1 \cap P^0 = \emptyset$, то переходим к шагу е), если $P^1 \cap P^0 \neq \emptyset$, то $G = G \setminus q$, и переходим к шагу з);

е) определяются $\Delta \lambda_p$, $p \in P^1$ по (5.50),

$$p_2 = \underset{p \in P^1}{\text{Arg min}} (\lambda_p + \Delta \lambda_p);$$

если $\lambda_{p_2} + \Delta\lambda_{p_2} \leq \lambda_{p_1}$, то $G = G \setminus q$, и переходим к шагу 3), если $\lambda_{p_2} + \Delta\lambda_{p_2} > \lambda_{p_1}$, то переходим к шагу ж);

ж) $a_1^0 = a_i^{q_i}$, $i = 1, \dots, n$, $G = G \setminus q$, переходим к шагу 3);

з) если $G \neq \emptyset$, то переходим к п. 6); если $G = \emptyset$, то алгоритм заканчивает работу.

Утверждение 5.9. Алгоритм 4 сходится к оптимальному решению задачи 1 с траекторией вида (5.38) при фиксированных значениях B , x^{s-1} , $x^{нл}$ не более чем за $N = r_1, r_2, \dots, r_n$ итераций, где $r_i = \text{card } \tilde{S}_i$, $\tilde{S}_i$ — множество Петри.

На каждом шаге алгоритма отбрасывается решение $a_1^{q_1}, \dots, a_n^{q_n}$, худшее, чем решение $a_1^0, \dots, a_n^0$ (в силу шагов г)-е) и следствия 1 из свойства 5.14). Всего таких шагов будет $N = \text{card } G = r_1, \dots, r_n$, т. е. алгоритм сходится за N шагов к решению $a_1^*, \dots, a_n^*$, которое в силу шагов г)-е) и свойств 5.17, 5.18 будет оптимальным.

Идея алгоритма выбора параметров укрупненных технологий в условиях, когда поставки ресурсов фиксированы, состоит в том, что определяется множество существенных ограничений P^0 и находятся изменения ΔA^* параметров A^0 , позволяющие максимально снизить дефицитность ограничений из P^0 . Затем ΔA^* корректируется так, чтобы решение не ухудшалось за счет ограничений, не лежащих в P^0 . Далее цикл повторяется.

Алгоритм 5

Шаг 1. Определение P^0 по (5.48): λ_p , $p = 1, \dots, m$ по (5.47).

Шаг 2. Определение $\|\Delta a_{p,i}^*\|$ как решение задачи

$$\min_{p \in P^0} - \left(\sum_{i=1}^n \Delta a_{p,i} (x_i^{s-1} + \lambda^* \Delta x_i^{нл}) \right) \rightarrow \max,$$

$$B_p^{нл}$$

$$a_i \in S_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Шаг 3.

$$\Delta \lambda = \frac{\min_{p \in P^0} - \left(\sum_{i=1}^n \Delta a_{p,i}^* (x_i^{s-1} + \lambda_0^* \Delta x_i^{нл}) \right)}{B_p^{нл}} \rightarrow \max.$$

Если $\Delta \tilde{\lambda} = 0$, то алгоритм оканчивает работу, причем $a_i^* = a_i^0$, $i = 1, \dots, n$. Если $\Delta \tilde{\lambda} > 0$, то переходим к шагу 4.

Шаг 4. Контроль монотонности:

а) $\tilde{P} = \{p \mid \sum_{i=1}^n \Delta a_{p,i}^* (x_i^0 + \lambda_0^* \Delta x_i^{нл}) > 0\}$, если $\tilde{P} = \emptyset$, то переходим к шагу 4 в);

б) определение λ_p , $p \in \tilde{P}$ по (5.31): если

$$\min_{p \in \tilde{P}} (\lambda_p + \Delta \lambda_p) \geq \lambda^* + \Delta \lambda^*,$$

то переходим к шагу 4 в); если

$$\min_{p \in \tilde{P}} (\lambda_p + \Delta \lambda_p) < \lambda^* + \Delta \lambda^*,$$

то переходим к шагу 5;

в) $\lambda^* = \lambda^* + \Delta \lambda^*$, $a_i^0 = a_i^0 + \Delta a_i^*$, $i = 1, \dots, n$, переходим к шагу 1.

Шаг 5. Коррекция $\|\Delta a_{p,i}^*\|$:

а) $p_1 = \min_{p \in P^0} (\lambda_p^0 + \lambda_p)$, $p_2 = \min_{p \in P^0} (\lambda_p^0 + \lambda_p)$;

б) $\gamma^* \in (0, 1)$ определяется как корень квадратного уравнения $\lambda_{p_1}(\gamma) = \lambda_{p_2}(\gamma)$, где $\lambda_p(\gamma)$ определяется согласно (5.69);

в) если $\lambda_{p_1}(\gamma) > \lambda_{p_2}(\gamma)$, $\forall p, p \in \tilde{P} \cup P^0$, то $a_i^0 = a_i^0 + \gamma^* \Delta a_i^*$, $i = 1, \dots, n$, переходим к шагу 1;

г) $\Delta a_i^* = \gamma^* \Delta a_i^*$, переходим к шагу 5 а).

Утверждение 5.10 *Алгоритм 5 сходится к фиксированному решению задачи 1 с траекторией (5.48) при фиксированных B , $x^{* - 1}$, $x^{нл}$.*

В общем случае, когда постановки не фиксированы, но комплексная их поставка невозможна, используется общий алгоритм 6, на каждом шаге которого последовательно применяется алгоритм 5 оптимального распределения дополнительных и перераспределения имеющихся в наличии ресурсов и алгоритм 3 или 4, учитывающий влияние НТП

Алгоритм 6

Общий k -й шаг:

а) с помощью алгоритма 2 распределяются дополнительные и перераспределяются имеющиеся в наличии ресурсы;

б) с помощью алгоритма 3 (или алгоритма 4) выбираются значения A^*);

в) если $|\lambda_k^* - \lambda_{k-1}^*| \leq \varepsilon$, где ε — желаемая точность, то алгоритм работу заканчивает. Если $|\lambda_k^* - \lambda_{k-1}^*| > \varepsilon$, то переходим к шагу а).

Утверждение 5.11. *Алгоритм 6 сходится к оптимальному решению задачи 1 с траекторией (5.38) при фиксированных $x^0, x^{нл}$.*

Уточним сначала понятие «траектория» в случае, если развитие отрасли исследуется с помощью динамической модели.

Будем полагать, что на каждый год рассматриваемого интервала планирования $T, t \in \{1, 2, \dots, T\}$ имеется статическая траектория $\Gamma^t(\lambda^t)$ наиболее предпочтительных решений. Траектория $\Gamma^t(\lambda^t)$ описывает зависимость потребности в продуктах отрасли от некоторого параметра λ^t , например от темпов развития народного хозяйства.

Без ограничений будем полагать, что $\lambda^t \in [0, 1]$, причем значение $\lambda^t = 1$ соответствует максимально возможным темпам развития народного хозяйства в году t , а $\lambda^t = 0$ — минимально возможным. Зафиксируем параметр λ : $\lambda^t = \lambda^*, t = 1, \dots, T$. При этом точки $\Gamma^1(\lambda^*), \Gamma^2(\lambda^*), \dots, \Gamma^T(\lambda^*)$ будут описывать потребности в продуктах отрасли по годам планового периода при постоянном темпе развития народного хозяйства, равном λ^* . Значение $\lambda^* = 1$ будет соответствовать потребности в продуктах отрасли по годам при максимально возможных темпах развития народного хозяйства.

Исходя из изложенного, траекторией $\Gamma(\lambda)$ в случае динамической постановки задачи будем называть следующее множество:

$$\Gamma(\lambda) = \{ \Phi^1, \dots, \Phi^T \mid \Phi^t \in \Gamma(\lambda^*), t = 1, \dots, T; \lambda^* \in [0, 1] \}. \quad (5.73)$$

В этих условиях возможны следующие постановки задач, характерные для практических процедур планирования.

Задача А. Обеспечить одинаковый для всех лет планового периода максимально возможный темп развития народного хозяйства. Эта задача сводится к задаче математического программирования с дополнительными условиями

$$\lambda \rightarrow \max, \quad \lambda^t = \lambda_{\min}^t, \quad t = 1, \dots, T.$$

Задача Б. Обеспечить максимально возможный уровень энергопотребления на конец планового периода, обеспечив при этом потребности в продуктах отрасли в предшествующие годы.

Эта задача сводится к задаче математического программирования с условиями

$$\lambda \rightarrow \max, \quad \lambda^t \geq \lambda_{\min}^t, \quad t = 1, \dots, T. \quad (5.74)$$

Будем считать, что имеет место гипотеза 5.5, аналогичная гипотезе 5.2.

Гипотеза 5.5. Если в годах $t = 1, \dots, T$ можно удовлетворить потребности в продуктах отрасли, соответствующие темпам развития народного хозяйства $\lambda^1, \dots, \lambda^T$, то потребности в продуктах отрасли можно удовлетворить для $\tilde{\lambda}^1, \dots, \tilde{\lambda}^T$ таких, что $\tilde{\lambda}^t \leq \lambda^t, t = 1, \dots, T$.

Остановимся теперь на особенностях ограничений, определяющих динамический характер модели. Будем обозначать через x^t — вектор мощностей в году t , через B^t — вектор ресурсов в году t , через A^t — матрицу удельных коэффициентов использования ресурсов, соответствующую оборудованию, вводимому в году t . Тогда ограничения в динамической постановке примут вид

$$\Phi^t = D x^t, \quad t = 1, \dots, T, \quad (5.75)$$

$$\sum_{j=1}^t A^j (x^j - x^{j-1}) \leq B^t, \quad t = 1, \dots, T, \quad (5.76)$$

$$0 \leq x^t - x^{t-1} \leq \Delta x_{\max}^t, \quad t = 1, \dots, T, \quad (5.77)$$

$$A^t \in F^t(A), \quad t = 1, \dots, T, \quad (5.78)$$

$$B^t \in \tilde{F}^t(B), \quad t = 1, \dots, T. \quad (5.79)$$

Предполагается, что $x^0 = 0$ и A^1 — матрица удельных коэффициентов оборудования, имеющегося в наличии в году $t, t = 1$.

Области $\tilde{F}^t(B)$ задаются следующими ограничениями:

$$B^t = B^1 + \sum_{j=1}^t \Delta B^j, \quad t = 1, \dots, T,$$

$$B^t \geq B^{t,\min}, \quad t = 1, \dots, T,$$

$$\sum_{j=1}^t \sum_{p=1}^m \alpha_p \Delta B_p^j = \Delta K^t, \quad t = 1, \dots, T.$$

Области $F^t(A)$ на каждый год t задаются ограничениями вида (5.26)–(5.28).

В этих условиях для задач А и Б справедливо свойство 5.12 задачи 1, из которого следует, что решение этих задач сводится к

решению следующих задач математического программирования:

$$\lambda \rightarrow \max, \quad x^t = x^{t,0} + \lambda \Delta x^{t, \text{нл}}, \quad t = 1, \dots, T, \quad (5.80)$$

$$\lambda^t \rightarrow \max, \quad \lambda^t \geq \lambda^{t, \min}, \quad t = 1, \dots, (T-1), \quad (5.81)$$

$$x^t = x^{t,0} + \lambda^t \Delta x^{t, \text{нл}}, \quad t = 1, \dots, T, \quad (5.82)$$

$$x^{t,0} \in X^{t,0} = \{x \mid Dx = \Phi^{s-1,t}\},$$

$$\Delta x^{t, \text{нл}} \in \tilde{X}^{t, \text{нл}} = \{x \mid Dx = \Phi^{s,t} - \Phi^{s-1,t}\}$$

при ограничениях (5.75).

Обозначим вводы в году t через y^t :

$$y^t = x^t - x^{t-1}, \quad t = 1, \dots, T. \quad (5.83)$$

При такой замене переменных задача (5.80) с ограничениями (5.81), (5.82) запишется в виде

$$\lambda \rightarrow \max,$$

$$y^t = y^{t,0} + \lambda^t \text{нл}, \quad y^{t,0} \in Y^{t,0} = \{y \mid Dy = (\Phi^{s-1,t} - \Phi^{s-1,t-1})\},$$

$$y^{t, \text{нл}} \in Y^{t, \text{нл}} = \{y \mid Dy = (\Phi^{s,t} - \Phi^{s-1,t}) - (\Phi^{s,t-1} - \Phi^{s-1,t-1})\},$$

$$\sum_{j=1}^t A^j y^j \leq B^t, \quad 0 \leq Y^t \leq \Delta x_{\max}^t.$$

Видно, что эта задача полностью идентична задаче 2, и, следовательно, для нее справедливы все свойства и утверждения, доказанные выше. Это означает, что для ее решения можно использовать все описанные выше алгоритмы.

Рассмотрим теперь задачу В. Имеет место следующее свойство задачи (5.80).

Свойство 5.21. Если $\lambda^{t,*}$, $x^{t,*}$, $A^{t,*}$, $B^{t,*}$ — оптимальное решение задачи (5.80) при ограничениях (5.81), (5.82) — имеют вид $x^t - x^{t-1} \geq 0$ при $t = T$, то $\lambda^{t,*} = \lambda^{t, \min}$, $t = 1, \dots, T$.

В условиях свойства 5.17 задача (5.81) имеет следующий вид при ограничениях (5.75):

$$\lambda \rightarrow \max,$$

$$x^T = x^{T,0} + \lambda \Delta x^{T, \text{нл}}, \quad x^t = x^{t,0} + \lambda^{t,0} \Delta x^{t, \text{нл}},$$

$$t = 1, \dots, T-1.$$

В такой записи данная задача также сводится к задаче математического программирования типа задачи 2 (и, следовательно, она обладает теми же свойствами) и для решения задачи применимы рассмотренные выше алгоритмы, решающие задачу 2.

Приложение

Программа «Малая энергетика городов и поселков России»¹⁾

Введение

Разработка и неотложная необходимость реализации Программы вызвана крупными финансовыми потерями, которые несут промышленные, коммунальные и сельскохозяйственные предприятия городов и поселков России из-за непомерно высокой стоимости электрической и тепловой энергии, обусловленной кризисным состоянием системы электро- и теплоснабжения и бездарным управлением ею и, главное, необходимостью своевременного предотвращения угрозы обвального срыва обеспечения потребителей электроэнергией и теплом, который может возникнуть в большинстве регионов страны по причине разрастания кризиса в электро- и теплоэнергетике.

Программа «Малая энергетика городов и поселков России» является развитием и дополнением «Энергетической стратегии России на период до 2010 г.», утвержденной в 1995 г., в части стратегии и тактики развития малой энергетики.

Основным назначением данной Программы является быстрое и экономичное практическое решение неотложных проблем энергоснабжения, имеющих у руководства предприятий, населенных пунктов, районов и, возможно, субъектов Федерации. Как показывает анализ, традиционные для «большой» электро- и теплоэнергетики страны технологии и подходы решения этих проблем инерционны и не могут быть реализованы раньше, чем через 5–6 лет.

Собственно, на этот период предлагаемая Программа, использующая новые эффективные и быстрореализуемые технологии и подходы, является единственной альтернативой, способной «закрыть» проблему обеспечения надежного энергоснабжения в масштабах страны и, в первую очередь, на ближайшие 2–3 года.

¹⁾ Программа разработана совместно с В.В. Дорохиным, Н.Д. Александровской, Л.В. Игловой и А.Г. Щегловым.

Основные особенности этой Программы:

- значимость Программы для предприятий, регионов, экономики страны в целом;
- социальный характер результатов реализации Программы, определяемый значительным снижением тарифов на коммунальные услуги;
- высокая экономическая эффективность при малой капиталоемкости, самофинансирование с определенного этапа;
- высокая реализуемость, основанная на универсальности и ярко выраженном инновационном характере;
- улучшение экологической обстановки в регионе реализации Программы;
- инвестиционная привлекательность в связи с высокой рыночной стоимостью Программы и охватом широких сегментов рынка.

В числе возможных технических средств электроэнергетики и теплоснабжения рассматривались рекомендованные Миннауки РФ и Минэкономики РФ в рамках предложений по реализации Программы государственной селективной структурной политики и результатов конкурса Миннауки РФ (1995 г.) новые технологии комбинированного производства электроэнергии и тепла: паросиловые установки и прямоточные котлы на промышленные параметры до 2,4 МПа (24 кгс/см²) и температурой до 225 °С, а также теплофикационные газотурбинные установки (ГТУ-ТЭЦ) и двигатели внутреннего сгорания (ДВС-ТЭЦ).

В качестве основы комплекса новых управленческих технологий, используемых для управления реализацией и развитием Программы, взяты технологии, успешно используемые в России при реформировании и реструктуризации предприятий и систем регионального управления.

Программа разработана ведущими специалистами в области электро- и теплоэнергетики (Дирекция энергетики и энергосбережения ОАО «Электротехническая корпорация») и в области технологии управления (консалтинговая фирма «РОЭЛ Консалтинг»).

Следует подчеркнуть, что Программа уже успешно выполняется с 1996 г. на условиях самофинансирования, но в настоящее время назрела необходимость многократного увеличения масштабов и темпов ее реализации. Назначение данных материалов — проинформировать руководство предприятий, администрации населенных пунктов, районов, субъектов Федерации и Правительство России, а также потенциальных инвесторов, дилеров, под-

рядчиков о возможностях взаимовыгодного сотрудничества в целях ускорения решения стратегически важных для России задач данной Программы.

Программа отвечает положениям «Основных направлений энергетической политики и структурной перестройки топливно-энергетического комплекса Российской Федерации на период до 2010 г.», утвержденных Указом Президента РФ от 7 мая 1995 г., № 472, Указа Президента РФ «О реформе жилищно-коммунального хозяйства» от 28 апреля 1997 г., № 425, в части развития электроэнергетики и коренного преобразования теплового хозяйства страны в условиях рыночной экономики, а также Постановления Правительства РФ «О неотложных мерах по энергосбережению», и является одним из основных средств их реализации от 2 ноября 1995 г.

П1. Краткая справка по состоянию и ключевым проблемам электро- и теплоснабжения

П1.1. Общие сведения. Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) России — крупнейший из 14-ти секторов народного хозяйства России. Его продукция составляет треть всего промышленного производства, а потребности ТЭК в инвестициях составляют 30 % от всех инвестиций в экономику страны.

Электроэнергетические системы и системы централизованного теплоснабжения общего пользования для большинства потребителей являются основными поставщиками конечных энергоносителей

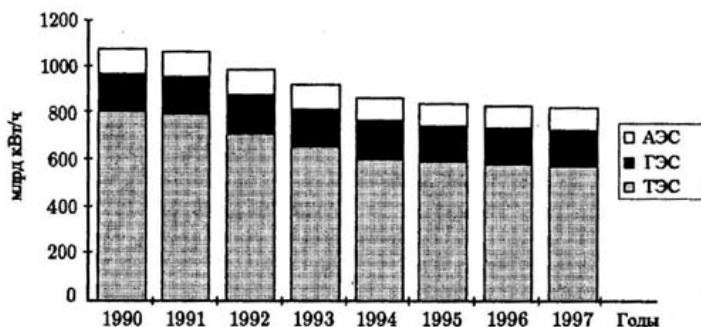


Рис. П1. Производство электроэнергии в России

лей — электроэнергии и тепла. В единую электроэнергетическую систему (ЕЭС) страны входит 440 электростанций общей мощно-

стью 205 млн кВт, в том числе:

- 1) тепловые электростанции (ТЭС) на органическом топливе — 140 млн кВт; из них теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), производящие и электроэнергию, и теплоту, — 70 млн кВт;
- 2) гидроэлектростанции (ГЭС) — 44 млн кВт;
- 3) атомные электростанции (АЭС) — 21 млн кВт.

Динамика производства электроэнергии в России показана на рис. П1.

Источники теплоснабжения в России вырабатывают ежегодно 2 300 млн Гкал теплоты в виде горячей воды и технологического пара, в том числе:

- теплоэлектроцентрали — 30 % общего объема тепла;
- 1 000 крупных котельных мощностью более 100 Гкал/ч — 10 % общего объема тепла;
- 5 500 средних котельных мощностью от 20 до 100 Гкал/ч — 14 % общего объема тепла;
- 180 000 малых котельных мощностью до 20 Гкал/ч — 25 % общего объема тепла;
- автономные источники — 16 % общего объема тепла;
- прочие источники (ГРЭС, вторичное промышленное тепло) — 5 %.

П1.2. Энергоемкость народного хозяйства. Удельная энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП) в России в 2,5–3 раза выше, чем в странах ЕЭС и в 1,8 раза выше, чем в США. Основными причинами разрыва являются низкая эффективность использования энергии в производстве и жилищно-коммунальном секторе и высокие цены на нее.

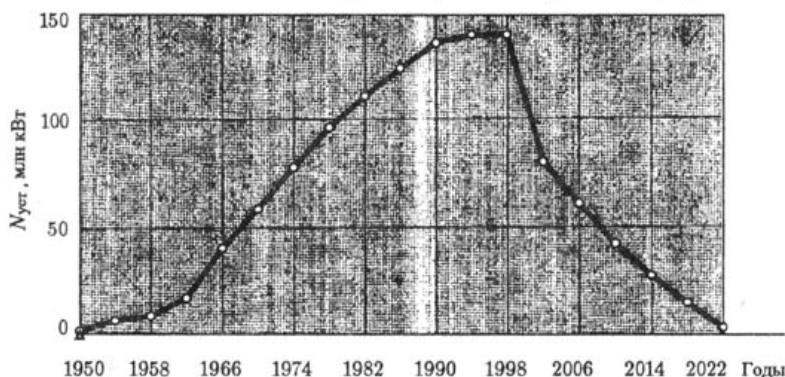
Сочетание низкой эффективности использования энергоресурсов с непрерывным ростом цен на них (более, чем в 2 раза за последние годы) привело к непомерно большой доле стоимости энергоресурсов в себестоимости продукции российских предприятий (на транспорте — 17 %, а в ряде производств — 40 % и более). Это в свою очередь способствовало росту цен на продукцию, снижению рентабельности и в конечном счете привело к резкому снижению конкурентоспособности предприятий и экспортного потенциала страны.

Проблема 1. *Необходимо добиться перелома тенденции роста доли стоимости энергии в себестоимости продукции предприятий России и затем ее снижения.*

П1.3. Износ оборудования. Срок службы до полного физического износа основного оборудования тепловых электростанций составляет около 35–40 лет, гидротехнических сооружений ГЭС — 100 лет, реакторов АЭС — 25–40 лет. Соответственно, после истечения этих сроков физически изношенные мощности ТЭС, ГЭС и АЭС должны быть выведены из эксплуатации. Особую опасность представляет физический износ оборудования ТЭС, поскольку около 50 % из них составляют ТЭЦ, которые являются основой систем теплоснабжения городов.

Качественная картина изменения уровня установленных электрогенерирующих мощностей ТЭС по пятилеткам с учетом их ожидаемого физического износа приведена на рис. П2.

Анализ рис. П2 показывает, что основной прирост генерирующих мощностей ТЭС приходился на период 1958–1985 гг. Следовательно, по окончании срока службы оборудования, равного



30-ти годам, следует ожидать в период 1990–2015 г. такого же массового вывода из эксплуатации электрогенерирующего оборудования (более половины установленной мощности ТЭС). Для удовлетворения спроса на электроэнергию и поддержания требуемого уровня мощностей ТЭС необходимо обеспечивать в этот период дополнительные вводы мощностей на уровне 10–15 млн кВт в год. Такие темпы ввода мощностей ТЭС не могут быть обеспечены в условиях кризисного состояния экономики России, в котором она находится с 1992 г. За последние три года введено только 3 млн кВт, т. е. в 10–15 раз меньше требуемого.

Вместе с тем изношенное оборудование ТЭС (более 25 %) пока не выводится из эксплуатации, однако в ближайшие 2–3 года оно начнет выходить из строя в аварийном порядке.

Аналогичная, но более острая, проблема возникает и в теплоснабжении. Она отягощается тем, что:

1) изношено больше 60 % теплогенерирующих мощностей котельных и ТЭЦ, которые требуют срочной замены в течение 5–6 лет, в том числе — около 20–30 % в ближайшие 2–3 года;

2) физический износ тепловых сетей составляет более 70 %;

3) в связи с использованием во всех котельных внешнего электроснабжения для собственных нужд прекращение подачи электроэнергии в зимнее время ведет к возникновению критических и чрезвычайных ситуаций с большими экономическими потерями и созданием угрозы здоровью и жизни населения в таких масштабах, с которыми не смогут справиться МЧС и местные власти.

Проблема 2. В связи с ожидаемым резким спадом производства электроэнергии и тепла из-за выхода из строя изношенного электрогенерирующего и теплогенерирующего оборудования и явного дефицита ввода мощностей уже в ближайшие 2–3 года возникает угроза не только торможения развития экономики, но и возникновения критических и чрезвычайных ситуаций федерального масштаба, угрожающих жизни и здоровью людей.

II2. Несостоятельность традиционного пути развития электроэнергетики и теплоснабжения России в рыночных условиях в ближайшие годы

В течение второй половины XX века главное направление научно-технического прогресса в электроэнергетике было связано с повышением ее эффективности за счет повышения параметров пара, укрупнения единичной мощности энергоблоков ТЭС (до 1,2 млн кВт) и АЭС (до 1,5 млн кВт) и за счет широкой теплофикации городов и поселков страны на базе строительства ТЭЦ и крупных котельных. Это привело к высокой степени централизации производства электроэнергии и тепла. На том этапе развития концентрация производства электроэнергии дала большой эффект и хорошо соответствовала сильной централизованной власти и надежным бюджетным источникам финансирования.

Однако со временем это технологическое направление исчерпало себя и некоторые присущие ему свойства в переходный период стали тормозом дальнейшего развития электроэнергетики и

теплоснабжения России:

- большие сроки строительства объекта (один энергоблок сооружается 4–6 лет);
- высокие удельные капиталовложения (около 1000 долл. США за кВт);
- «порог» минимально необходимого объема капиталовложений на ввод одного энергоблока составляет 300–800 млн долл. США.

Эти и ряд других обстоятельств в условиях острого дефицита бюджетных инвестиций стали причиной прекращения развития и технического перевооружения электроэнергетики и теплоснабжения России, несмотря на принятые реформы.

В 1992 г. в результате проведения структурных реформ в электроэнергетике России было создано Российское акционерное общество энергетики и электрификации РАО «ЕЭС России», в составе которого оказалось сосредоточено большинство объектов межсистемного значения: конденсационные электростанции (КЭС) большой мощности (более 1000 МВт), ТЭС, ГЭС (мощностью более 300 МВт), системообразующая высоковольтная сеть (500 кВ и выше), Центральное и объединенные диспетчерские управления и пр. Эти подразделения стали дочерними компаниями с передачей РАО 100 % их акционерного капитала. Остальные электростанции, все ТЭЦ и сетевые объекты вошли в состав региональных акционерных обществ энергетики и электрификации (АО-энерго) с передачей 49 % акций каждого из них в уставной капитал РАО. Таким образом, в РАО «ЕЭС России» оказалось сосредоточено хозяйственное управление тремя четвертями установленной мощности всех электростанций ЕЭС России, и появилась возможность оказывать существенное влияние на деятельность АО-энерго, сосредоточивших у себя оставшуюся часть мощностей ЕЭС.

Одновременно было объявлено о создании Федерального оптового рынка электроэнергии и мощности (ФОРЭМ), для которого, однако, до сих пор не создана необходимая законодательная и нормативная база, соответствующая интересам его участников. В результате, несогласованные действия участников ФОРЭМ дополнительно снижают экономическую эффективность электроэнергетики.

В условиях отсутствия бюджетного финансирования и нарастающих неплатежей (рис. ПЗ) РАО «ЕЭС России» и АО-энерго не смогли поддерживать необходимые объемы вводов мощностей новых и реконструкции действующих ТЭС. Длительный срок замораживания капиталовложений, большой «порог» их минимального объема, неопределенно долгий срок окупаемости (из-за низ-

кой рентабельности и неплатежей) и другие факторы сделали объекты централизованной электроэнергетики России инвестиционно непривлекательными для предприятий и финансово-инвестицион-

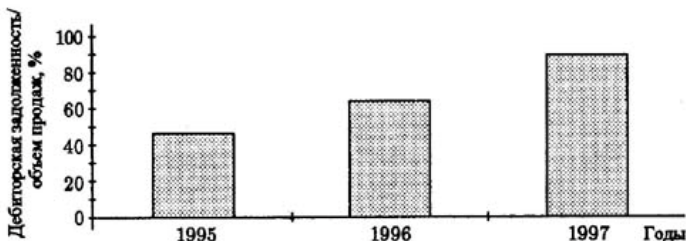


Рис. ПЗ. Неплатежи в электроэнергетике

ных институтов. В результате, вводы мощностей снизились в 5–10 раз (до 1–2 млн кВт в год) и практически отсутствуют заказы на будущее.

В 1995 г. была принята «Энергетическая стратегия России на период до 2010 г.». Фактическая реализация стратегии за три года (1995–1997 гг.) по основным показателям отстает примерно на два-три года от «вероятного» сценария. При этом практически не реализуются главные приоритеты принятой стратегии развития генерирующих мощностей (реконструкция ТЭЦ и ТЭС с использованием ГТУ и ПГУ, строительство новых ТЭС и ТЭЦ, увеличение масштабов теплофикации путем сохранения и усиления концентрации производства электроэнергии и тепла на ТЭЦ общего пользования и др.), которые должны были улучшить показатели ЕЭС.

Фактически, технико-экономические показатели ЕЭС ухудшились. Таким образом, РАО «ЕЭС России» и АО-энерго не удалось справиться с реализацией основных задач «Энергетической стратегии России до 2010 г.» уже на начальном этапе.

Из доклада Председателя Правления холдинга РАО «ЕЭС России» следует, что первый этап устранения главных факторов кризисного развития ЕЭС (низкое качество управления собственностью, неэффективное использование инвестиций и др.), реформирование организационных и управленческих механизмов в холдинговой компании, финансовое оздоровление, повышение ее экономической эффективности и управляемости может быть реализован в 1998–2000 гг. На втором этапе (2000–2003 гг.) предполагается создание электросетевой компании, обеспечивающей надежное функционирование и реализацию экономических пре-

имуществ ЕЭС России. В технологическом плане руководство РАО «ЕЭС России» собирается в ближайшее время сосредоточиться на реконструкции электростанций и приступить к новому строительству лишь через 3–5 лет при наличии финансирования.

Руководство РАО «ЕЭС России» намерено включить в свою программу реформирования и АО-энерго, на которые способно распространить влияние. В результате, объявленная им программа будет относиться также и к ТЭС АО-энерго и, соответственно, к той части централизованного теплоснабжения, которая осуществляется от ТЭЦ.

Что касается котельных, относящихся к секторам как централизованного так и децентрализованного теплоснабжения, то они остаются со всеми своими проблемами либо в ведении властных органов соответствующих административно-территориальных единиц, либо в ведении хозяйствующих субъектов, которым принадлежат. При этом в тепловом хозяйстве страны не только сохраняются, но и нарастают следующие недостатки:

- низкая эффективность морально и физически устаревшего оборудования более чем 100 000 мелких котельных;
- большие потери в теплосетях (до 17 %), что для страны оборачивается перерасходом около 80 млн тонн условного топлива в год (примерно 6–7 % годового потребления энергоресурсов);
- аварийный выход ветхих теплосетей из строя с опасностью для здоровья и жизни людей.

Следует отметить, что, если в 1990 г. источниками централизованного теплоснабжения было произведено 64 % от общего производства тепла, то в 1994 г. — 58,3 %, в то время как объем тепла от источников децентрализованного теплоснабжения в абсолютном выражении остался тем же, а в долевом — вырос с 36 % до 42 %.

Невозможность своевременной замены физически изношенных мощностей электростанций и котельных создает стратегическую угрозу энергетической безопасности страны и соответствующую ей проблему.

Проблема 3. Существующая система централизованного электро- и теплоснабжения (реализуемая РАО «ЕЭС России» и АО-энерго) не сможет обеспечить надежное снабжение страны электроэнергией и теплом в ближайшие 3–4 года. Необходимо найти альтернативный способ надежного обеспечения страны электричеством и теплом, лишенный недостатков «большой» электро- и теплоэнергетики: высоких удельных ка-

питаловложений в устанавливаемую мощность, больших сроков строительства энергоблоков, многомиллионных единовременных начальных капиталовложений в строительство энергоблока.

Таким образом, вопрос о способе надежного обеспечения страны электрической и тепловой энергии в ближайшие годы, пока реформируется и оздоровится в финансовом плане «большая» энергетика, становится вопросом энергетической и экономической безопасности страны.

Необходимо понять, каким образом названные выше проблемы электроэнергетики и теплоснабжения страны трансформируются в проблемы основных групп потребителей электрической и тепловой энергии.

П3. Проблемы потребителей, связанные с состоянием электро- и теплоснабжения

Имеются три основные группы потребителей электрической и тепловой энергии, которые потенциально могут стать партнерами по реализации Программы «Малая энергетика городов и поселков России». Таковыми являются руководители предприятий, администрации населенных пунктов, городов и регионов, Федеральные власти.

П3.1. Проблемы руководителей промышленных и коммунальных предприятий. Высокая и растущая стоимость энергоносителей, заметно повышающая себестоимость продукции и, соответственно, снижающая рентабельность и конкурентоспособность предприятий, как следствие — рост неплатежей за потребленную энергию и по обязательным отчислениям в бюджет.

Низкая надежность энергоснабжения и растущие в связи с этим потери: отключение энергии, особенно неожиданное, ведет к простоям, удорожанию продукции, замораживанию оборотных средств и главное — срыву поставок продукции клиентам, штрафам или потере клиентов.

Отсутствует гарантия своевременного удовлетворения спроса на электроэнергию в случае его прироста. Участие в инвестировании строительства новых генерирующих мощностей при минимальных пороговых капиталовложениях в энергоблок в размере 300 млн долл. США возможно при долевом участии.

Даже в случае совместного инвестирования строительства энергоблоков на удовлетворение спроса можно рассчитывать через 4–6 лет.

Ограничение и отключение энергии возможны даже при регулярной оплате электроэнергии.

Предприятия-потребители электроэнергии не имеют реальной возможности востребовать возмещение потерь, понесенных из-за некачественного энергоснабжения и влиять на политику и действия предприятий РАО «ЕЭС России» и АО-энерго.

П3.2. Проблемы администраций населенных пунктов, районов, областей. В дополнение к проблемам, перечисленным выше в П1.1, на уровне города (региона) возникают следующие проблемы:

- угроза социально-экономических последствий чрезвычайных ситуаций, особенно связанных с отключением теплоснабжения населения в зимнее время (старики, дети и больные умирают за 7–10 дней);
- угроза последствий аварийного выхода из строя изношенных ТЭС и, особенно, АЭС;
- высокая доля затрат в расходной части регионального (городского) бюджета, определяемая необходимостью дотировать электроэнергию и тепло;
- снижение доходной части бюджета из-за неплатежеспособности предприятий региона.

Невозможность решения проблем энергообеспечения руководством населенного пункта (региона) за период между выборами, поскольку при использовании традиционных средств первые результаты могут быть получены не ранее, чем через 5–7 лет.

П3.3. Проблемы Федеральных органов власти. В дополнение к перечисленным выше добавляются следующие проблемы:

- неготовность к надвигающемуся в ближайшие 3–4 года лавинообразному выходу из строя из-за износа до половины оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей и возможному чрезвычайному положению в масштабах страны;
- низкая, по сравнению с другими странами, эффективность использования энергии, чрезвычайно высокие региональные тарифы на электроэнергию и тепло, высокая доля затрат на энергию в себестоимости продукции;
- снижение доходной части бюджета из-за неплатежеспособности как промышленных предприятий, так и предприятий самой энергетики;
- невозможность бюджетного инвестирования в электроэнергетику и тепловое хозяйство в ближайшие 3–4 года.

П3.4. Проблемы потенциальных инвесторов:

- замораживание финансовых средств на длительный период (строительство мощных энергоблоков длится 4–6 лет);
- низкая рентабельность и прибыль, а также неприемлемо большой срок окупаемости проектов сооружения энергетических объектов общего пользования регионального и федерального значения (не менее 9–10 лет) по сравнению с другими инвестиционными проектами;
- низкая реализуемость (высокий риск) инвестиционных проектов, обусловленная длительным сроком реализации при финансовой и политической нестабильности;
- большой риск невозврата кредита.

Анализ кризиса в электроэнергетике и теплоснабжении и отсутствие у РАО «ЕЭС России» соответствующей развивающемуся кризису программы выхода из него позволяют сделать следующий вывод: *перечисленные проблемы не могут быть решены в ближайшие 3–4 года традиционными средствами «большой энергетики».*

П4. Новые благоприятные возможности

В то же время за последние 7–10 лет появился ряд новых возможностей и условий решения перечисленных проблем. К ним следует отнести:

1) появление новых высокоэффективных электро- и теплогенерирующих технологий (в основном — конверсионных), таких как малогабаритные паросиловые установки малой мощности, газотурбинные, парогазовые и газодизельные ТЭЦ малой и средней мощности и др., дающие возможность резко (на десятки процентов) улучшить большинство характеристик, включая рентабельность, в десятки раз сократить сроки и минимально необходимые объемы разовых капиталовложений;

2) с развитием рыночного сектора экономики в дополнение к бюджетным появились новые источники инвестиций (банки, коммерческие структуры и др.), как отечественные, так и иностранные, причем впервые в 1997 г. таких инвестиций было больше, чем экономически эффективных инвестиционных проектов;

3) в связи с сокращением военных расходов высвобождаются мощности предприятий оборонной промышленности, специалисты и ноу-хау международного класса, способные сравнительно недорого, высококачественно и быстро реализовать широкомасштаб-

ное производство высоких энергетических технологий, в том числе и таких, по которым пока нет зарубежных аналогов;

4) появились новые предпринимательские организации, способные быстро, комплексно и эффективно реализовывать инновационные программы «под ключ», включая маркетинг, финансирование, разработку, организацию массового производства, обеспечение снабжения, продвижение на рынок и сбыт новой продукции;

5) зарубежные примеры быстрого развития малой энергетики и экономическая необходимость привели к тому, что появились руководители предприятий, населенных пунктов и регионов, созревшие для создания своих персональных и надежных систем электро- и теплоснабжения.

Анализ показывает, что решение перечисленных выше проблем электроснабжения потребителей в ближайшие 2–3 года невозможно при использовании только традиционных средств (таких как маневр перетоками электроэнергии через ЛЭП, энергосбережение, продление срока службы). Традиционными средствами за это время можно покрыть 10–15 % намечающегося дефицита.

Объединение перечисленных новых возможностей с современными технологиями обоснования и управления реализацией инновационных программ открывают новые перспективы и дают возможность быстрого решения большинства рассмотренных выше проблем потребителей.

Так, например, на первом этапе реализации Программы «Малая энергетика городов и поселков России» размещение в действующих паровых котельных паровых роторных объемных машин типа ПРОМ с генераторами мощностью от 50 до 1000 кВт, работающих на влажном паре, решает следующие проблемы потребителей:

- удельные капиталовложения (на кВт установленной электрической мощности) снижаются более, чем вдвое;
- вырабатываемая электроэнергия будет стоить как минимум вдвое дешевле;
- будут автономно обеспечены собственные нужды электропотребления котельных, что исключает чрезвычайные ситуации из-за отключения в них электроснабжения из сети;
- порог минимально необходимого объема капиталовложений снижается не менее, чем в 100 раз и становится доступным для среднего и даже малого предприятия;
- срок ввода мощности сокращается в 10–20 раз (до 2–3 месяцев);

- соответственно сокращается срок оборота вложенных средств и возврата кредитов;
- резко (в 7–10 раз) сокращается срок окупаемости инвестиций и растет инвестиционная привлекательность;
- на 20–30 % улучшаются экологические показатели и т. д.

Установка паросиловых машин типа ПРОМ во всех действующих котельных России при условии замены в них водогрейных котлов на паровые может дать дополнительную электрогенерирующую мощность более 50 млн кВт. В целом Программа «Малая энергетика городов и поселков России» может дать до 100 млн кВт.

Таким образом, появляется возможность решения не только проблемы компенсации массового выхода изношенных мощностей, но и возможность вывода из эксплуатации АЭС повышенной опасности (с реакторами типа РБМК и ВВЭР) и наиболее экологически грязные ТЭС. Кроме того, быстрая масштабная реализация такой Программы даст передышку, возможность перестроиться Единой энергетической системе для решения перспективных задач.

П5. Многокритериальная оценка и ранжирование путей решения проблем

В табл. П1. приведены ориентировочные экспертные оценки значений основных показателей по критериям, существенным с точки зрения потребителей и инвесторов для различных видов электрогенерирующих технологий. Здесь ТЭС — тепловая электростанция; ПСУ — паросиловая установка типа ПРОМ при установке в котельной; ГТУ — малогабаритная газотурбинная установка для производства электроэнергии и тепла.

За точку отсчета (100 %) приняты значения показателей существующих традиционных тепловых электростанций РАО «ЕЭС России» с энергоблоком единичной мощностью 300–500 МВт.

Из табл. П1 следует, что современные технологии малой энергетики (ПСУ и ГТУ) намного эффективнее по большинству критериев, чем традиционные технологии большой энергетики. Нет технологий лучше их по всем критериям, т. е. они являются эффективными и оптимальными по многокритериальной оценке. Это означает, что в первую очередь целесообразны вложения в малую энергетику.

Для определения приоритетности вложений в технологии в рамках Программы малой энергетики целесообразно провести

ранжирование (определение степени приоритетности по отдаче на рубль вложений) технологий по двум критериям:

1) с государственной точки зрения — по снижению дефицита энергии (в %) на единицу затрат или, что то же — по удельным капиталовложениям (руб/кВт);

2) с коммерческой точки зрения — по сроку окупаемости.

Таблица П.1

Многокритериальная оценка технологий

Критерии	Традиционная ТЭС, %	ПСУ типа ПРОМ, %	ГТУ (техническое перевооружение), %	ГТУ (новое строительство), %	ГТУ (зарубежные), %
Удельные капиталовложения на 1 кВт электрической мощности	100	25–50	60–70	75–80	130–150
Минимальный порог капиталовложений на ввод энергоблока	100	25–50	60–70	75–80	130–150
Минимальный срок ввода	100	25–50	60–70	75–80	130–150
Себестоимость электроэнергии	100	25–50	60–70	75–80	130–150
Срок окупаемости	100	25–50	60–70	75–80	130–150

Из данных табл. П.1. получаются следующие приоритеты технологий малой энергетики как по первому критерию, так и по второму:

- 1) ПСУ типа ПРОМ;
- 2) ГТУ;
- 3) традиционные ТЭС.

Вывод: ПСУ малой мощности типа ПРОМ являются первоприоритетными по обоим критериям.

Анализ показывает, что ПСУ типа ПРОМ является также наиболее предпочтительной и взаимовыгодной с позиций всех хозяйствующих и властных субъектов, заинтересованных в надежном электро- и теплоснабжении по приемлемым ценам: потребителей электроэнергии и тепла, властей муниципальных образований и

субъектов Федерации, потенциальных инвесторов. Программа «Малая энергетика городов и поселков России» предоставляет возможность каждому из названных субъектов стать и производителями электроэнергии и тепла. Такой баланс интересов является важным фактором надежности реализации Программы с использованием как административных, так и рыночных механизмов.

П6. Приоритетные направления работ по обеспечению надежного электро- и теплоснабжения в ближайшие годы

Главными и наиболее экономически эффективными направлениями работ по обеспечению надежного электро- и теплоснабжения на первом этапе реализации Программы «Малая энергетика городов и поселков России» (ближайшие 2–4 года) являются:

- размещение энергоустановок типа ПРОМ в действующих паровых котельных;
- техническое перевооружение паровых и водогрейных котельных с заменой физически изношенного оборудования на комплекс оборудования для комбинированного производства электрической и тепловой энергии, который включает в себя паросиловую установку типа ПРОМ.

Предельная суммарная установленная электрическая мощность энергоустановок типа ПРОМ, размещенных во всех действующих паровых котельных страны на производимом паре, а также при замене физически изношенных водогрейных котлов на паровые с одновременной установкой энергоагрегатов ПРОМ, может достигать 50–60 млн кВт, что достаточно для решения ключевых проблем электроснабжения в целом в ближайшие 2–4 года.

Следующим по эффективности для экономики России является техническое перевооружение действующих электростанций с использованием газотурбинных и парогазовых энергоблоков, в первую очередь — при реконструкции ТЭЦ (40–50 млн кВт в период 2005–2015 гг.).

Таким образом, рекомендуемая стратегия использования бюджетных средств и средств потенциальных инвесторов для решения проблем электроснабжения регионов России на ближайшие 2–3 года может быть сформулирована следующим образом:

1) финансирование проектов, направленных на максимальное использование в действующих котельных наиболее эффективных технологий — паросиловых установок малой мощности типа ПРОМ, пока они не заполнят свою нишу (предельный прогноз —

около 50–60 млн кВт, реалистический на первые 2–3 года — 13–15 млн кВт);

2) использование газотурбинных установок при техническом перевооружении изношенных ТЭЦ малой и средней мощности общего пользования;

3) реконструкция изношенных КЭС и ТЭЦ большой мощности с использованием ГТУ и ПГУ;

4) завершение начатого строительства новых ТЭС.

Поскольку приоритетное направление (сооружения энергоагрегатов типа ПРОМ в котельных) требует в 1,5–2 раза меньше инвестиций и может покрыть в кратчайшие сроки значительную часть возможного дефицита электрогенерирующих мощностей, то первый этап Программы «Малая энергетика городов и поселков России» на ближайшие 3–4 года конкретизируется (за редким исключением) как программа разворачивания массового использования паросиловых энергетических агрегатов малой мощности для производства электроэнергии в действующих и реконструируемых котельных.

II.7. Цели и задачи Программы

Назначение Программы — решение ключевых проблем электро- и теплоснабжения предприятий, населенных пунктов и регионов в ближайшие 3–4 года.

Рассмотрим конкретные цели Программы.

Цель 1. Предотвращение энергетического кризиса в регионах в ближайшие 2–4 года по причине обвального выбывания физически изношенных электро- и теплогенерирующих мощностей посредством масштабного внедрения, в первую очередь, малогабаритных электрогенерирующих энергоустановок ПРОМ в действующих, расширяемых, реконструируемых и вновь строящихся котельных при капиталовложениях, доступных региональным бюджетам и промышленным предприятиям и сроках окупаемости, не превышающих 1,5 года.

Критерии, определяющие степень достижения цели:

- суммарный ввод электрогенерирующих мощностей в регионе в тыс кВт и в % к прогнозируемому дефициту);
- суммарные капиталовложения в строительство мини-ТЭЦ на базе котельных (млн руб.);
- сроки ввода мощностей (мес.);
- сроки окупаемости капиталовложений в диапазоне в зависимости от схемы модернизации котельной (5–6 месяцев – 1,5 года).

Цель 2. Снижение стоимости электроэнергии и тепла в регионах страны и на предприятиях, повышение надежности энергоснабжения, в первую очередь, за счет превращения части котельных в мини-ТЭЦ в результате размещения в них малогабаритных энергоустановок ПРОМ с низкой удельной стоимостью установленной мощности.

Критерии, определяющие степень достижения цели:

- себестоимость вырабатываемой электроэнергии (в коп/(кВт·ч) и в % к существующему тарифу);
- себестоимость вырабатываемого тепла (в руб/Гкал и в % к существующей);
- снижение продолжительности плановых и аварийных отключений электроэнергии и тепла (в часах и в % к существующему уровню);
- оценка возможного ущерба от предотвращенных отключений (руб.).

Цель 3. Снижение нагрузки на региональный бюджет за счет уменьшения дотаций на потребляемые в регионе тепло и электроэнергию.

Критерии, определяющие степень достижения цели:

- снижение затрат в региональном бюджете на дотирование тепла и электроэнергии (в руб. и в % к существующему уровню).

Цель 4. Снижение стоимости конечной продукции у потребителей электроэнергии и тепла за счет снижения энергетической составляющей в себестоимости производимой ими продукции.

Критерии, определяющие степень достижения цели:

- снижение затрат на электроэнергию и тепло в себестоимости продукции (в руб. и в % к существующему уровню).

Для обеспечения надежного достижения этих целей необходимо решение следующих основных задач.

1. Анализ масштабов и структуры спроса на технические средства, разработанные в рамках Программы.

2. Анализ возможных технических решений и выбор состава оборудования.

3. Оценка возможных масштабов и темпов разворачивания производства оборудования для энергоустановок малой мощности.

4. Определение стратегически важных направлений работ по реализации Программы.

5. Разработка и создание системы управления реализацией Программы и соответствующей организационной структуры.

6. Формирование комплекса работ по реализации Программы и разработка календарного плана.

7. Оценка необходимых материальных, трудовых и финансовых ресурсов, формирование финансового плана.

8. Определение объемов необходимых заемных средств и источников финансирования

9. Выполнение пилотных проектов.

П8. Основные технические средства достижения цели и выбор технической политики

Основным техническим средством достижения целей первого этапа Программы является энергоагрегат на основе паросиловой установки малой мощности типа ПРОМ (паровая роторная объемная машина), преобразующей энергию пара в механическую (вращение), с электрогенератором (далее кратко — энергоагрегат ПРОМ). Паросиловые энергоагрегаты ПРОМ предназначены для производства электроэнергии в паровых котельных с котлами, вырабатывающими пар промышленных параметров (давлением до 25 кгс/см² температурой до 250 °С).

Энергоагрегат ПРОМ является малогабаритной установкой (при мощности 600 кВт размеры 3,1×1,6×1,8 м), которая может быть смонтирована в большинстве действующих котельных без дополнительного капитального строительства. При реконструкции котельных, сопровождаемой заменой оборудования (котлов, систем водоподготовки и систем управления), или при строительстве новых котельных агрегаты ПРОМ можно устанавливать в комплекте со стандартным серийным оборудованием (например, котлами КЕ, КС, ДЕ, ГМ и др.), так и с новым (например, малогабаритными прямоточными паровыми котлами). В последнем случае котельные установки с энергоагрегатами типа ПРОМ предназначены для замены физически изношенных паровых котлов (котельная установка типа КУ-П) и для замены водогрейных газовых котлов (котельная установка типа КУ-В). Конструкция и размеры котельных установок позволяют размещать их на месте демонтированных котлов.

Для потребителей электроэнергии и тепла, не имеющих собственного источника тепловой энергии или намеревающихся увеличить его мощность, может быть предложена модульная котельная с энергоагрегатом ПРОМ. Установка укомплектована для работы на природном газе и имеет в своем составе испарительный модуль для подготовки питательной и подпиточной воды из любых источников водоснабжения. Модульная котельная при реконструкции и новом строительстве имеет ряд преимуществ по сравнению

с традиционным комплектом оборудования:

- срок монтажа модульной котельной примерно в 2 раза меньше, чем традиционной котельной и достигает 4–6 месяцев, что дает возможность проводить реконструкцию во время весенне-летнего периода и не выводить ее из эксплуатации в отопительный период;
- удельные капиталовложения снижаются примерно на 10 %;
- себестоимость производства тепла снижается на 5–10 %;
- повышается надежность работы котельной за счет автономного обеспечения электроэнергией собственных нужд;
- дополнительно обеспечивается выработка электроэнергии для промышленных предприятий или для жилищно-коммунальных хозяйств, себестоимость которой в 2–3 раза ниже тарифа;
- срок окупаемости капиталовложений сокращается на 20–30 %;
- соответственно сокращается расходная часть местного (регионального) бюджета или бюджета предприятия.

Ряд энергоагрегатов ПРОМ различной мощности от 50 кВт (ПРОМ-50) до 1000 кВт (ПРОМ-1000), соответствующий типовым параметрам котельных, и значения важных для потребителей характеристик приведены в табл. П2.

Продолжительность цикла изготовления и установки включает полное время от момента заказа оборудования до приемки его в эксплуатацию. Необходимо отметить, что срок окупаемости при

Таблица П.2

Характеристики энергоагрегатов различной мощности

Наименование	Цены с НДС, тыс. долл.	Стоимость 1 кВт, долл./кВт	Цикл изготовления и установки, мес.
ПРОМ-50	32	649	2, 5
ПРОМ-132	78	590	4
ПРОМ-160	80	503	4
ПРОМ-200	83	414	4
ПРОМ-250	84	338	4
ПРОМ-315	94	298	4
ПРОМ-500	134	268	4
ПРОМ-600	150	250	4
ПРОМ-1000	250	250	4

прочих равных условиях растет с ростом стоимости 1 кВт мощности. Анализ данных табл. П2 показывает, что продолжительность цикла с ростом мощности растет для всего ряда изделий,

а стоимость 1 кВт мощности (и срок окупаемости) снижается (до 250 долл/кВт при мощности 1000 кВт).

Для региона (населенного пункта) при ограниченных финансовых возможностях целесообразна следующая стратегия выделения первоочередных объектов установки энергоагрегатов ПРОМ:

- в первую очередь выбираются котельные, на которых возможна установка ПРОМ-1000 и ПРОМ-600 (продолжительность инвестиционного цикла 3–4 месяца);
- при наличии котельных малой мощности, дефиците финансов или времени целесообразна установка ПРОМ меньшей мощности (разовые капиталовложения в 10–20 раз меньше, срок ввода в 2 раза меньше).

В табл. ПЗ приведен ряд модульных котельных различной тепловой и электрической мощности и их характеристики:

Стоимость 1 кВт электрической мощности определялась как оценка дополнительной стоимости модульной котельной по сравнению со стоимостью традиционной котельной той же тепловой мощности, отнесенной к электрической мощности модульной. Из таблицы видно, что наиболее выгодной для покупателя с дефицитом финансов является комплекс оборудования МК-7.0/1.3-600 и

Таблица П.3

Характеристики модульных котельных

Наименование	Цены с НДС, тыс. долл.	Стоимость 1 кВт, долл/кВт	Цикл изготовления и установки, мес.
МК-13/2.2-1500	1850	140	7
МК-7.0/1.3-600	1036	150	4
МК-0.8/1.1-50	250	360	4
МК-3.5/1.3-315	561	210	4,5

МК-13/2.2-1500, включающие энергоагрегаты ПРОМ с электрической мощностью 600 и 3×500 кВт.

Часть узлов модульной котельной (прямоточные котлы, система водоподготовки БИМ) могут использоваться покупателями и автономно.

П9. Масштабы и структура спроса

Потенциальная емкость рынка электрогенерирующих агрегатов ПРОМ определяется суммарной тепловой мощностью котельных в стране, а структура спроса по модификациям ПРОМ — распределением котельных по уровню их тепловой мощности.

Согласно грубой оценке предельного масштаба потенциально возможного ввода дополнительных электрогенерирующих мощностей на базе действующих котельных Россия может получить 65 млн кВт дополнительно установленной электрической мощности на энергоагрегатах ПРОМ. Более конкретная оценка основана на предположении, что в первую очередь в производство электроэнергии будут вовлечены паровые котельные, обладающие примерно 50 % тепловой мощности. Это позволит установить в ближайшие 3–5 лет 14,5 млн кВт электрогенерирующей мощности, в том числе 7,8 млн кВт в паровых котельных средней мощности с энергоагрегатами преимущественно ПРОМ-600 и ПРОМ-1000 и 6,7 млн кВт в паровых котельных малой мощности с энергоагрегатами ПРОМ-50. Для освоения этого потенциала необходимо произвести 12 тыс. энергоагрегатов типа ПРОМ-600 и 135 тыс. энергоагрегатов типа ПРОМ-50, ПРОМ-132.

Темпы реализации этого первоочередного потенциала ограничиваются:

- платежеспособным спросом (всего требуется 15–18 млрд долл. на энергоагрегаты средней мощности и около 2,5–3 млрд долл. на энергоагрегаты малой мощности), причем 1 кВт энергоустановок ПРОМ-1000, ПРОМ-600 стоит в среднем в 2 раза дешевле, чем ПРОМ-50, ПРОМ-132;
- возможностями разворачивания крупносерийного производства.

По предварительным экспертным оценкам этот потенциал может быть реализован за 5–6 лет. Более его половины может быть востребовано рынком в ближайшие 2–3 года (примерно на 90–95 % за счет ПРОМ-600 и ПРОМ-1000), т. е. в среднем за 1999–2000 гг. по 2,5–3 тыс. штук в год, в основном, ПРОМ-600 и ПРОМ-1000 и по 10–12 тыс. штук в год ПРОМ-50, ПРОМ-132.

Срок полной реализации потенциала реконструкции котельных определяется сроком службы оборудования в них. По предварительным оценкам для 90 % установленных теплогенерирующих мощностей этот срок составляет 15–20 лет, для 60 % изношенных — 5–10 лет, из них не менее 20 % придется демонтировать в ближайшие 3–4 года.

Таким образом, по предварительной осторожной оценке около 10–15 % тепловых мощностей, дающих возможность ввода 5–8 млн кВт электрической мощности за 3–4 года, может быть реконструировано с использованием энергоустановок ПРОМ. В том числе, если предположить сохранение пропорций мелких и средних котельных, то средние могут дать прирост 4–5 млн кВт (около

4000–5000 котельных и энергоагрегатов ПРОМ-600 и ПРОМ-1000), остальные 2–3 млн кВт — мелкие котельные и энергоагрегаты ПРОМ-50, ПРОМ-132, ПРОМ-160 (более 20 тыс. штук). В год это потребует дополнительно около 1–2 тыс. ПРОМ-600, ПРОМ-1000 и 4–5 тыс. ПРОМ-50, ПРОМ-132, ПРОМ-160.

В сумме, предварительная оценка потенциального спроса в ближайшие 3–4 года приводит к следующим ориентировочным цифрам:

- по вводу электрогенерирующих мощностей — всего около 20–30 млн кВт, в том числе в среднем в год 4–5 млн кВт (что в 5 раз больше сложившегося уровня ввода мощностей);
- по производству и использованию энергоагрегатов ПРОМ-600, ПРОМ-1000 — всего 15–20 тыс. штук, в год 4–5 тыс. штук; энергоагрегатов ПРОМ-50, ПРОМ-132, ПРОМ-160 — всего 60–80 тыс. штук, в год 15–20 тыс. штук; модульных котельных — всего 8–10 тыс. штук, в год 2–3 тыс. штук.

При этом около 70–75 % вклада в прирост электрогенерирующих мощностей прогнозируется за счет установки энергоагрегатов ПРОМ в действующих паровых котельных.

Отметим, что наиболее крупным потенциалом (более 2 млн кВт) обладают Свердловская, Тюменская, Нижегородская области и Краснодарский край, а также города Москва, Санкт-Петербург с прилегающими областями.

На ближайшее время наиболее крупный потенциал по использованию паровых котельных имеют Краснодарский край, Приморский край, Нижегородская область, Санкт-Петербург с областью, Москва и Московская область.

Основные выводы:

- общий масштаб потенциального спроса по первой очереди Программы (на 3–4 года) определяется вводом около 3–4 млн кВт электрической мощности в год, производством и установкой более 2,5–3 тыс. штук в год ПРОМ-600, ПРОМ-1000, более 10 тыс. штук в год ПРОМ-50, ПРОМ-132, ПРОМ-160;
- основной вклад (70–75 %) в прирост электрогенерирующих мощностей в первые 2–3 года может дать установка ПРОМ в действующих паровых котельных с постепенно нарастающей долей реконструкции водогрейных котельных с использованием модульных котельных;
- наиболее востребованным и выгодным является первоочередное производство энергоагрегатов ПРОМ-600, ПРОМ-1000, а затем модульных котельных средней тепловой и электрической

мощности (3–5 Гкал/ч тепловой мощностью, паропроизводительностью 10–12 т/ч, давлением пара 10–13 кгс/см², электрической мощностью 600–1000 кВт);

- по предварительным оценкам масштабы Программы на 1999 г. оцениваются примерно в 1–1,5 тыс. ПРОМ-600, ПРОМ-1000 и 1–2 тыс. ПРОМ-50.

Заключение

ОАО «Электротехническая корпорация» в лице его Генерального директора обращается к руководителям всех уровней: директорам мелких и крупных предприятий различных форм собственности, главам администраций муниципальных, областных, краевых и республиканских образований, представителям Федеральной власти — всем тем, от кого зависит дальнейшая судьба России, и в частности, решение существующих проблем электро- и теплоснабжения промышленных предприятий, воинских объектов, деревень, сел, поселков, городов.

Настоящий документ представляет собой первый этап Программы «Малая энергетика городов и поселков России».

По нашему убеждению, реализация представленной Программы дает последний шанс предотвратить в электроэнергетике и теплоснабжении кризис, готовый разразиться в стране по причине обвального выбытия изношенных электрогенерирующих мощностей ТЭС, установленных 35–45 лет назад.

Реализация Программы «Малая энергетика городов и поселков России» в части установки энергоагрегатов ПРОМ в действующих, реконструируемых и вновь строящихся котельных соответствует возможностям хозяйствующих субъектов, муниципальных и региональных властей, поскольку она:

- не требует больших единовременных капитальных вложений;
- позволяет получить электрогенерирующие мощности с низкими удельными капитальными вложениями на уже вырабатываемом тепле, что приводит к незначительному увеличению потребления топлива (не более 10 %);
- позволяет замещать выбывающие электрогенерирующие мощности в «большой» энергетике в сроки в 10–20 раз более короткие, чем строительство больших ТЭС;
- позволяет предотвратить дефицит электроэнергии и тепла в стране в ближайшие 2–5 лет.

Большая социально-экономическая значимость Программы «Малая энергетика городов и поселков России» требует объединения всех прогрессивно настроенных сил России.

Объединение промышленного потенциала России, доброй воли администраций областей, регионов и возможностей финансово-инвестиционных и страховых структур России, таких как Сберегательный банк России, Внешторгбанк, Ингосстрах, безусловно, позволит успешно реализовать такой крупномасштабный проект, как «Малая энергетика городов и поселков России».

Если Вас заинтересовала наша Программа «Малая энергетика городов и поселков России», разработанная для оказания помощи в вопросах снабжения электрической энергией и теплом как отдельно взятого потребителя (предприятия, населенного пункта), так и региона России в целом, ОАО «Электротехническая корпорация» готова обсудить конкретные проекты по осуществлению Программы, включая технические и финансовые аспекты.

Универсальность Программы позволяет реализовать ее техническую сторону без всяких ограничений практически в каждой котельной жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

Специалисты ОАО «Электротехническая корпорация» совместно с ведущими проектными институтами и консалтинговыми фирмами готовы разработать концепцию реформирования систем электро- и теплоснабжения как региона, так и отдельных промышленных предприятий и предприятий ЖКХ.

Мы готовы предоставить любую дополнительную информацию и ответить на все вопросы, возникшие у Вас в ходе изучения Программы «Малая энергетика городов и поселков России».

Список сокращений

АСМ автоматизированная система моделирования
АЭС атомная электростанция
ГТУ газо-турбинная установка
ГЭС гидроэлектростанция
ДИС диалоговая имитационная система
ИТ информационная технология
КИТ комплексная информационная технология
КТ конкретная технология
КЭС конденсационная электростанция
ЛПР лицо, принимающее решение
ЛФР лицо, формирующее решение
НТП научно-технический прогресс
ОПФ основные производственные фонды
ОТС организационно-техническая система
ПГУ паро-газовая установка
ПО производственное объединение
РОТС распределенная организационно-техническая система

РП распределенная процедура
РС распределенная система
РСППР распределенная система поддержки принятия решений
РСФСР распределенная система формирования согласованных решений
СППР система поддержки принятия решений
СИРАП синхронизация распределенных процедур
СКИТ система конструирования информационных технологий
ТИТ типовая информационная технология
ТЭС тепловая электростанция
ТЭЦ теплоэлектроцентраль
УТ укрупненная технология
ЧМ человеко-машинный
ЧМИТ человеко-машинная информационная технология
ЧМС человеко-машинная система
ЭИТ элементарная информационная технология
ЭТИТ элементарная типовая информационная технология

Список литературы

1. Акофф Р.Л. О целеустремленных системах.—М.: Сов. радио, 1974.
2. Акофф Р.Л. Планирование будущего корпораций.—М.: Прогресс, 1985.
3. Алпак М.А. Автоматизированные рабочие места на основе персональных ЭВМ.—М.: Радио и связь, 1989.
4. Архипов М.Е., Маслюков А.Б., Медведев И.В., Решетников В.В. Принципы построения распределенной системы управления гибким промышленным производством //Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1988. № 4.
5. Айзерман М.А., Алескеров Ф.Т. Синтез локальных моделей коллективного выбора //Автоматика. 1988. № 1.
6. Айзерман М.А., Малишевский А.В. Некоторые аспекты общей теории выбора лучших вариантов.—М.: ИПУ АН СССР, 1980.
7. Алешникова В.И. Современные тенденции развития управленческого консультирования //Российский эконом. журнал. 1997. № 10. С. 66–74.
8. Ансоф И. Стратегическое управление.—М.: Экономика, 1989.
9. Бауэр Р., Коллар Э., Тан В. Управление инвестиционным проектом: опыт IBM.—М.: ИНФРА-М, 1995.
10. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М. Многокритериальная оптимизация: математические аспекты.—М.: Наука, 1989.
11. Бовыкин В.И. Новый менеджмент (управление предприятиями на уровне высших стандартов: теория и практика эффективного управления).—М.: Экономика, 1997.
12. Борисов А.Н., Вилюмс Э.Р., Сукур Л.Я. Диалоговые системы принятия решений на базе мини-ЭВМ: информационное, математическое, программное обеспечение.—Рига: Зинатне, 1986.
13. Борейлиа Ю.Е. Моделирование посредством динамических параллельных взаимодействующих процессов //Кибернетика. 1985. № 4.
14. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Введение в теорию активных систем.—М.: ИПУ, 1996.
15. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами.—М.: Наука, 1979.
16. Вальковский В.А. Распараллеливание алгоритмов и программ. Структурный подход.—М.: Радио и связь, 1989.
17. Вен В.Л., Крысов Ю.А. Частичное агрегирование в задачах линейного программирования с варьируемыми параметрами //Изв. АН СССР Техн. кибернетика. 1983. № 3.
18. Виханский О.С. Стратегическое управление.—М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995.
19. Вирт Н. Алгоритмы и структуры данных.— М.: Мир, 1989.

20. Власов А.Г., Хайниш С.В. Дескриптивный подход при моделировании поведения человека в процессе решения задачи распределения ресурсов.—М.: МНИИПУ, 1980.
21. Волкович В.Л., Коленов Г.В., Машенко С.О. Алгоритм поиска допустимого решения в линейных распределенных системах //Автоматика. 1988. № 4.
22. Волкович В.Л., Даргейко Л.Ф. Метод ограничений в задачах векторной оптимизации //Автоматика и выч. техника. 1976. № 3.
23. Глушков В.М., Капитонова Ю.В., Летичевский А.А. Алгебра алгоритмов и динамическое распараллеливание программ //Кибернетика. 1982. № 5.
24. Глушков В.М. О системной оптимизации //Кибернетика. 1980. № 5.
25. Глушков В.М., Михалевич В.С., Волкович В.Л., Доленко Г.А. Системная оптимизация в многокритериальных задачах линейного программирования при интервальном задании предпочтений //Кибернетика. 1983. № 3.
26. Друкер П. Рынок: как выйти в лидеры. Практика и принципы.—М.: Book chamber international, 1992.
27. Друри К. Введение в управленческий и производственный учет.—М.: Аудит, 1994.
28. Друри К. Учет затрат методом стандарт-костс /Пер. с. англ.—М.: Аудит. ЮНИТИ, 1998.—224 с.
29. Доброхотов В.И., Ириков В.А. Формирование комплексных программ научно-технического прогресса в электроэнергетике //Теплоэнергетика. 1982. Т. 5.
30. Елькин Ю.Т., Кононенко М.П. Исследование структуры алгоритма для выявления возможности его распараллеливания //Кибернетика. 1983. № 2.
31. Ефремов В.С. Стратегия бизнеса.—М.: Изд-во «Финпресс», 1998.—224 с.
32. Журавлев Ю.И. Корректные алгебры над множеством некорректных (эвристических) алгоритмов //Кибернетика. 1977. № 4, 6; 1978. № 2.
33. Забелин П.Б., Монсеева Н.К. Основы стратегического управления: Учебное пособие.—М.: Информационно-внедренческий центр «Маркетинг», 1998.—195 с.
34. Идрисов А.Б., Картышев С.В., Постников А.В. Стратегическое планирование и анализ эффективности инвестиций.—М.: ФИЛИНЪ, 1997.
35. Ириков В.А., Поликарпов В.И., Ильдеменов С.В., Воробьев В.П., Леонтьев С.В. Выбор и реализация приоритетов научно-технического прогресса: Учебное пособие.—СП: Санкт-Петерб. ун-т экономики и финансов, 1994.
36. Ириков В.А. Ириков И.В. Технология финансово-экономического планирования на фирме. Управление финансовыми потоками.—М.: УНПК МФТИ, 1996.—80 с. (С дискетой.)
37. Ириков В.А. Возможности использования математических моделей в процедурах планирования.—Долгосрочный: МФТИ, 1976.

38. Ириков В.А., Тренев В.Н. Алгоритмы коррекции модели отрасли при целевом планировании //Планирование и координация научных исследований.—М.: ЦЭМИ АН СССР, 1981.
39. Ириков В.А., Распределенные человеко-машинные системы формирования решений при планировании и управлении //Проблемы и методы принятия решений в организационных системах управления: Труды конференции.—М.: ВНИИСИ, 1985.
40. Ириков В.А., Тренев В.Н., Дранко О.И. Человеко-машинная технология моделирования и макетирования распределенных систем поддержки управленческих решений //Проблемы и методы принятия решений в организационных системах управления: Труды конференции.—М.: ВНИИСИ, 1989. С. 23–34.
41. Ириков В.А., Тренев В.Н. Алгоритмы целенаправленного формирования параметров модели развития отрасли //Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1985. № 3.
42. Ириков В.А., Тренев В.Н., Огиевский В.В. Система сопровождения процедур управления средствами развития отрасли.—В кн.: Автоматизация исследований развития энергетического комплекса.—Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1986.
43. Ириков В.А., Тренев В.Н., Агеев И.А., Поздняков М.Л. Анализ возможностей организационных систем на основе параметрической модели системной оптимизации.—Долгопрудный: МФТИ, 1990.
44. Ириков В.А., Тренев В.Н. Распределенные системы поддержки принятия решений /Труды международной конференции «Интеллектуальные системы поддержки принятия решений (IDSS 92)» под эгидой IASA и IFIP.—Крым, 1992.
45. Климов А.Н. Представление сетевых моделей в виде параллельных программ //Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1983. № 5.
46. Кононенко А.Ф., Чумаков В.В. О принятии решений в двухуровневой иерархической системе управления при наличии внешних неконтролируемых факторов //Автоматика и телемеханика. 1988. № 1.
47. Кругло М.И. Стратегическое управление компанией: Учебник для вузов.—М.: Русская деловая литература, 1998.—768 с.
48. Купчина Л. Управленческий учет помогает увеличить прибыль компании //Финансовый бизнес. 1998. № 4. С. 42–45.
49. Карлоф Б. Деловая стратегия: концепция, содержание, символы.—М.: Экономика, 1991.
50. Кинг У., Клиланд Д. Стратегическое планирование и хозяйственная политика.—М.: Прогресс, 1982.
51. Ларин В.Я. Некоторые задачи распределения ресурсов в смешанных шкалах //Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1981. № 2.
52. Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения.—М.: Наука. 1987.—143 с.
53. Ларичев О.И., Мошковиц Е.М. Качественные методы принятия решений.—М.: Наука. Физматлит, 1996.
54. Лотов А.В. Введение в экономико-математическое моделирование.—М.: Наука, 1984.

55. Макаров И.М., Виноградская Т.М., Рубчинский А.А., Соколов В.Б. Теория выбора и принятия решений.—М.: Наука, 1982.
56. Мени А.А. Распределенные операционные системы управляющих комплексов ЭВМ // Автоматика и телемеханика. 1988. № 1.
57. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике.—М.: Наука, 1979.
58. Митенкова Е.Ф. Модель коллективного взаимодействия при решении групповых задач //Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1986. № 6.
59. Михалевич В.С., Волнович Л.В., Коленов Г.В. Алгоритм согласования решений в распределенной системе взаимосвязанных задач с линейными моделями //Кибернетика 1988. № 3.
60. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора.—М.: Наука, 1974.
61. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента.—М.: Дело, 1997.
62. Нормативные и дескриптивные модели принятия решений /Под ред. Б.Ф. Ломова.—М.: Наука, 1981.
63. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач.—М.: Наука, 1982.
64. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление //Кибернетика. 1976. № 6.
65. Поспелов Г.С., Ириков В.А., Курилов В.А. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ—М.: Наука, 1985.
66. Пособия Эрнст & Янг. Составление бизнес-плана.—М.: Джон Уайли энд Сона, 1994.
67. Район В. Стратегический учет для руководителя.—М.: Аудит, МНИТИ, 1998.—616 с.
68. Робсон М., Уллах Ф. Практическое руководство по реинжинирингу бизнес-процессов /Пер. с англ.—М.: Аудит, КНИГИ, 1997.—224 с.
69. Рудаков К.В. Универсальные и локальные ограничения в проблеме коррекции эвристических алгоритмов //Кибернетика. 1987. № 2.
70. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа анархий.—М.: Радио и связь, 1993.
71. Саггналиев К.С. Согласованное планирование в трехуровневой активной системе //Автоматика и телемеханика. 1988. № 3.
72. Сергиенко И.В., Червак Ю.Ю., Гренджа В.И. Распараллеливание в лексикографических алгоритмах дискретной оптимизации //Кибернетика. 1984. № 5.
73. Технология и опыт вывода предприятия из критического и банкротного состояния в конкурентноспособное. Методика. Годовой опыт ЗАО «Чайковский текстиль»/Под ред. В.А. Ирикова.—М.: Изд-во «Аллегротпресс», 1996.—232 с.
74. Трахтенгерц Э.А. Программное обеспечение параллельных процессов.—М.: Наука, 1986.
75. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений.—М.: СИНТЕГ, 1998.

76. Трахтенгерд Э.А. Методы генерации, оценки и согласования решений в распределенных системах поддержки принятия решений.
77. Тренев Н.Н. Диалогово-декомпозиционный метод согласования системы балансовых уравнений, или пример построения корректного алгоритма из некорректных эвристических алгоритмов // Математические методы управления и обработки информации: Межведомственный сб.—Долгопрудный: МФТИ, 1983.
78. Тренев Н.Н. Стратегическое управление предприятием на основе самоорганизации // Аудит и финансовый анализ. 1998. № 1. С 209–252.
79. Тренев В.Н. Распределенная процедура формирования управленческих решений при реструктуризации предприятия.—В кн.: Управление большими системами: Материалы международной научно-практической конференции.—ИПУ РАН, сентябрь 1997.
80. Тренев В.Н., Ириков В.А., Ильдеменов С.В., Леонтьев С.В., Балашов В.Г. Реформирование и реструктуризация предприятия. Методика и опыт.—М.: ПРИОР, 1998.
81. Тренев В.Н. Методы и механизмы реализации распределенных процедур формирования управленческих решений при реформировании предприятий. Препринт ИПУ РАН.—М.: 1998.
82. Тимо Санталайнен, Эро Воутилайнен, Перти Поренне, Йоуко Х. Ниссинен. Управление по результатам.—М.: Прогресс, 1993.
83. Управленческое консультирование: В 2-х томах.—М; СП: Интерэкспорт, 1992.
84. Уткин Э.А. Консалтинг.—М.: Тандем; Изд-во ЭКМОС, 1998.—256 с.
85. Финансовое управление компанией /Под общ. ред. Е.В. Куанецовой.—М.: Фонд «Правовая культура», 1996.—384 с.
86. Финансовый менеджмент. Компьютерный практикум: Учебное пособие. /Под ред. В.В. Ковалева, В.А. Ирикова.—М.: Финансы и статистика. 1998.—256 с.
87. Фольмут Х.Й. Инструменты контроллинга от А до Я /Пер. с нем.—М.: Финансы и статистика, 1998.—288 с.
88. Холт Р. Основы финансового менеджмента /Пер. с англ.—М.: Дело, 1993.—128 с.
89. Цурнов В.И. Некоторые классические направления в декомпозиции больших динамических систем (Обзор) //Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1987. № 3.
90. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Соловьев М.М. Моделирование развития крупномасштабных систем.—М.: Экономика, 1983.
91. Шеремет А.Д., Сайфулин Р.С. Финансы предприятий.—М: ИНФРА-М, 1997.
92. Шкута А.А. Практическое мышление менеджера.—М.: Изд-во «Финпресс», 1998.—224 с.
93. Янг С. Системное управление организацией.—М.: Сов.радио, 1972.
94. Alter S.A. Decision Support Systems: Current Practice and Continuing Challenges.—Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980.
95. Andriole S.J. Handbook of Decision Support Systems.—Blue Ridge Summit. PA: TAB Professional and Reference Books, 1989.

96. Ball M. Distribute or Centralize? Strategies for Support //Computerworld. 1988. V. 21 (March).
97. Barret M., Stephanie S. Strategic Alternatives' and Interorganizational. Systems Implementations: An Overview //J. of Management Inform. Systems. 1986-1987 (Winter).
98. Bellew R.K. Evolutionary Decision Support Systems: An Architecture Based on Information Structure //Knowledge Representation for Decision Support Systems /Eds L.B. Methlie, R.H. Sprague.—Amsterdam: North-Holland, 1985. P. 147-160.
99. Durfee E.H., Lesser V.R., Gorkill D.D. Trends in cooperative distributed problem solving //IEEE Trans. Knowledge and Data Eng. March. 1989. V. 1, № 1. P. 63-83.
100. Elam J.J., Henderson J.C. Knowledge Engineering Concepts for Decision Support System Design and Implementation //Information and Management. 1983. V. 6. P. 109-114.
101. Eom S.B. Decision support systems research: reference disciplines and a cumulative tradition //The International Journal of Management Science. 1995. V. 23, № 5, October. P. 511-523.
102. Fedra K., Zhao C., Winkelbauer L. Interactive Multicriteria Decision Support Comining Rule-based and Numerical Approaches //User-Oriented Methodology and Techniques of Decision Analysis and Support /Eds J. Wesels, A.P. Wierzbicki. Proceedings.—Berlin: Springer-Verlag. 1993. P. 48-64.
103. Humphreys P.C., Wisudha A. Building a Decision Problem Stuctunnng Library: a Review of Some Possibilities //Technical Report 88-1. The London School of Economics and Political Science.—London, 1988.
104. Irikov I.V., Trenev V.N. Algoritms for Goal oriented Formation of the Parameters of a Model for the Development of an Industry //Soviet jornal of computer and sistem sciences (formerly Engeneering Cybernetics). 1985. V. 23.
105. Irikov I.V., Trenev V.N., Nickolsky G. Design of Decision Support Systems for Russian Capital Market.—In: Proc. of the 12th International Conference Multiple Criteria Decision Making.—Hagen (Germany) 1995.
106. Irikov I.V., Trenev V.N., Ageev I. Mechanisms of Strategy of Decision Making on the Basis of Model of System Optimization.—In: Proc. of The Third International Conference of Multi-Objective Programming and Goal Programming, University LAVAL.—Quebec City, May, 1998.
107. Leontiev S.V., Trenev V.N. Financial and Economic Analysis of Commercial Proposal (Problem of Assortment Formation).—In: Proc. of the II International Conference on Industrial Engineering and Production Management.—Lion: INSA, October, 1997
108. Maruyama K. Concurrent object-orientated programmin for distributed real-time systems //Information sciences. 1996. V. 93, № 1, 2. P. 87-106.
109. Mittra S.S. Decision Support Systems: Tools and Techniques.—N.-Y.: Wiley, 1986.
110. Paprika Z., Kiss I. Interactions in Decision Support Systems: Division of Labor in DSSs //Engineering Costs and Production Economics. 1985. V. 8, № 4. P. 281-289.

111. Reiman B.C. Decision Support for Planners: How to Pick the Right DSS Generator Software // *Managerial Planning*. 1985. V. 33, № 6. P. 22-26.
112. Trenev V., Trenev N. Distributed Procedure to form Management Decisions for Enterprises Restructure.—In: Proc. of the 14th International Conference Multiple Criteria Decision Making «MCDM and Its Worldwide Role in Risk-Based Decision Making».—Charlottesville: University of Virginia, June, 1998.
113. Sherr A.H. Distributed dataprocessing /COMPCON Fall 8225th IEEE Comput. Soc. Int. Conf.—Washington: Silver Spring, 1982.
114. Wedde H. An interactive and starvation-free solution for a general class of distributed control problems based on interaction primitives // *Theoretical Computer Science*. 1983. V. 24.
115. Thierauf R.J. Decision Support Systems for Effective Planning and Control.—N.-Y.: Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 1982.
116. Hansen R.H. The Why, What and How Decision Support.—N.-Y.: AMA Management Briefing, 1984.
117. Ginzberg M.J., Stohr E.A. Decision Support Systems Issues and Perspectives // *Processes and Tools for Decision Support* /Ed. by H.G. Sol.—Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1983.
118. Fedorowicz J., Williams G.B. Representing Modeling Knowledge in an Intelligent Decision Support System // *Decision Support Systems*. 1986. № 2.
119. Martin C.J., Winch G.W. Senior Managers and Computers // *Management Decision*. 1984. V. 22, № 2.
120. Goul M., Shane B., Tongue F.M. Using a Knowledge Based Decision Support System in Strategic Planning Decisions An Empirical Study // *J. of Management Inform. Systems*. 1986. V. 11, № 4.
121. Milter R.G., Rohrbaugh J. Microcomputers and Strategic Decision Making // *Public Productivity Review*. 1985 (Summer).

Научное издание

ИРИКОВ Валерий Алексеевич
ТРЕНЕВ Василий Николаевич

**РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ:
ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

Редактор *Л.А. Панюшкина*
Компьютерная верстка и оформление *А.П. Носова*

ЛР № 020297 от 23.06.1997.
Подписано в печать 25.01.99. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 18. Уч.-изд. л. 19,8.
Тираж 1000 экз. С-004.

Издательская фирма
«Физико-математическая литература» РАН
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Отпечатано с оригинал-макета
в ППП «Типография «Наука» РАН
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6
Заказ № 362

V.A. IRIKOV, V.N. TRENEV

**THE DISTRIBUTED SYSTEMS
FOR CREATING OF DECISIONS**
Theory and applications

*Physical and Mathematical Literature Publishing Company
Russian Academy of Sciences*

Moscow 117071, Leninsky Prospekt, 15

Moscow, 1999, 288 pages

ABOUT THE AUTHOR

Valery A. Irikov, Prof. Dr., member of Russian Academy of Natural Sciences, Head of the Department of Management and Applied Mathematics of Moscow Physical Technical Institute.

Vasily N. Trenev, Dr. Head of the Decision Support Systems Laboratory, Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences.

V.A. Irikov and V.A. Trenev are well known scientists in the field of creating distributed decision support systems (DSS), solving the problems of complex systems development.

ABOUT THE BOOK

The main question of this book is improvement of management quality. The especially actual problem is to provide high living standard under the condition of high development rate and development efficiency. Scientific technical progress, structural variations, new managements approaches.

In solving this problem, a set of correlate complex tasks appears. It's solving is dispersed to different organizations, firms, subdivisions. Coordinated solving of this tasks is impossible without creating millions of working stations.

However, it's insufficient to have only personal computer. For obtaining real results it's necessary to create new effective man-machine informational technologies and to create man-machine distributed system for creating coordinated decisions.

This book is devoted to the questions of creating and utilization of such systems.

CONTENTS

Preface

Part I. Distributed systems and algorithms for creating management decisions

1. Distributed algorithms for creating matching management decisions of organization systems

2. Scientific methodologies for development of creating management decisions

Part II. Mathematical models and algorithms

3. Distributed system's model

4. Typical problems, models, algorithms and informations technologies

5. Mathematical principles of basic algorithms for creating of decisions

Appendix

The "Small" Energetics of Russian Towns and Villages

References