

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

МИНИСТЕРСТВО ПРИBOROCTPOЕНИЯ,
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ
И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СССР

Ордена Ленина Институт проблем управления

658.501

Ц 28

А. Д. ЦВИРКУН

ОСНОВЫ
СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

92649



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1982

Ц в и р к у н А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1982. 200 с.

Монография посвящена основным проблемам анализа и синтеза структуры сложных систем. Рассматриваются методы формализованного описания элементов системы и их структурных взаимосвязей, оптимизации структурного построения автоматизированных информационно-управляющих систем, управления развитием структуры производственных и организационных систем, использования имитационного моделирования для синтеза структуры систем.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой организационных и автоматизированных систем управления, а также для студентов соответствующих вузов. Табл. 20. Ил. 58. Библ. 80 назв.

Ответственный редактор
академик А. А. ВОРОНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из характерных особенностей современного этапа научно-технического прогресса является усложнение структуры различных систем, обусловленное ростом размеров и сложности производственных процессов и процессов управления. Это выдвигает ряд сложных проблем, связанных с научно обоснованным построением их структуры.

Проблема синтеза структуры систем включает: синтез структуры управляемой системы, т. е. определение оптимального состава и взаимосвязей элементов системы, оптимального разбиения множества управляемых объектов на отдельные подмножества, обладающие заданными характеристиками взаимосвязей; синтез структуры управляющей системы, т. е. выбор числа уровней и подсистем (иерархии управления), согласование целей подсистем различных уровней и оптимальное стимулирование их работы, создание контуров принятия решений; оптимальное распределение выполняемых функций между уровнями и узлами системы; выбор структуры систем передачи и обработки информации (в том числе структуры информационно-управляющего многомашинного комплекса).

При синтезе и планировании развития структуры сложных систем важное значение приобретает разработка методов: формализованного описания элементов систем и их взаимосвязей; декомпозиции системы на подсистемы, координации и агрегации элементов системы; оптимизации структурного построения автоматизированных информационно-управляющих систем, многомашинных комплексов и сетей связи; управления развитием структур производственных и организационных систем; имитационного моделирования и его использования для анализа и синтеза структуры; вычислительных методов решения данных задач. В настоящее время данное важное новое направление бурно развивается, о чем свидетельствуют многочисленные журнальные публикации, а также проведение всесоюзных семинаров (1979 г., Звенигород, 1981 г., Ташкент) и школы (1980 г., Саратов) по методам синтеза и планированию развития структур сложных систем [14, 45].

В работе рассматриваются основные проблемы анализа и синтеза структуры сложных систем, теоретические основы и форма-

лизованные методы и модели разработки структур. В книге обобщен опыт синтеза структуры сложных систем, накопленный в нашей стране и за рубежом, а также приведены последние результаты исследований, выполненных автором.

Автор надеется, что предпринятая в книге попытка рассмотреть основы синтеза структуры сложных систем послужит отправной точкой при последующих исследованиях этого нового направления. Практик найдет в книге изложение опыта разработки структуры различных систем, а теоретик — отправную точку для дальнейших исследований. При чтении книги читателю потребуется знакомство с основами методов математического программирования и теории вероятностей в объеме курса высших технических учебных заведений.

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение структуры различных систем, обусловленное ростом размеров и сложности производственных процессов и процессов управления, выдвигает ряд задач, связанных с научно обоснованным построением их структуры.

Вопросы научно обоснованного построения структуры систем управления занимали одно из центральных мест на XXVI съезде КПСС. Большое значение в настоящее время придается совершенствованию структуры автоматизированных систем управления отраслями, предприятиями, технологическими процессами, что связано с их широким внедрением. За годы XI пятилетки в СССР предполагается ввести в действие большое число автоматизированных информационно-управляющих систем в различных областях народного хозяйства. Намечается создание общегосударственной автоматизированной системы обработки информации для учета, планирования и управления народным хозяйством на базе государственной системы вычислительных центров и единой автоматической сети связи страны.

Большое внимание уделяется совершенствованию организационной структуры управления: уточнению функций организаций, распределению прав и обязанностей, устранению многоступенчатости в управлении, дублирования в работе и информационных потоках. Вопросы совершенствования структуры систем весьма многообразны: это оптимальная организация структуры управляемых объектов, оптимальная организация структуры управляющих органов, а также тех средств, которые все шире используются при их практической реализации: многомашинных вычислительных комплексов и систем передачи информации. Эти вопросы взаимосвязаны и образуют сложные проблемы при их теоретическом исследовании.

Усложнение структуры систем предъявляет повышенные требования к эффективности и качеству принимаемых решений по их совершенствованию и требует создания теоретических основ, моделей и методов формализации и автоматизации синтеза структуры сложных систем и управления их разработкой и внедрением.

На основании проведенных исследований и обобщения опыта разработки структуры сложных систем различного типа в книге приводятся теоретические основы, формализованные модели и методы синтеза структуры систем и управления их созданием. На основе единой методологии разработаны и обобщены методы формализации, постановки задач, модели оптимизации структуры систем, планирования их развития, включая синтез структуры управляемой системы, т. е. определение оптимального разбиения множества управляемых объектов на отдельные подмножества, обладающие заданными характеристиками взаимосвязей; синтез

структуры управляющей системы, т. е. выбор уровней и подсистем (иерархии управления); оптимальное распределение выполняемых функций между уровнями и узлами системы; выбор структуры системы передачи и обработки информации (в том числе структуры информационно-управляющего многомашинного комплекса). Изложенные в работе методы позволяют формализовать, алгоритмизировать и в ряде случаев автоматизировать с использованием ЦВМ процесс синтеза структуры сложных систем, что обеспечивает существенное повышение эффективности принимаемых проектных решений.

В книге рассматриваются основные проблемы, возникающие при оптимизации структуры автоматизированных систем управления, структуры организационных систем, при оптимизации структурного построения крупномасштабных объектов промышленного и непромышленного назначения.

В книге предприняты попытки с единых позиций рассмотреть процесс синтеза и планирования развития структуры сложных систем. Приводится математическая формализация элементов систем и их взаимодействия.

Изложена единая методология формализации и постановки задач синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем. Сформулирована задача синтеза их структуры, включая оптимальный выбор: состава и вариантов решения задач системы и их этапов; вариантов построения узлов системы и взаимосвязей между ними; распределения множества решаемых задач и их этапов (и информационного обеспечения) по уровням и узлам системы с учетом заданных технико-экономических характеристик. При этом задачи синтеза формулируются на разных уровнях агрегации: для совокупности подсистем, для отдельных подсистем, для информационной подсистемы.

Изложены методы синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем с использованием оптимизационных и имитационных моделей.

Рассматриваются модели оптимального управления разработкой в многоуровневых системах. Исследуются модели и методы взаимосвязанного решения задач выбора структуры системы, размещения ее элементов и очередности их разработки.

Рассматриваются вопросы использования методов имитационного моделирования при оптимизации построения структуры сложных систем. Приводятся результаты исследований многоуровневых систем методом имитационного моделирования, итеративные процедуры оптимизации структуры систем с использованием оптимизационных и имитационных моделей.

Изложение иллюстрируется примерами решения практических задач.

Книга рассчитана на широкий круг научных и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой автоматизированных систем управления, на специалистов, решающих задачи совершенствования структуры различных систем.

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

§ 1.1. Введение

В течение последних десятилетий во все возрастающем темпе происходит усложнение структуры сложных систем. Это относится как к системам обработки информации и управления различными организационными и производственными системами, так и к структуре самих систем. Разработка научных методов управления сложными комплексами, включая такие задачи, как выбор структуры системы управления, целей и методов управления в каждой структурной ячейке системы на всех уровнях иерархии, — одна из основных проблем науки управления.

Проблемы и задачи синтеза структуры сложных систем тесно взаимосвязаны и образуют в совокупности сложную проблему, которая в полном объеме не решена и в настоящее время интенсивно разрабатывается многими исследователями. Известны различные подходы к синтезу структуры сложных систем, к ним относятся методы декомпозиции, координации и агрегации, развиваемые М. Месаровичем, В. Финдейзенем, Р. Куликовским и др.; методы рационального построения структуры организационных систем, совершенствуемые А. А. Модиним, Б. Э. Мильнером и др.; методы агрегативного описания сложных систем, развитые в трудах Н. П. Бусленко [10, 11, 30, 36, 43—46, 48—51, 60, 61, 70].

Задачи синтеза структуры тесно взаимосвязаны с задачами оптимизации функционирования систем. Характер взаимодействий между управляющими подсистемами и распределение функций между ними во многом определяются принятыми принципами и алгоритмами управления, степенью централизации при выработке управляющих воздействий и при их осуществлении, согласованностью целей подсистем различного уровня. Моделям оптимизации функционирования сложных систем с многоуровневой структурой посвящены работы по информационной теории оптимизации функционирования сложных систем, по методам управления активными элементами и др. [7, 8, 17, 18, 47].

Построение иерархических систем с гибким управлением ставит связанные между собой вопросы: рационального выбора схем управления, определения необходимого числа уровней иерархии, установления между уровнями эффективных взаимосвязей, распределения ответственности, организации информационных потоков и создания контуров принятия решений. В частности, число необходимых уровней иерархии непосредственно связано с возможностями переработки информации на каждом уровне.

Из весьма широкого круга проблем построения структуры различных систем нас в первую очередь будут интересовать проблемы, возникающие при оптимизации и планировании развития структуры автоматизированных информационно-управляющих систем организационного типа, а также структуры производственно-транспортных систем и сетей вычислительных центров.

§ 1.2. Проблемы анализа и синтеза структуры сложных систем

Изучаемые, создаваемые и проектируемые в настоящее время системы характеризуются исключительной сложностью. Сложность системы определяется большим числом элементов и выполняемых ими функций, высокой степенью связности элементов, сложностью алгоритмов выбора тех или иных управляющих воздействий и большими объемами перерабатываемой при этом информации.

К сожалению, пока не существует формального и строгого определения понятия сложной или большой системы, хотя в ряде работ сформулированы характерные свойства таких систем [11, 30, 35, 36, 43, 44, 47, 49, 60, 62, 63, 70]. Одной из основных характерных черт этих систем считается иерархичность и сложные структурные и функциональные взаимоотношения между элементами системы.

Структура (лат. *structura*) — взаиморасположение и связь составных частей чего-либо; строение. Под структурой системы понимается организация системы из отдельных элементов с их взаимосвязями, которые определяются распределением функций и целей выполняемых системой.

Таким образом, структура — это способ организации целого из составных частей. Эффективность структуры определяется количеством, значением, формой и содержанием ее составных частей, а также местом, которое они занимают в целом, и существующими между ними отношениями. В более общем понимании структура системы — это обобщенное отношение, описывающее систему [43, 44]. Выбор соответствующего множества отношений зависит от целей исследования.

Под проблемой синтеза структуры системы понимается:

1. Синтез структуры управляемой системы, т. е. определение оптимального состава и взаимосвязей элементов системы, оптимальное разбиение множества управляемых объектов на отдельные подмножества, обладающие заданными характеристиками связей.

2. Синтез структуры управляющей системы:

- а) выбор числа уровней и подсистем (иерархии системы);
- б) выбор принципов организации управления, т. е. установление между уровнями правильных взаимоотношений (это связано с согласованием целей подсистем разных уровней и оптимальным стимулированием их работы, распределением прав и ответственности, созданием контуров принятия решений);

в) оптимальное распределение выполняемых функций между людьми и средствами вычислительной техники;

г) выбор организационной иерархии.

3. Синтез структуры систем передачи и обработки информации (в том числе структуры информационно-управляющего многомашинного комплекса):

а) синтез структуры систем передачи и обработки информации;

б) синтез структуры информационно-управляющего комплекса (в том числе размещения пунктов обслуживания).

Под проблемой анализа структуры понимается определение основных характеристик системы (см. § 1.4) при некоторой выбранной (фиксированной) структуре.

В ряде случаев может проводиться отдельный синтез структуры управляемой и управляющей частей системы. Однако в настоящее время все большее значение в связи с увеличением сложности управляемых производственных процессов и объектов приобретают методы их совместного синтеза.

В зависимости от задачи исследования в понятие структуры системы включаются различные вопросы. Так, при разработке структуры автоматизированной системы управления отрасли (АСУ) под этим понимается определение множества узлов системы и связей между ними, распределение задач, возлагаемых на технические средства АСУ, по уровням и узлам системы и выбор комплекса технических средств, обеспечивающих их эффективное решение [70]. Под структурой управления в АСУ технологическими процессами понимается схема, задающая, во-первых, распределение технологических процессов комплекса по группам, составляющим подсистемы различных уровней, с подчинением подсистем данного уровня подсистемам вышестоящего уровня; во-вторых, распределение функций управления и соответствующих им алгоритмов по подсистемам [53]. Распределение первого вида представляет собой производственную структуру комплекса, распределение второго рода — функциональную структуру управляющего органа. Оба аспекта взаимосвязаны и обоснование структуры предполагает их разработку с учетом этих взаимосвязей.

Под структурой производственной организации понимается [61] «устойчивое пространственно-временное распределение хозяйственных решений и обеспечивающих их реализацию ресурсов с соответствующими взаимосвязями».

✓ Под структурой организационной системы — форма распределения задач и полномочий по принятию решений между лицами или группами лиц (структурными подразделениями), составляющими организационную систему (организацию), направленная на достижение стоящих перед ней целей.

Задачи синтеза структуры тесно взаимосвязаны с задачами оптимизации функционирования систем. Обычно оптимизация функционирования систем проводится для заданной совокупности узлов и взаимосвязей между ними. В задачах другого вида

для заданного возможного набора функций определяется оптимальный состав узлов системы и взаимосвязи между ними, а также распределение выполняемых функций по узлам системы [70].

Значительно меньше исследована проблема синтеза структуры сложных систем, включающая как оптимизацию функционирования системы, так и распределение функций по определяемому составу узлов системы.

Для формализации задачи синтеза структуры введем следующие обозначения:

P — множество возможных принципов и алгоритмов управления $\pi \in P$, для построения системы или ее элементов. Возможные принципы и алгоритмы управления бывают заданы или синтезируются (выбираются) при синтезе системы;

F — множество взаимосвязанных функций (задач, операций), выполняемых системой. Каждому набору принципов и алгоритмов управления π для построения системы соответствует некоторое множество функций $F(\pi)$, из которого при проектировании системы необходимо выбрать подмножество $f \in F(\pi)$, достаточное для реализации выбранных принципов и алгоритмов управления π ;

A — множество возможных взаимосвязанных элементов системы. Подобными элементами, например, могут быть узлы системы, технические средства, пункты обслуживания, отдельные исполнители либо коллективы.

Введем также операцию отображения \mathfrak{M} элементов множества F на элементы множества A . Оптимальное отображение должно обеспечивать экстремум некоторой (или некоторых) целевой функции при выполнении заданных ограничений.

В общем случае задача синтеза оптимальной структуры состоит в определении

$$\pi \in P, \quad f \in F(\pi), \quad \bar{A} \in A, \quad (1.1), (1.2), (1.3)$$

$$[f \in F(\pi)] \mathfrak{M} [\bar{A} \in A]. \quad (1.4)$$

Если заданы принципы и алгоритмы управления системы, то задача синтеза оптимальной структуры состоит в определении (1.1) — (1.4); если заданы принципы и алгоритмы управления системы и выполняемые ею функции — в определении (1.3) — (1.4); если заданы принципы и алгоритмы управления системы, выполняемые ею функции и элементы системы — в определении (1.4), т. е. рационального отображения множества выполняемых функций на множество взаимосвязанных элементов.

Задача анализа состоит в определении характеристик системы при заданных условиях (1.1) — (1.4).

Если в процессе синтеза структуры системы для некоторых элементов возникают проблемы большой нагрузки, то условия (1.1) — (1.4) должны учитывать правила функционирования элементов. В ряде случаев эти правила определяются при решении задачи синтеза, поскольку от них может зависеть распределение функций и взаимосвязей в системе.

Проблемы оптимизации функционирования иерархических систем тесно связаны с проблемами выбора состава узлов системы, числа уровней управления, распределения функций и т. д. Поэтому возникает задача синтеза оптимальной структуры, включая выбор принципов и алгоритмов функционирования системы. В общем случае эти проблемы тесно связаны, поскольку с изменением структуры меняется система целевых функций и внутренних связей, а следовательно, и гипотез поведения элементов системы.

Таким образом, возникают три класса задач синтеза структуры сложных систем:

— синтез структуры при заданных функциях и алгоритмах функционирования системы (именно этим проблемам и посвящена в основном данная монография);

— синтез функций, алгоритмов функционирования и правил поведения элементов заданной иерархической системы [7, 17, 18, 36, 47];

— синтез структуры сложных систем, включающий как оптимизацию функционирования систем, так и распределение функций по узлам системы и выбор их состава (данный класс задач исследован недостаточно и требует дальнейшего изучения).

Структуру систем можно классифицировать:

1. По числу уровней иерархии — одноуровневые и многоуровневые. Последние, в свою очередь, могут быть однородными (функции и характеристики узлов одного уровня идентичны) и неоднородными.

2. По принципам управления и подчиненности — децентрализованные, централизованные и смешанные.

Система называется децентрализованной, если решения отдельными элементами системы принимаются независимо и не корректируются системой более высокого уровня.

В централизованной системе задания отдельным элементам системы выдаются лишь одним элементом более высокого уровня.

В смешанных системах управление некоторыми функциями или этапами их выполнения происходит централизованно, а другими — децентрализованно.

Среди разнообразных систем управления наиболее распространены системы с иерархической структурой. Их характерными особенностями являются: автономность отдельных управляемых подсистем (каждая из них управляет ограниченным числом подсистем); управление подсистемами происходит при неполной информации (т. е. подсистеме более высокого уровня могут быть неизвестны цели и ограничения нижестоящих подсистем); уплотнение (агрегирование) информации при движении вверх по иерархии; наличие целей управления для каждой подсистемы и общей цели для всей системы; взаимовлияние подсистем из-за наличия общих ограничений.

3. По выполняемым функциям и целевому назначению. Различают структуру систем планирования, оперативного управления, информационных и др.

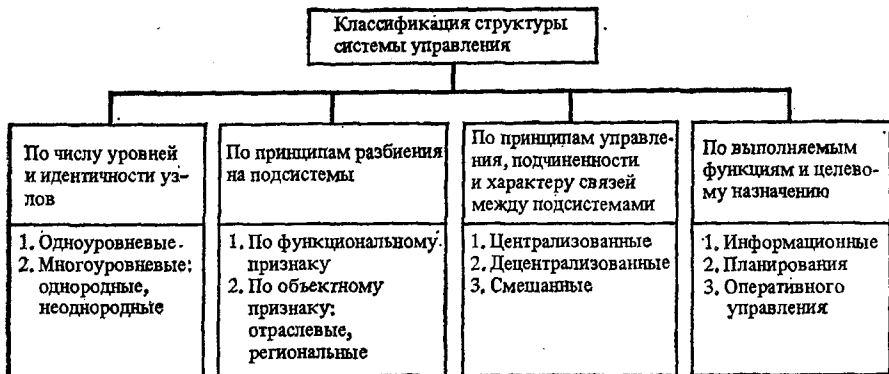


Рис. 1.1

В зависимости от постоянства числа элементов системы и связи между ними различают системы с фиксированной (жесткой) и изменяемой (управляемой или переменной) структурами.

4. По принципам разбиения элементов системы на подсистемы различают структуру систем, в которых элементы объединяются по функциональному и (или) объектному признакам. При объектном разбиении различают структуру отраслевых систем, региональных систем и т. д.

Классификация структур систем управления приведена на рис. 1.1.

Как отмечалось выше, основное внимание в работе уделяется методам синтеза структуры при заданных принципах и алгоритмах функционирования систем. В основу предложенного подхода синтеза структуры сложных систем положен принцип последовательного синтеза моделей допустимых вариантов построения отдельных элементов, частей и системы в целом с последующим выбором на синтезируемой модели структуры системы наилучшего варианта ее реализации и развития. Такой подход позволяет выделить типовые задачи синтеза структуры сложных систем, детализация которых определяется этапом и целями разработки.

Методология проектирования сложных систем, излагаемая ниже, родилась благодаря исследованиям, связанным с синтезом структуры сложных систем, проводившимся в Институте проблем управления с 1964 г. на примерах таких систем, как АСУ нефтеперерабатывающего завода, ОАСУ «Металл», АСУ летательными аппаратами, региональные производственно-транспортные системы, отраслевые сети вычислительных центров и др.

Задачи синтеза структуры сложных систем могут быть поставлены для различных уровней детализации построения системы (рис. 1.2).

На верхнем уровне (см. рис. 1.2) формализуются цели, реализуемые системой управления, выполняемые ею функции и задачи

управления, которые могут быть детализированы до отдельных массивов и процедур, а также операторов и отдельных информационных элементов (не показано на рис. 1.2).

Основу рассматриваемой формализации составляет агрегативно-декомпозиционный подход, состоящий в представлении системы в виде совокупности взаимосвязанных элементов различного уровня детализации [70, 71]. Для формализации взаимосвязей между различными вариантами построения элементов системы используется альтернативно-графовая формализация, в которой различные варианты построения элементов системы (либо множества таких элементов) задаются в виде вершин альтернативного графа, а дуги отражают характер взаимосвязей между ними.

Агрегативно-декомпозиционный подход включает два взаимосвязанных этапа: последовательную декомпозицию выполняемых системой целей, функций, задач, массивов и процедур и агрегирование (объединение) на соответствующем уровне детализации элементов для генерирования вариантов построения системы в целом на рассматриваемом уровне детализации.

На рис. 1.2 граф $G_A = (A, \Gamma_A)$ задает взаимосвязи множества альтернативных вариантов выполнения целей управления, реализуемых системой; здесь A — множество вершин графа, соответствующих различным уровням детализации целей, выполняе-

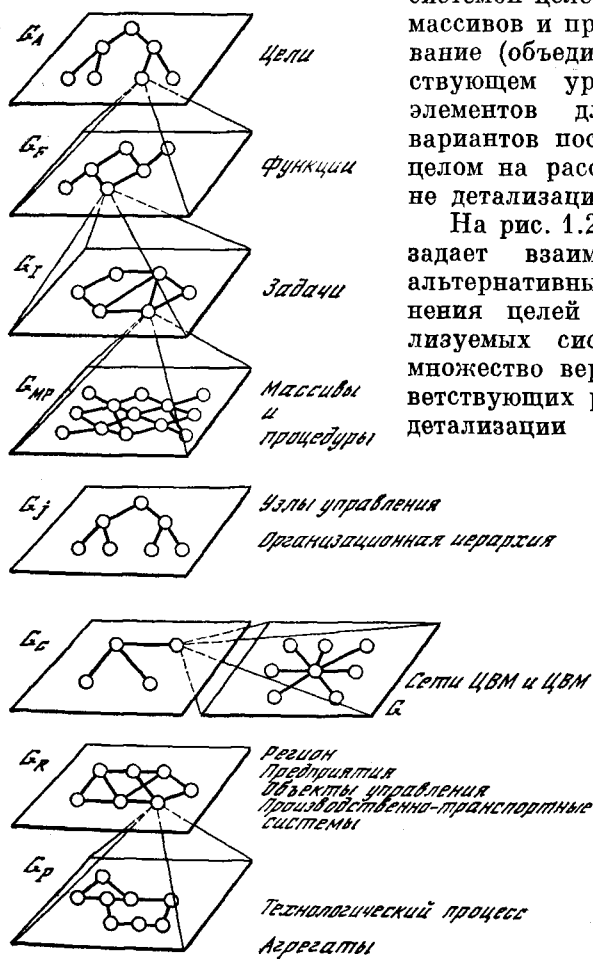


Рис. 1.2

мых системой, а Γ_A — множество дуг, отражающих характер взаимосвязей между ними.

Граф $G_F = (F, \Gamma_F)$ задает альтернативные варианты реализации функций управления, здесь F — множество вершин графа, отражающих альтернативные варианты реализации функций системы, Γ_F — множество дуг графа, отражающих логические взаимосвязи между ними и последовательность их выполнения при реализации. Элементы данного графа являются детализацией вершин графа G_A (см. рис. 1.2).

Граф $G_I = (I, \Gamma_I)$ задает альтернативные варианты реализации задач управления; здесь I — множество вершин графа, отражающих варианты реализации задач системы, а Γ_I — множество дуг, отражающих взаимосвязи между ними. Граф G_I аналогичен графу G_F , поскольку деление на задачи, функции и т. д. во многом относительно и определяется спецификой рассматриваемой системы.

Аналогично граф $G_{MP} = (M, P, \Gamma_{MP})$ отражает варианты реализации массивов (M) и процедур (P), а множество дуг графа Γ_{MP} определяет варианты взаимосвязей между ними. Методы построения графа G_{MP} , а также оптимизации построения его отдельных частей, элементов и графа в целом рассмотрены в [38].

Граф $G_J = (J, \Gamma_J)$ определяет варианты реализации узлов систем (J) и возможные взаимосвязи между ними (Γ_J). Очевидно, что данный граф может быть также представлен на различных уровнях детализации (на уровнях подсистем отраслей, предприятий, их отделов управления, вплоть до отдельных исполнителей).

Граф $G_C = (C, \Gamma_C)$ отражает структуру сети ЦВМ и может быть детализирован до устройств отдельной ЦВМ (модулей, микропроцессоров и т. д.; см. рис. 1.2).

Граф $G_R = (R, \Gamma_R)$ определяет взаимосвязи управляемых объектов, элементов производственно-транспортных систем и может быть детализирован до отдельных этапов и объектов технологического процесса, агрегатов и т. д. (граф G_P).

Как отмечалось выше, агрегативно-декомпозиционный подход включает два взаимосвязанных этапа: последовательную декомпозицию выполняемых системой целей, функций, задач, массивов и процедур и агрегирование (объединение) на соответствующем уровне детализации элементов для генерирования вариантов построения системы в целом на рассматриваемом уровне детализации.

При агрегировании на уровне массивов и процедур выделяются типовые части системы (наборы стандартных процедур, общие массивы, общая и локальные базы данных систем, типовые модули и т. д.). Агрегирование на уровне задач приводит к выделению типовых задач: выявлению независимых частей (блоков) системы; задач, решение которых может быть распараллелено, и набору соответствующих координирующих задач. Агрегирование на более высоких уровнях позволяет определить агрегированные функции системы и ее цели.

Агрегирование может быть выполнено различными способами, и на характер агрегирования существенное влияние оказывает вид графа G_J , отражающего характер взаимосвязей между узлами системы, графа G_C , отражающего структуру сети ВЦ, а также графов G_R и G_P , отражающих особенности управляемых производств и объектов.

Задачи агрегирования элементов соответствующих уровней (G_A , G_F , G_I , G_{MP}) возникают также при распределении этих элементов по элементам графов (G_J и G_C) с учетом их взаимосвязи с элементами графов G_R и G_P . С учетом специфики различных систем соответствующие задачи синтеза структуры сложных систем могут быть сформулированы на каждом из приведенных уровней детализации описания системы.

В зависимости от уровня детализации выполняемых системой целей, функций и задач, а также их отображения по узлам системы, возникают различные типовые постановки задач синтеза структуры сложных систем:

- оптимальное отображение множества целей, выполняемых системой (граф G_A), на множество взаимосвязанных узлов управления (граф G_J); множество узлов управления и их взаимосвязи во многом определяются особенностями графа целей системы (см. также § 1.5);

- оптимальное отображение множества выполняемых функций, задач, массивов и процедур (графы G_F , G_I , G_{MP}) соответственно на множество узлов управления, сеть ЦВМ (графы G_J и G_C , соответственно) с учетом особенностей графов G_R и G_P (см. гл. 2—4);

- оптимизация состава и вариантов (подсистем) реализации и размещения узлов системы (графы G_J , G_C и G_R) (см. гл. 3).

Структурные параметры считаются традиционно той основой, костяком системы, который наиболее консервативен и мало изменяется во времени. Однако в настоящее время структурные параметры перестают быть неизменными. Эта тенденция особенно четко прослеживается при создании крупномасштабных систем, когда планирование осуществляется на 10, 15 лет и более.

На рис. 1.3 приведена динамика развития элементов структуры сложных систем; возникает ряд важных новых задач синтеза структуры систем.

Динамические задачи синтеза структуры систем могут быть сформулированы для одного уровня: развития производственно-транспортных систем, сетей ВЦ, узлов управления (для анализа такого развития находит использование так называемая графодинамика), динамических задач развития банков данных, динамики целей и др.; либо для совокупности нескольких уровней.

Наиболее полно перечисленные проблемы отражаются в моделях синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем. При их оптимизации затрагивается весь круг приведенных выше проблем синтеза структуры сложных систем. Данному кругу проблем уделяется наибольшее внимание (гл. 2 и 3).

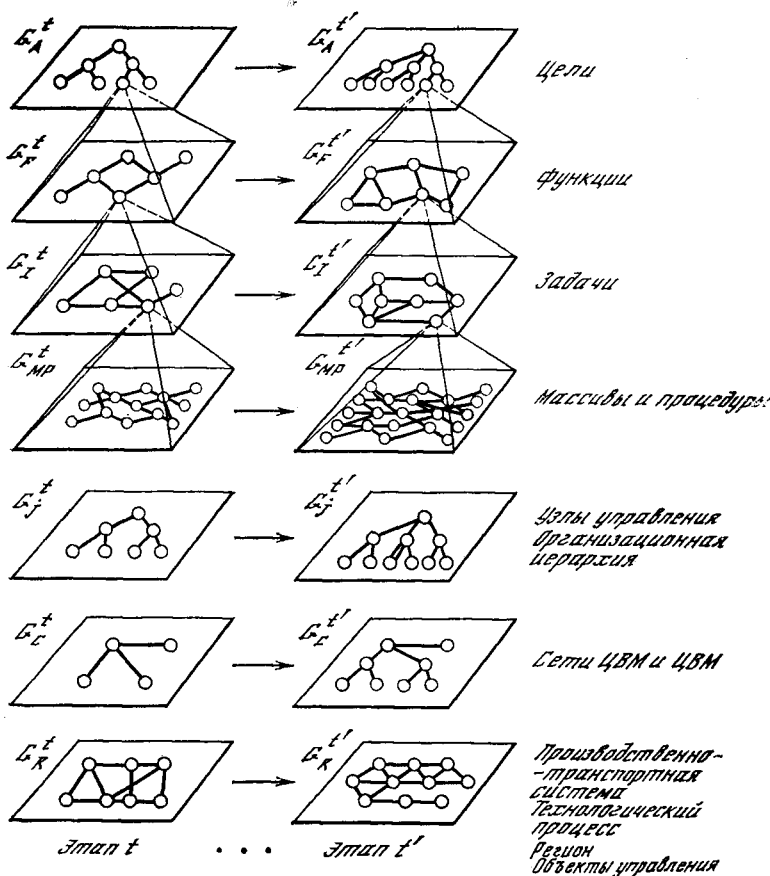


Рис. 1.3

В соответствии с [70] статическая задача синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем состоит в оптимальном выборе: узлов управления и взаимосвязей между ними; вариантов реализации функций (задач) управления, массивов и процедур и их распределения по узлам системы, оснащаемых выбираемым комплексом технических средств.

Пусть G_J — граф, задающий варианты состава и взаимосвязей возможных узлов системы; $G_J^* \in G_J$ — подграф, задающий один из возможных вариантов реализации узлов системы с их взаимосвязями;

G_I — граф взаимосвязей выполнения альтернативных функций управления системой; $G_I^* \in G_I$ — подграф, задающий один из возможных вариантов реализации функций системы; \mathfrak{M} — операция отображения графа G_I на граф G_J , определяющая распределение выполняемых системой функций по узлам системы; $n_n (\eta = 0, \eta_0)$ — характеристики качества создания и функциони-

рования системы. Тогда задача синтеза структуры системы управления (1.2) — (1.4) может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{extr } \mathfrak{N}_0 \{ (G_I^* \in G_I) \mathfrak{M}^* (G_J^* \in G_J) \}, \\ \mathfrak{N}_\eta \{ (G_I^* \in G_I) \mathfrak{M}^* (G_J^* \in G_J) \}, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}, \mathfrak{M}^* \in \mathfrak{M}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

В ряде важных для практики случаев результат отображения $(G_I \mathfrak{M} G_J)$ может быть представлен в виде альтернативного графа G_0 вариантов реализации структуры системы. В этом случае задача синтеза структуры в графовой интерпретации состоит в следующем. Задан альтернативный граф возможных вариантов реализации структуры системы G_0 , необходимо выбрать подграф $G^* \subset G_0$, оптимизирующий заданные характеристики

$$\mathfrak{N}_0 (G^*) \rightarrow \text{opt} \quad (1.6)$$

и удовлетворяющий ограничениям, заданным:

— на подграфе в целом

$$\mathfrak{N}_\alpha (G^*) R \mathfrak{N}_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, \alpha_0}; \quad (1.7)$$

— на отдельных частях графа

$$G_\mu^* \subset G_\mu \subset G_0, \quad (1.8)$$

в том числе на элементах множеств $I, J, \Gamma_I, \Gamma_J, H_0$;

$$\mathfrak{N}_\beta (G_\mu^*) R \mathfrak{N}_\beta, \quad \beta = \overline{1, \beta_0}, \quad \mu = \overline{1, \mu_0}, \quad G_\mu^* \subset G_0. \quad (1.9)$$

Здесь R — условия вида $\leq, =, \geq$.

Возникающие постановки задач синтеза структуры (1.6) — (1.9) могут классифицироваться по наличию вариантов построения элементов I и J ; по характеру взаимосвязей между элементами; по свойствам графов G_I, G_J и G_0 ; по виду целевых функций и ограничений.

В статической задаче (1.5) — (1.9) искомые состав и распределение функций, а также состав реализующих их узлов определяются для некоторого заданного перспективного периода времени. После решения статической задачи синтеза структуры системы может решаться задача синтеза оптимального плана реализации системы.

Если система создается в течение достаточно длительного времени, то важной становится задача выбора наилучшей в некотором смысле траектории развития (эволюции) системы (совместная постановка задач синтеза структуры и выбора плана развития структуры системы). В зависимости от того, в какое состояние должна перейти система и как это может происходить, возможны следующие постановки задач планирования развития оптимальной структуры системы: 1) задачи, в которых фиксирован период развития (свободный правый конец и фиксировано время развития); 2) задачи, в которых ищется минимальное время, за которое система может перейти в заданное состояние; 3) задачи, в которых фикси-

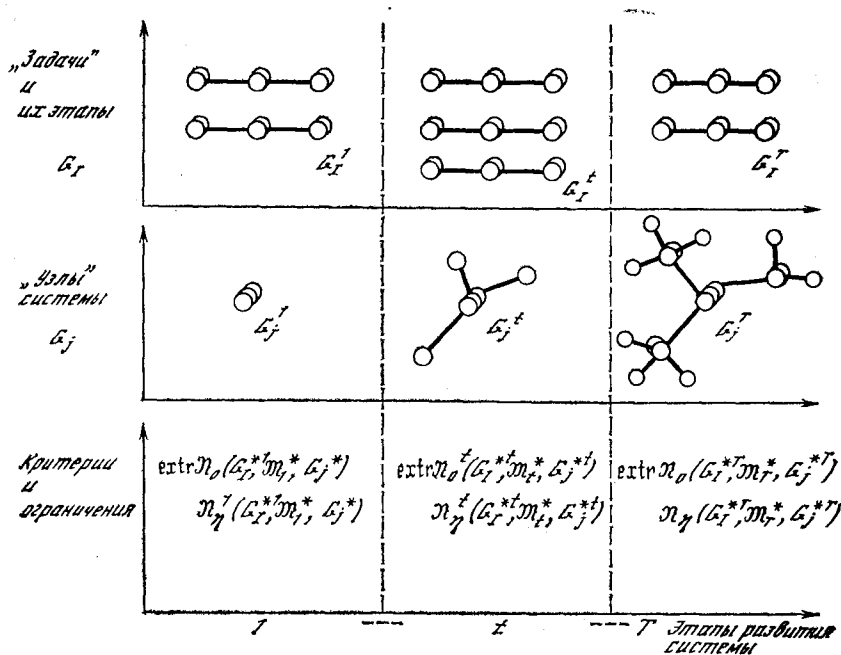


Рис. 1.4

ровано время развития, задано конечное состояние, но систему необходимо перевести в это состояние с наилучшими показателями.

В динамической задаче синтеза структуры сложных систем в отличие от статической оптимизируется не только состав узлов, взаимосвязи между ними и распределение функций по узлам системы для заданного момента времени, но и синтезируется план развития структуры системы (рис. 1.4).

Процесс развития сложных систем может включить в себя ряд этапов, на каждом из которых перед системой ставятся определенные цели, которых она должна достичь, и структура системы должна развиваться таким образом, чтобы быть приспособленной к этим изменениям. В зависимости от степени информированности о характере последующего развития могут быть выделены модели развития структуры систем с заданным конечным состоянием и с рядом промежуточных контролируемых состояний.

Таким образом, динамическая задача синтеза структуры сложных систем состоит в выборе для заданной совокупности моментов контроля за развитием системы такой совокупности узлов управления, взаимосвязей между ними и такого распределения функций по узлам системы на каждом из этапов ее развития, чтобы выполнялись требования к характеристикам качества системы на различных этапах ее развития.

Используем обозначения, введенные при формализованной постановке статической задачи синтеза структуры (1.5) — (1.9),

и пусть также $t = \overline{1, T}$ — последовательность этапов развития системы.

Тогда динамическая задача синтеза структуры системы управления может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{extr } \mathfrak{M}_0^t \{ (G_I^{*t} \in G_I^t) \mathfrak{M}_I^* (G_J^{*t} \in G_J^t) \}, \quad t = \overline{1, T}; \\ \mathfrak{M}_\eta^t \{ (G_I^{*t} \in G_I^t) \mathfrak{M}_I^* (G_J^{*t} \in G_J^t) \}, \quad t = \overline{1, T}, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}; \\ \mathfrak{M}_t^* \in \mathfrak{M}_t, \quad t = \overline{1, T}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Заметим, что моменты контроля за использованием различных ресурсов в процессе развития системы могут не совпадать.

В тех случаях, когда последующий характер развития системы четко не определен, но возможно изменение ее использования, при синтезе структуры системы должна быть предусмотрена ее гибкость, т. е. способность к перестройке, возможно, с некоторой потерей эффективности функционирования.

С математической точки зрения динамическая задача синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем является естественным обобщением статической задачи синтеза структуры (1.5) — (1.9) и состоит в выборе совокупности оптимальных подграфов G_t ($t = \overline{1, T}$) (здесь t — индекс периода планирования), $G_t \subset G_0$, таких, что

$$\text{extr } \mathfrak{M}^t (G_t), \quad t = \overline{1, T}; \quad (1.11)$$

$$\mathfrak{M}_\alpha^t (G_t) R \mathfrak{M}_\alpha^t, \quad \alpha = \overline{1, \alpha_0}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (1.12)$$

$$\mathfrak{M}_\beta^t (G_{\mu t}) R \mathfrak{M}_\beta^t, \quad \beta = \overline{1, \beta_0}, \quad \mu = \overline{1, \mu_0}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (1.13)$$

$$G_{\mu t} \subset G_\mu \subset G_0. \quad (1.14)$$

При постановке данной задачи характер критериев и ограничений может меняться по периодам планирования. Например, при создании системы управления на некотором этапе может потребоваться ее максимальная оперативность при ограничениях на надежность создаваемого варианта и других ограничениях. На последующем этапе может потребоваться обеспечение максимальной надежности системы при ограничениях на ее оперативность и др.

Очевидно, что решения, принимаемые при раздельном и совместном выборе вариантов для отдельных этапов и в комплексе, могут существенно отличаться. Причем если на предыдущих этапах были приняты нерациональные решения, то это может привести к значительным потерям на последующих этапах.

В результате решения задачи (1.10) — (1.14) определяется последовательность подграфов $G_t^* \subset G_0$ ($t = \overline{1, T}$), определяющих динамику развития системы. Учет динамики развития системы увеличивает размерность решаемых задач. Поэтому часто решается последовательность оптимизационных задач синтеза структуры на некоторые фиксированные периоды времени, а очередность создания системы и переходов от одного варианта построения структуры к другому определяется вне данных моделей.

При решении динамической задачи выбора оптимального варианта структуры (1.11) — (1.14) определяется набор оптимальных подграфов, удовлетворяющих заданным ограничениям на совокупность взаимосвязанных графов (причем в общем случае выбор одного из элементов в одном из альтернативных графов влияет на характеристики и соответственно выбор элементов в других).

В дополнение к основным характеристикам качества реализации и функционирования выбранного варианта структуры системы при постановке динамических задач синтеза структуры возникает ряд специфических характеристик (см. § 1.4).

Рассмотренная методология синтеза структуры систем характерна для класса систем, у которого на этапе синтеза могут быть заданы: 1) варианты реализации узлов системы, элементы, из которых они могут быть реализованы (эти элементы и узлы могут быть заданы в конце анализируемого периода либо в некоторой совокупности промежуточных периодов); 2) варианты реализации функций управления, которые должны (могла бы) выполнять система и, наконец, их возможное распределение по узлам системы.

При распределении функций по узлам системы возможны случаи, когда сущность функций (задач, алгоритмов, программ) не меняется, если они помещаются в различные узлы. В ряде случаев сущность и характеристики выполняемых системой функций зависят от того уровня и узлов, в которых они выполняются. При передаче таких функций нижестоящим узлам может изменяться интенсивность, объем выполняемой работы и т. д. В случае альтернативного выполнения функций при передаче их на некоторый уровень может потребоваться обязательное их выполнение в некоторой совокупности узлов и т. д. При передаче функций для выполнения нижестоящими узлами системы у вышестоящего уровня возникает задача координации деятельности подсистем, которым переданы функции управления.

Возможные варианты реализации структуры многих сложных систем (в том числе производственно-транспортных, информационных, организационных) могут быть представлены совокупностью взаимосвязанных альтернативных графов. Задача выбора оптимального варианта системы сводится к поиску совокупности подграфов, удовлетворяющих заданным целевым функциям и ограничениям.

Параметры синтезируемых систем в ряде случаев могут быть заданы лишь с некоторой вероятностью их осуществления в действительности, это приводит к неоднозначному определению варианта синтезируемой структуры системы. В возникающих при этом вероятностных постановках задач синтеза структуры системы должен быть выбран такой набор узлов системы и такое распределение задач по узлам системы, которое обеспечит выполнение функций системой с заданной вероятностью.

В зависимости от степени информированности на этапе синтеза структуры, а также от допустимого риска при выборе синте-

зируемого варианта возможны различные постановки задач синтеза структуры систем. С математической точки зрения рассматриваемые постановки приводят к стохастическим или минимаксным задачам математического программирования (в случае задач, обеспечивающих гарантированный результат) [19].

Комплексная разработка моделей совершенствования структуры требует развития агрегативно-декомпозиционного подхода к синтезу структуры, отражающему представление системы в виде совокупности типовых взаимосвязанных элементов структуры различной степени детализации (включая целевую, функциональную, организационную, производственную, информационную и др.).

Учет динамики развития элементов при анализе и оптимизации структуры требует развития методов совместного использования оптимизационных и имитационных моделей, итеративных процедур выбора рациональных вариантов структуры системы (см. гл. 5).

§ 1.3. Методы формализованного описания элементов систем и их взаимосвязей

В настоящее время лишь закладываются основы математической теории синтеза структуры сложных систем. Подобная теория должна содержать методы формализованного описания элементов структуры сложных систем и их взаимосвязей в процессе функционирования системы.

Несомненный интерес представляет создание такого описания элементов системы, которое позволило бы задавать их состав и взаимосвязи при функционировании на различных уровнях их детализированного описания, а также формализовать взаимосвязи элементов различного типа: технологических, принятия решения, информационных, оперативных, плановых и т. д.

Задачи, возникающие при анализе структуры сложных систем, требуют разработки математических методов формализации элементов и их взаимодействия в системе. В зависимости от конкретных требований при анализе и синтезе структуры систем могут использоваться различные модели и методы. Наибольшее распространение в настоящее время получили методы математического программирования, теории графов и последовательные процедуры квазиоптимизации.

Для формализованного описания элементов системы и их взаимосвязей используются методы теории графов, широкое применение находят альтернативные графы (см. § 1.2), сети, деревья, гиперграфы и др. Функционирование системы в этом случае задается в виде направленных потоков (граф становится направленным) либо специальных логических правил и условий функционирования элементов системы.

В качестве удобного аппарата для описания элементов сложных систем используются: автоматы, при формализации элементов

технических устройств и элементов ЦВМ; динамические элементы для описания систем автоматического регулирования (набор элементов таких систем весьма многообразен: импульсные, логические, элементы запаздывания, элементы с переменной структурой); логико-динамические элементы [10, 24] и др.

Большое число описаний предлагалось для формализации элементов экономики: элемент экономики, активный элемент и др. [6, 7, 17, 22]. Подход к формированию достаточно универсального описания технологических множеств экономических объектов (многопродуктовые элементы, капитальный ремонт, реконструкция, транспортные элементы и т. п.) предложен в цикле работ по

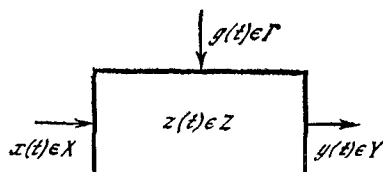


Рис. 1.5

теории управления экономическими системами [22]. Оригинальный подход к описанию элементов системы и их взаимосвязей разработан в моделях ситуационного моделирования [27].

Ряд формализованных описаний элементов системы и их структурных взаимосвязей реализован в виде специальных языков имитационного моделирования (см. гл. 5).

При исследовании структуры сложных систем (особенно с использованием средств вычислительной техники) возникает сложная проблема стандартизации описания элементов, подсистем, а также их взаимодействия в сложных системах.

В качестве достаточно общей модели элементов сложной системы обычно используется агрегат, предложенный Н. П. Бусленко [11], позволяющий на едином языке представить описание детерминированного и стохастического объектов, функционирующих как в непрерывном, так и в дискретном времени (динамические системы, конечные и вероятностные автоматы, системы массового обслуживания и т. д.).

Под агрегатом понимается упорядоченная совокупность множеств T , X , Γ , Z , Z^Y , Y и случайных операторов v' , v'' , u и G'' . Элементы этих множеств называются: $t \in T$ — моментом времени, $z \in Z$ — состоянием агрегата, $x \in X$ — входным, $g \in \Gamma$ — управляющим и $y \in Y$ — выходным сигналами. Состояние агрегата в момент времени t обозначается $z(t)$, а входные, управляющие и выходные сигналы, поступающие в агрегат (выдаваемые агрегатом в момент t), — соответственно $x(t)$, $g(t)$ и $y(t)$ (рис. 1.5). Множество T является подмножеством множества действительных чисел, а X , Γ , Z и Y — произвольными множествами.

К множеству X (соответственно Γ и Y) относятся и так называемые пустые сигналы x_\emptyset (соответственно g_\emptyset и y_\emptyset), означающие

отсутствие сигнала в момент t , если $x(t) = x_{\emptyset}$ (соответственно $g(t) = g_{\emptyset}$, $y(t) = y_{\emptyset}$).

Каждый сигнал описывается в общем случае некоторым конечным набором характеристик. Без ограничения общности входной сигнал, поступающий в агрегат в момент t , может быть представлен конечным набором элементарных сигналов $x_1(t), \dots, x_n(t)$, $x_i \in X_i$, $i = \overline{1, n}$, одновременно возникающих на входе агрегата. Аналогично могут быть определены управляющие и выходные сигналы.

Наряду с состоянием $z(t)$ агрегата вводится также состояние $z(t+0)$, в которое переходит агрегат за малый интервал времени.

Пусть t'_n — момент поступления в агрегат входного сигнала x_n ; тогда

$$z(t'_n + 0) = v' [t_n, z(t'_n), x'_n, g(t'_n), \alpha], \quad (1.15)$$

где $g(t'_n)$ — последний управляющий сигнал, поступивший в агрегат в момент времени $t < t'_n$; α — параметр.

Если t''_n — момент поступления в агрегат управляющего сигнала, то

$$z(t''_n + 0) = v'' [t''_n, z(t''_n), g''_n, \alpha]. \quad (1.16)$$

Если в момент t_n в агрегат поступает сигнал $(x_n, g_n) \in X \times \Gamma$, то состояние агрегата изменяется в два этапа: сначала в соответствии с оператором (1.16), а затем — с оператором (1.15)

$$z(t_n + 0 + 0) = v' \{t_n, v'' [t_n, z(t_n), g_n, \alpha], x_n, g_n, \alpha\}.$$

Наконец, если полуинтервал $(t_n, t_{n+1}]$ не содержит ни одного момента поступления сигналов, то для $t \in (t_n, t_{n+1}]$

$$z(t) = u [t, t_n, z(t_n + 0), \alpha].$$

Во множестве состояний Z определяется подмножество Z^Y , зависящее в общем случае от g и α , такое, что если для данного момента времени t^* состояние $z(t^*) \in Z^Y$ при $t^* - \varepsilon < t < t^*$, где $\varepsilon > 0$ — достаточно малое число, а $z(t^*) \in Z^Y$, то t^* является моментом выдачи выходного сигнала $y = G''[t^*, z(t^*), g(t^*), \alpha]$. Здесь α — параметр; $\alpha \in A$, A — множество параметров агрегата. Значение $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ фиксируется в рамках каждой конкретной задачи; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ обычно называют конструктивными параметрами. В связи с этим $g(t)$ называют параметрами управления.

Подмножество Z^Y часто обозначают $Z^Y(g, \alpha)$, подчеркивая этим возможность его изменения в зависимости от g и α .

Процесс функционирования агрегата, таким образом, состоит в последовательной смене его состояния в соответствии с поступающими сигналами, которые упорядочиваются в зависимости от моментов их возникновения. Агрегаты, в свою очередь, могут служить основой для построения достаточно сложных систем.

В гл. 5 исследуются многоступенчатые системы, построенные из агрегатов, специфика системы состоит в том, что каждый из агрегатов функционирует по одним и тем же стандартным правилам, но в соответствии со своими параметрами. Подобная стандартизация намного упрощает моделирование системы.

Описание сложной системы не исчерпывается описанием ее элементов. Кроме того, требуется описание взаимодействия между элементами. Отметим, что проблема стандартизации описания взаимодействия элементов в сложных системах не менее сложна, чем проблема стандартизации описания самих элементов системы.

Достаточно общее формальное описание взаимодействия элементов системы (агрегатов) предложено в [11]. Математическая модель сопряжения агрегатов строится с учетом следующих предположений.

1. Взаимодействие между системой и внешней средой, а также между агрегатами внутри системы осуществляется посредством передачи сигналов: взаимное влияние, осуществляемое вне механизма обмена сигналами, не учитывается. Под внешней средой понимается совокупность объектов, не принадлежащих данной системе, взаимодействие с ними учитывается при изучении системы.

2. Вход агрегата представляет собой совокупность n входных клемм; i -я клемма предназначена для приема элементарных сигналов $x_i(t) \in X_i$, $i = \overline{1, n}$. Аналогично вводятся управляющие и выходные клеммы.

3. Внешняя среда рассматривается как некоторый фиктивный агрегат S_0 , характеризующийся совокупностью входных и выходных сигналов.

4. Элементарные сигналы, выдаваемые данной выходной клеммой, могут быть переданы данной входной или управляющей клемме лишь в том случае, если в системе реализован индивидуальный канал передачи элементарных сигналов, соединяющих упомянутые клеммы.

5. К каждой входной и управляющей клемме подключается не более чем один индивидуальный канал. К каждой выходной клемме может быть подключено любое конечное число индивидуальных каналов при условии, что ко входу и управляющему входу одного и того же агрегата направляется не более чем по одному из этих каналов.

Структура связей между агрегатами, а также системой и внешней средой определяется, таким образом, набором фактически реализованных индивидуальных каналов.

Методы, рассмотренные выше, в наибольшей степени пригодны для формализации описания элементов и их взаимосвязей для технических и производственных систем. При описании элементов экономических систем их взаимодействие в отличие от приведенных выше систем часто отличается от взаимодействия посредством передачи сигналов, а может проявляться в использовании общих ресурсов, достижении определенных целей и т. д. Формализован-

ное описание подобных элементов системы должно учитывать также присутствие человека в контуре управления.

При моделировании многоступенчатых систем в качестве стандартных для описания элементов нижнего уровня обычно используются: элемент экономики [22], элемент «Производитель» в информационной теории иерархических систем [47], активный элемент [7] и др.

Описание элементов нижнего уровня обычно задается следующим образом. Для каждого элемента задается вектор состояния z и множество его возможных значений $z \in Z$. Вектор состояний часто задается в терминах «вход — выход» $z = (x, y)$, где x — вектор состояния входа, y — вектор состояния выхода.

При описании многоуровневых систем описание верхних уровней приводится через описание действий, которые они могут принять по организации функционирования системы.

Рассмотрим, как задается описание систем, формализованных с использованием элемента экономики [22]. Элемент экономики — это народнохозяйственный объект, описываемый в терминах: вход, выход, внутренние ограничения. В качестве элемента может фигурировать предприятие, группа однородных или неоднородных предприятий, отрасль, группа отраслей и экономика в целом. По наименованиям элементы подразделяются на производственные, строительные, транспортные, геологические, «наука» и т. д. Различают пограничные и внутренние элементы экономики. Пограничными называют элементы, выходы или входы которых подчинены требованиям внеэкономического характера (например, элементы, производящие продукты конечного потребления, или элементы профессионального обучения). Остальные элементы называют внутренними.

Вводится также стандартный элемент описания — элемент, обладающий всеми чертами всех элементов экономики. Стандартный элемент описания обладает полным набором черт и поэтому универсален. На множестве стандартных элементов описания может быть определена операция стандартных объединений. Продукт объединения двух стандартных элементов — снова стандартный элемент.

Оператор планирования определяется как правило, согласно которому по планируемым функциям от времени выходных показателей определяются потребные функции входных показателей.

Общая характеристика описания такова [22]: соотношения стандартного элемента описания линейны; соотношения содержат конечные связи и дифференциальные уравнения, связывающие управления и фазовые координаты; управляющие воздействия принадлежат к одной из двух групп: либо это неотрицательные функции времени, либо это неубывающие целочисленные функции времени; в соотношениях фигурируют функции запаздывающего аргумента; соотношения записаны для непрерывного аргумента (времени t); это обстоятельство отличает описание от большинства

дискретных по времени описаний, приспособленных для применения стандартной техники линейного программирования.

Заметим, что приведенное описание элементов экономики является одним из возможных и, по-видимому, еще потребуются значительные усилия исследователей для разработки достаточно универсального описания элементов сложных систем (см. также гл. 5).

В § 1.5 приведено описание агрегативно-декомпозиционного подхода к анализу сложных систем, который позволяет формализовать различные аспекты деятельности систем: процесс выбора целей и принятия решений, обработки информации, технологических процессов.

Формализованное описание элементов производственно-транспортных крупномасштабных систем, предназначенное для описания динамики их развития с учетом инвестиций, приведено в гл. 4.

§ 1.4. Основные характеристики структуры систем

Рассмотрим основные характеристики, типичные для структуры различных систем. Эти характеристики могут быть разбиты на две группы. К первой относятся характеристики, связанные с иерархичностью систем: число (подсистем) рассматриваемой системы, характер взаимосвязей между уровнями (подсистемами), степень централизации и децентрализации в управлении, признаки разбиения системы на подсистемы. Ко второй — эффективность (в широком смысле) функционирования системы той или иной структуры: эффективность (стоимостная), надежность, живучесть, быстродействие и пропускная способность, способность к перестройке и др.

Иерархичность, т. е. определенная соподчиненность систем управления различных уровней, типична для сложных систем управления. В ряде случаев иерархичность может служить также средством описания многих сложных событий и явлений. Наиболее удобно иерархия системы задается в терминах теории графов [5]. В дальнейшем будем предполагать, что читателю известны такие понятия теории графов, как путь, контур, корень, прадеерево и т. д. Прадеерево G называется иерархией над множеством объектов A , если его вершины являются некоторыми подмножествами множества A и при этом корнем G является A ; множества A_{j1}, \dots, A_{jk} на концах дуг, исходящих из вершин A_j , удовлетворяют условиям $\bigcup_{l=1}^k A_{jl} = A_j$, $A_{jl} \cap A_{js} = \emptyset$, $l, s = \overline{1, k}$; висячими вершинами прадеерева G являются объекты множества A .

При этом вершина (множество) A_i принадлежит r -му уровню иерархии, если путь от корня прадеерева G до A_i содержит r дуг. В некоторых задачах вершинам могут быть приписаны дополнительные дуги для изображения соответствующего уровня иерар-

ни. Множества любого уровня образуют разбиения множества объектов A , т. е. $A_i \cap A_j = \emptyset$, $i, j = 1, r \dots$ и $\bigcup_i A_i = A$.

В зависимости от вида графа взаимосвязей между подсистемами могут быть выделены различные типовые структуры (пути, контуры, циклы и т. д.).

Множество всех вышестоящих и подчиненных подсистем по отношению к данной называется ее вертикалью. Все подсистемы, принадлежащие одной вертикали, считаются соподчиненными.

Информационные связи между подсистемами различных уровней принято называть вертикальными, а между подсистемами одного уровня — горизонтальными.

Для каждой подсистемы связи со своими подчиненными подсистемами называют внутренними, а остальные — внешними.

Структура системы управления определяется в первую очередь материальной природой объектов, характером происходящих в них процессов и взаимодействиями между ними, ограничениями на их функционирование, а также алгоритмами управления.

Информационный аспект выступает на первый план при разбиении системы на сравнительно однородные подсистемы, например по территориальному признаку. Однако противопоставление материального и информационного аспектов относительно. Действительно, наличие материального объединяющего элемента ведет к тесным информационным связям, координирующим это взаимодействие.

Важными характеристиками структуры являются степень централизации и норма управляемости.

Степень централизации α служит в некотором смысле мерой разделения полномочий между уровнями системы. Для каждой пары смежных уровней $(i - 1, i)$, $i = 2, \bar{N}$ степень централизации может измеряться отношением объема ω_i задач, решаемых на i -м уровне, к объему ω_{i-1} задач, решаемых на $(i - 1)$ -м уровне, т. е. $\alpha = \omega_i / \omega_{i-1}$. Объем ω_i решаемых задач может быть оценен, например, через количество перерабатываемой информации на уровне i .

Степень централизации системы в целом будет равна

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \beta_i \alpha_i,$$

где β_i — некоторые весовые коэффициенты.

Смещение основной массы решений в сторону высшего уровня (повышение степени централизации) обычно отождествляется с повышением управляемости подсистем и улучшением качества решений с одновременным увеличением объема перерабатываемой информации на верхнем уровне. Смещение решений в сторону нижних уровней (повышение степени децентрализации) соответствует увеличению самостоятельности подсистем, уменьшению объема информации, перерабатываемой верхними уровнями.

Отложим по горизонтальной оси степень централизации α , а по вертикальной — стоимость C функционирования организации

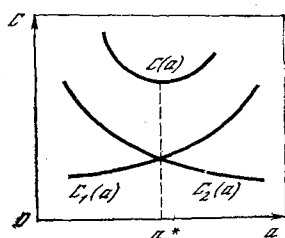


Рис. 1.6

(рис. 1.6). Пусть кривая $C_1(\alpha)$ соответствует стоимости создания системы в зависимости от степени централизации, а кривая $C_2(\alpha)$ — потерям из-за недостаточной централизации принятия решений. Суммарную стоимость обозначим через $C(\alpha)$. Точка α^* соответствует в данном случае «идеальному» компромиссу (с точки зрения стоимости) между централизацией и децентрализацией.

Понятие степени централизации тесно связано с другой характеристикой структуры организации — нормой управляемости. Норма управляемости характеризует объем задач, решением которых может эффективно управлять руководитель. Ограничение на «мощность переработки информации» в подсистемах существенно влияет на выбор структуры.

Степень централизации и норма управляемости, как правило, изменяются с переходом от одного иерархического уровня системы к другому. Кроме того, на них большое влияние оказывает автоматизация управления. Определение степени централизации и нормы управляемости — очень важная и вместе с тем трудная проблема при синтезе структур.

Важным показателем, часто используемым при синтезе структур систем управления, является трудоемкость (сложность) управления. Данный показатель характеризует затраты (стоимость) человеко-машинного времени при выполнении функций управления для системы с заданной структурой и алгоритмом управления.

Функция сложности (трудоемкости) управления зависит от размерности решаемых на различных уровнях задач, числа подсистем на каждом уровне иерархии и числа уровней. Основой для определения необходимого числа уровней иерархии обычно служит либо нагрузка возможных звеньев системы, либо некоторая функция сложности

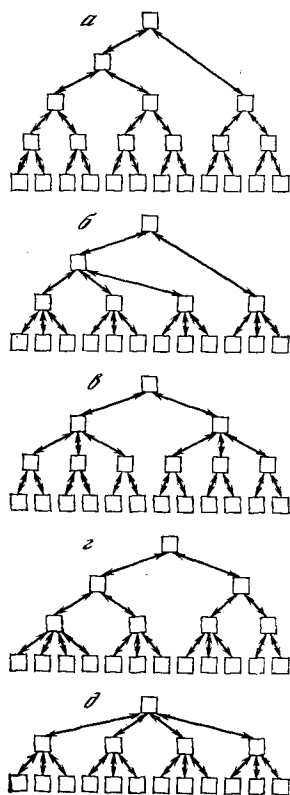


Рис. 1.7

управления, определяемая характером и количеством операций при различных схемах управления. Функция сложности может быть определена при заданных алгоритмах работы узлов и взаимосвязях между ними.

Поскольку решение данной задачи в общем случае получить достаточно трудно, то в [60] доказываются два следующих утверждения. Во-первых, при отсутствии ограничений нельзя увеличить показатель качества управления, увеличивая количество уровней управления. Во-вторых, необходимо стремиться ограничивать число подсистем на данном уровне управления. Тогда задача состоит в нахождении структуры управления с минимальным количеством уровней управления и минимальным количеством подсистем на каждом уровне при допустимой сложности управления.

На рис. 1.7 приведены структуры системы, которые оказались допустимыми при заданной сложности управления [60].

Согласно приведенным выше утверждениям наилучшая иерархическая структура показана на рис. 1.7, д. Среди структур, имеющих четыре уровня управления (рис. 1.7, б, в, г), лучшая структура показана на рис. 1.7, б, так как она содержит меньшее количество подсистем высших уровней.

Обозначим через $K(n_i)$ функцию сложности решения задачи i -й подсистемы, где n_i — размерность решаемой задачи. На следующий более высокий уровень иерархии должна передаваться упрощенная модель (информация) размерностью ϵn_i , $0 \leq \epsilon \leq 1$.

Интересны попытки ответить в общем виде на вопрос, при каких условиях целесообразна иерархическая структура решения исходной проблемы размерности n [74].

Пусть задана трехуровневая структура одинаковых подсистем, которые должны решать задачи, эквивалентные друг другу по трудности. Исходная функция сложности решения равна $K(n)$. Иерархия (рис. 1.8) должна удовлетворять для некоторых ϵ неравенству $4K(n/4) + 2K(\epsilon n/2) + K(\epsilon^2 n) \leq K(n)$.

Если функции $K(n)$ линейны по n , то равенство имеет место при $\epsilon = 0$, что соответствует одноуровневой структуре. Если $K(n) = n^N$, $N > 1$, то существует такое ϵ , при котором неравенство удовлетворяется. Так, при $K(n) = n^2$ имеем $\epsilon = 0,76$. Отсюда следует, что иерархическая структура целесообразна, если функция сложности решений возрастает быстрее линейной зависимости и вверх по иерархии передается упрощенная модель подпроблемы.

Качество функционирования сложной системы обычно принято выражать через показатели эффективности, которые оценивают степень приспособленности системы к выполнению поставленных

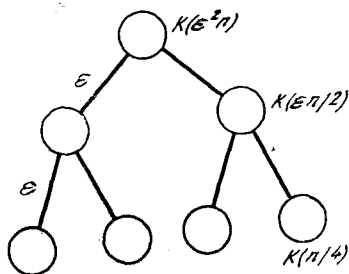


Рис. 1.8

перед ней задач. Показатель эффективности зависит от структуры системы, значений ее параметров, характера взаимодействий с внешней средой, т. е. показатель эффективности определяется процессами функционирования системы. Показатель эффективности можно считать функционалом от процесса функционирования системы.

В связи с тем, что сложные системы работают в условиях действия случайных факторов, значения функционалов оказываются случайными величинами. Поэтому при выборе показателей эффективности обычно пользуются средними значениями соответствующих функционалов. Иногда в качестве показателей эффективности используются вероятности некоторых случайных событий.

Наиболее широко используются следующие основные показатели эффективности: эффективность (стоимостная), вероятность выполнения системой поставленной задачи, живучесть, надежность, быстродействие, пропускная способность, способность к перестройке. Данные показатели взаимосвязаны и выбор того или иного показателя эффективности определяется спецификой рассматриваемой системы.

Многие задачи управления могут быть сформулированы как максимизация выражения $(G - L)$, где G — прибыль, а L — убытки, определяемые в общем виде. Пусть система управляется двумя переменными x_1 и x_2 и $G = y_1 = Y_1(x_1, x_2)$; $L = y_2 = Y_2(x_1, x_2)$. Тогда

$$\max (G - L) = \max_{x_1, x_2} [Y_1(x_1, x_2) - Y_2(x_1, x_2)]. \quad (1.17)$$

Будем считать одну часть системы управления ответственной за эффект y_1 , другую — за эффект y_2 , установив тем самым две локальные цели (подцели): максимизировать y_1 и минимизировать y_2 . И пусть управление организовано так, что одна часть системы воздействует на x_1 , а другая — на x_2 . В результате оптимизации функционирования каждой части должны быть получены выходные эффекты $\max_{x_1} [Y_1(x_1, x_2)]$, $\min_{x_2} [Y_2(x_1, x_2)]$ и целевая функция системы при данной системе управления будет иметь вид $\max_{x_1} [Y_1(x_1, x_2)] - \min_{x_2} [Y_2(x_1, x_2)]$, экстремум этой функции в общем случае не совпадает с (1.17).

Предположим, что одной подсистеме ставится задача максимизации $F_1(x_1, x_2)$, а другой — минимизации $F_2(x_1, x_2)$, причем функции F_1 и F_2 определены некоторым образом и отличны от Y_1 и Y_2 . Тогда общий эффект функционирования системы определяется как $V = \max_{x_1, x_2} [F_1(x_1, x_2)] - \min_{x_1, x_2} [F_2(x_1, x_2)]$.

Разность между $U = \max_{x_1, x_2} [Y_1(x_1, x_2)] - Y_2(x_1, x_2)$ и V можно рассматривать как меру структурной неэффективности системы.

Если подсистемы оптимизируют свои локальные целевые

функции и при этом не имеют точной информации о переменных, управляемых другими подсистемами, то неэффективность обуславливается связями между подсистемами. Неэффективность, связанная с процессами принятия решения, обусловлена тем, что подсистемы не обеспечивают экстремумы своих локальных целевых функций.

Наиболее часто употребляемый стоимостный критерий эффективности функционирования системы — максимум прибыли в единицу времени:

$$\max_{m \in M} W(m) = \max_{m \in M} [W_1(m) - W_2(m)], \quad (1.18)$$

где $W_1(m)$ — экономический эффект в единицу времени от функционирования системы; $W_2(m)$ — приведенная к соответствующей единице времени сумма эксплуатационных расходов $W_2^1(m)$ и капитальных затрат $W_2^2(m)$ с учетом нормативного срока окупаемости s_n , т. е.

$$W_2(m) = W_2^1(m) + s_n W_2^2(m); \quad (1.19)$$

m — вектор, характеризующий варианты построения системы и их характеристики; M — область определения вектора m .

Поскольку некоторые характеристики системы могут быть случайными функциями времени, то необходимо усреднение $W(m)$ по соответствующим распределениям параметров системы.

В некоторых случаях удобнее другая запись критерия (1.18) (критерий полных затрат):

$$\min_{m \in M} F(m) = \min_{m \in M} [W_2(m) - W_3(m)], \quad (1.20)$$

где потери $W_3(m)$ обусловлены несовершенством системы по сравнению с некоторой идеальной.

Иногда используют критерии, являющиеся частными случаями (1.18) и (1.20).

В качестве критерия эффективности при проектировании систем удобно принять выражение (1.20), в котором первое слагаемое правой части относится к приведенным затратам на создание и обслуживание системы, а второе — к потерям из-за несовершенства по сравнению с идеальной. Основную формулировку критерия полных потерь (1.20) модифицирует для упрощения. Получающиеся при этом оптимальные задачи решаются по новым вторичным критериям, которые в том или ином смысле согласуются с исходным первичным критерием эффективности.

Иногда используются удельные критерии, представляющие собой отношение, например, полезного эффекта к затратам. Ценность подобных критериев весьма относительна из-за их неизбежной субъективности.

Вследствие трудности составления исчерпывающей математической модели системы и действующих на нее возмущений на практике прибегают к более или менее обоснованной декомпозиции

критерия по характеристикам, относящимся к различным сторонам эффективности системы.

В большинстве случаев предполагается, что функции затрат $W_2(m)$ и $W_3(m)$ аддитивны по составляющим векторам m . Если ввести понятие характеристики ошибки или просто ошибки, то решение задачи об экономически оптимальных параметрах упрощается. Эта величина характеризует отклонение систем от идеальной (абсолютно надежной и т. д.).

Критерий (1.20) после введения характеристики ошибки может быть представлен в виде

$$\min_{m \in M} F(m) = \min_{m \in M} \{W_2(m) + W_3[p(m)]\}. \quad (1.21)$$

Если потери $W_3[p(m)]$ монотонно растут с ростом любой составляющей вектора, характеризующего ошибки $p(m)$, то ошибку называют адекватной этим потерям. При отсутствии информации о связи потерь с ошибками условие адекватности характеристики ошибки может позволить свести задачу оптимального расчета потерь $W_3[p(m)]$ к задаче расчета $p(m)$. При неизвестной зависимости $W_3[p(m)]$ общую задачу (1.21) можно свести к частным задачам минимизации составляющих вектора $p(m)$.

При выборе оптимального варианта построения структуры автоматизированных информационно-управляющих систем используются различные характеристики качества выполнения задач управления и их этапов, построения узлов системы, а также характеристики качества построения и функционирования системы в целом и ее отдельных подсистем.

Основными характеристиками задач и этапов управления систем являются: объем выполняемых операций; эффект от их выполнения; моменты выполнения, которые могут быть случайными или фиксированными; интенсивность (частота) выполнения; качество выполнения по времени, стоимости, достоверности, надежности и т. д. Характеристиками задач могут выступать также характеристики используемых массивов, процедур и т. д.

Основными характеристиками узлов системы обычно являются: затраты на разработку, создание и эксплуатацию системы; производительность, надежность, размещение, загрузка, число элементов и др.

Основными характеристиками взаимосвязей узлов системы являются: затраты на их разработку, создание и эксплуатацию; число взаимосвязей между элементами; затраты и время на передачу информации; надежность и т. д.

При синтезе автоматизированных информационно-управляющих систем основными характеристиками качества являются: затраты и время разработки и внедрения системы; эксплуатационные расходы; потери в системе управления от несвоевременности представления информации; быстродействие системы (время отклика системы на запросы); необходимый объем памяти для размещения и хранения массивов (требуемая емкость и число различ-

ных типов ЗУ для организации памяти системы); общий расход времени, занятость технических средств при обработке информации; необходимое число различных средств при выполнении процедур и алгоритмов преобразования информации (эта характеристика определяет минимально необходимое число средств каждого типа, одновременно занятых в процессе обработки информации). При оценке качества разрабатываемой системы наряду с указанными выше используются и другие характеристики: достоверность информации; надежность системы, ее отдельных частей и элементов; вес и габариты и др.

Классификация требований, предъявляемых к основным характеристикам систем, приведена на рис. 1.9.

Основные характеристики качества структуры автоматизированных информационно-управляющих систем могут быть выражены в аддитивной форме, если они зависят лишь от состава их элементов и не зависят от структуры графа G_0 (например, стоимость разработки, загрузка узлов, вес и энергопотребление узлов), либо в рекуррентно вычислимой форме, если они зависят как от соответствующих характеристик элементов выбранных вариантов, так и от их взаимосвязей. При постановке задач синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем используются также разрывные функции типа фиксированных доплат (например, стоимость комплектов технических средств).

В практических задачах, как правило, необходимо минимизировать стоимость разработки, внедрения и эксплуатации системы выбранной структуры на некотором отрезке времени при ограничении на другие характеристики качества системы (время формирования выхода не должно превышать заданную величину; число средств каждого типа не должно быть больше допустимого; объем памяти ЗУ различных типов не может быть больше заданного; время разработки системы должно быть в заданных пределах и т. д.).

В зависимости от конкретной постановки задачи синтеза, а также от важности той или иной характеристики в качестве критерия оптимальности выбранного варианта системы может выступать одна из указанных выше характеристик, а на другие накладываются ограничения. На практике чаще всего используется обобщенный критерий, в котором с определенными весовыми коэффициентами учитываются значения нескольких характеристик (например, затраты на создание, внедрение и эксплуатацию системы на некотором отрезке времени). Если система разрабатывается как подсистема автоматизированной информационно-управляющей системы и окончательный ее вариант должен выбираться совместно с другими подсистемами по общим для всей системы критериям, то возможен многокритериальный вариант задачи синтеза.

Быстродействие системы управления определяется ее способностью реагировать с достаточной оперативностью на возникаю-



Рис. 1.9

щие возмущения. Быстродействие зависит не только от возможностей технических средств и персонала в осуществлении сбора, обработки и передачи информации, но и от организационной структуры, т. е. от распределения функций управления и необходимых для их реализации полномочий по уровням руководства и структурным подразделениям каждого уровня.

При оптимизации структуры сложных систем важное значение имеет информация, используемая в системе, и такие ее характеристики, как степень агрегированности на разных уровнях управления, своевременность и полнота получения и использования, ценность ее для принятия тех или иных управленческих решений. Традиционно ценность информации определяется как меры уменьшения неопределенности ситуации при ее получении.

Другой подход к определению понятия ценности информации связан с исследованием ее влияния на достижение стоящих перед системой целей, с оптимизацией целевой функции системы [47]. Пусть целевая функция зависит от некоторого процесса $\xi(t)$ и пусть

$$a \leq \xi(t) \leq b, \quad \forall t \in [0, T]. \quad (1.22)$$

Информация, получаемая от процесса $\xi(t)$, позволяет для заданного функционала $J(\xi)$ эффективности функционирования системы определить, например, величины $J^* = \max_{\xi} J(\xi)$, а также $J^- = \min_{\xi} J(\xi)$ при условии (1.22).

В этом случае величина

$$\Delta = J^* - J^- \quad (1.23)$$

может характеризовать ценность информации, т. е. меру неопределенности при вычислении целевой функции. Данная оценка соответствует принципу гарантированного результата. Если бы была принята другая гипотеза, например введение некоторой функции риска, то вместо оценки (1.23) можно было бы построить другую оценку. Таким образом, ценность информации зависит от гипотезы поведения элементов, принимающих решение.

Среди характеристик, которые характеризуют динамику развития системы, отметим прежде всего такие, как минимальное время, в течение которого может быть реализована система; оптимальная величина задела в каждом из периодов для обеспечения возможности эффективного развития системы в последующие периоды; характеристики динамики использования ресурсов в процессе создания системы, например, равномерность; характеристики, оценивающие время и ресурсы при переходе от некоторого варианта структуры к заданному (некоторому множеству) возможных вариантов реализации структуры; гибкость выбранного варианта структуры (наличие потенциальных возможностей, не используемых в данном варианте), эта характеристика во многом определяется универсальностью используемых техниче-

ских средств, информационного и математического обеспечения системы.

Важной характеристикой, определяющей качество выбранного варианта структуры системы с учетом динамики ее развития, является ее гибкость, т. е. способность (возможность) изменения (перераспределения) выполнения функций между элементами системы при переходе от одного варианта построения системы к последующим. Гибкость отдельного варианта построения системы характеризует наличие в системе неиспользуемых возможностей по перераспределению функций. Различают: гибкость выбранного варианта структуры, которая характеризует потенциальные, не используемые в данном решении, но возможные варианты ее реорганизации; гибкость выбранного варианта построения структуры системы по отношению к наиболее благоприятному на всем множестве вариантов. Очевидно, что гибкость выбранного варианта структуры определяется специализацией и универсальностью используемых технических средств, сохранением возможных взаимосвязей элементов и т. д.

Пусть $N(x)$ — значение некоторой характеристики выбранного варианта структуры системы; $\bar{N}(x)$ — значение этой характеристики для потенциальных (возможно, не используемых) возможностей выбранного варианта структуры; $N(G) = \max_{x \in G} N(x)$ — значение характеристики наилучшего варианта из всех возможных; $\bar{N}(G) = \max_{x \in G} \bar{N}(x)$ — значение характеристики для потенциальных возможностей наилучшего варианта из всех возможных.

Гибкость выбранного варианта построения структуры системы для отдельных функций определяется отношением числа узлов, в которых выполняется данная функция, к числу узлов, в которых она могла бы выполняться в возможном наиболее благоприятном варианте:

$$F_i(x) = N_i(x)/N_i(G). \quad (1.24)$$

Гибкость выбранного варианта построения узлов системы определяется отношением числа различных функций, которые выполняются в данном узле, к суммарному числу функций, которые также могут выполняться в данном узле:

$$F_j(x) = N_j(x)/\bar{N}_j(x). \quad (1.25)$$

Гибкость структуры системы в целом может характеризоваться относительно выполняемых функций, с точки зрения возможного перераспределения их между узлами и уровнями системы и использования потенциальных возможностей выбранных вариантов реализации узлов (и технических средств).

Выше мы рассмотрели лишь основные характеристики структуры систем управления. Заметим, что к проблеме выбора критериев эффективности структуры систем и их характеристик нам

придется неоднократно возвращаться при рассмотрении различных математических моделей оптимизации структуры сложных систем.

§ 1.5. Классификация моделей и методов анализа и синтеза структуры сложных систем

Классификация моделей и методов анализа и синтеза структуры сложных систем может быть выполнена по различным признакам:

— по степени их формализованности и используемому математическому аппарату;

— неформализованные, описательные, эвристические (используют интуитивные соображения и приемы, правила и упрощения, отражающие опыт специалистов и не имеющие строгого математического обоснования (см. гл. 2));

— формализованные;

— с использованием методов математического программирования (см. гл. 2—4);

— методы поиска оптимальных решений на графах (гл. 3 и 4);

— методы имитационного моделирования (гл. 5);

— с использованием оптимизационных и имитационных моделей (см. гл. 5);

— по числу возможных вариантов построения системы (такое число может быть конечно либо бесконечно, отметим, что в первом случае задаче синтеза структуры может соответствовать некоторая задача математического программирования с булевыми переменными, а во втором случае, с включением в задачу математического программирования, — также и непрерывными переменными);

— по характеру задания показателей качества построения системы и ограничений (заданы в явном виде либо алгоритмически);

— по характеру решения задачи (ищется глобальный оптимум, локально-оптимальное допустимое решение, одно из допустимых решений);

— по характеру взаимодействия пользователя с оптимизационными и имитационными моделями (имеет ли пользователь возможность изменять (влиять на) ход решения);

— по характеру учета в задачах синтеза структуры управляющей и управляемой частей системы:

— отдельный синтез управляемой и управляющей частей;

— совместный синтез структуры управляемой и управляющей частей;

— по характеру предположений о исходной информации (известны или подлежат определению в процессе синтеза):

— принципы, функции и алгоритмы управления;

— средства переработки информации (их состав и размещение);

- состав, число, расположение и взаимосвязь управляемых объектов и узлов управления, число уровней управления;
- распределение функций по узлам системы;
- по учету динамики развития системы:
- статические (планирование проводится на некоторый заданный момент времени, в самих моделях время явно не учитывается);
- динамические (планирование проводится для некоторой совокупности заданных моментов времени, в моделях задается взаимосвязь вариантов, реализуемых в различные моменты времени);
- учитывается ли динамика функционирования объектов и систем управления;
- по возможности применения на различных этапах проектирования (предварительный анализ структуры систем, детальный анализ, синтез структуры и т. д.);
- по применимости для различных систем (подсистем) и объектов (предприятия, технологические процессы, АСУТП, АСУП, ОАСУ и др.).

Для анализа структуры различных систем используются: методы теории графов; методы сбора и обработки статистического материала о структурных параметрах системы и их взаимосвязи с показателями эффективности системы; методы имитационного моделирования; анализ структуры систем управления может осуществляться с использованием различных моделей: блок-схемное графическое изображение замкнутых циклов управления, структурно-информационно-временные схемы, табличное изображение управленческого процесса в его временной последовательности [39].

Методы статистического анализа структуры сложных систем устанавливают корреляционную связь между различными характеристиками структуры, такими, например, как число подсистем и видов продукции, численность рабочих (или же рабочих и служащих) и т. п. Обычно найденная мера корреляции справедлива лишь в среднем, по группе объектов, статистика в этих случаях часто набирается по множеству объектов, поэтому правомерность полученных взаимосвязей на данном конкретном предприятии требует особого обоснования.

Наибольшее развитие в настоящее время получили методы анализа структуры автоматизированных информационно-управляющих систем. Так, при разработке структуры АСУ возникает проблема взаимосвязанного анализа различных аспектов деятельности систем: процессов выбора целей и принятия решений; процессов обработки информации; технологических процессов (движения сырья, материалов и ресурсов различного типа).

Методической основой формализованного анализа структуры подобных систем является агрегативно-декомпозиционный анализ систем (АДАС) [40] (см. также § 1.2). АДАС является формальным исследованием, которое проводится для того, чтобы дать

возможность лицу (коллективу), принимающему решения, уточнить существующую ситуацию и помочь при выборе управляющих воздействий. Когда все переменные измеримы, АДАС смыкается с исследованием операций. Напротив, когда приходится выносить неформализованные суждения и когда преобладает неопределенность, анализ сводится к систематическому описанию альтернатив и последствий в надежде увеличить рациональность принимаемых решений. На практике результаты такого анализа представляются в виде некоторого числа альтернативных проектов структуры системы, соответствующих глобальным целям и сопровождаемых оценками их полезности, которая выражается через оценки эффективности либо через качественные оценки «преимуществ». Анализ, начинающийся с описания существующей системы, является основой для проектирования изменений структуры, ответственности, методов и процедур принятия решений, системы обработки информации и технологий.

Основными принципами, заложенными в методологию АДАС, являются (см. также § 1.2, рис. 1.2; 1.3):

— проведение анализа должно основываться на общих целях системы, формулируемых вышестоящими уровнями, формулировка целей меняется в зависимости от уровня анализируемой системы; как правило, цели высших уровней формулируются в качественном виде;

— анализ должен охватывать технологическую систему (производственный процесс, обеспечение его ресурсами и сбыт продукции), которая обычно является наименее гибкой частью системы;

— анализ должен охватывать процессы управления и обработки данных, которые увязывают производственный процесс с целями системы и критериями ее функционирования.

Методология АДАС применима не только к анализу структуры существующих систем, но и к разработке новых систем. АДАС включает в себя разработку следующих вопросов: выявление и формулировка общих и частных целей развития системы; анализ организационной структуры и распределения ответственности, включая функции контроля за эффективностью и качеством работы системы управления; анализ системы обработки данных и методов принятия решений, в том числе с использованием ЦВМ; анализ технологических процессов системы и выявление узких мест.

На этапе предварительного ознакомления с существующей системой и задачами, подлежащими реализации в АСУ, перед руководящей группой разработчиков встает задача формулировки целей, указывающих направление действий, критериев эффективности и ограничений для этих задач и системы в целом.

Для сложных систем строится дерево целей, которое является наглядной графовой моделью иерархической взаимосвязи целей системы в целом и отдельных ее подсистем. При построении дерева целей большое значение отводится эвристическим методам, экспертным оценкам, необходимость которых обусловлена

большой неопределенностью в решении этих задач. Если различным целям и подцелям придать числовые значения в зависимости, например, от затрат на их реализацию, то можно провести количественный анализ построенного дерева целей [56, 68].

Сложный характер формирования дерева целей не позволяет построить строгую математическую модель целеобразования и заставляет ограничиться формулировкой некоторых закономерностей целеобразования [56, 68]: 1. Ни одна цель высших уровней иерархии (кроме последнего, низшего) не достигается непосредственно, а лишь при достижении подцелей, на которые она распадается. В то же время это не простое сложение подцелей, так как каждая из подсистем может обладать собственными подцелями, отличающимися от глобальной. 2. Средства к достижению цели или критерии эффективности системы могут быть целями ее подсистем. 3. В системе существуют состязательность целей и их взаимосвязь, которые проявляются на всех уровнях дерева целей системы. 4. Цели верхних уровней формулируются в общем виде, в интегральных, качественных понятиях и конкретизируются на нижних уровнях. 5. Для каждой системы могут быть цели внешние и внутренние, самосохранения, взаимодействия с внешней средой и т. д.

Состязательность целей выражается в том, что иногда приходится поступаться степенью реализации одной цели во имя достижения другой. Взаимосвязь (взаимная поддержка) целей состоит в том, что нередко достижение одной цели способствует реализации другой. Анализ и учет как состязательности, так и взаимосвязи и переплетения целей дают важный материал для принятия обоснованных решений и оценки их последствий.

Цели нижних уровней дерева целей являются средствами достижения целей высших уровней. Дерево целей реализуется наиболее эффективно, если каждая подсистема стремится достичь своей подцели, имея в виду цель всей системы.

Выявление иерархии целей и подцелей — наиболее ответственная работа при анализе систем управления, результаты которой оказывают существенное влияние на разработку и функционирование систем управления.

Цели общественных и экономических систем не всегда являются очевидными и не вытекают непосредственно из условий деятельности и интересов каждой рассматриваемой подсистемы.

Целевая информация нуждается в сложной обработке, для чего требуется детально разработанная технология. Наиболее часто для подобной обработки используют следующие методы: 1. Детализация целей — дерево целей. 2. Установление взаимосвязи и дублирования целей — матричный анализ. 3. Оценка относительной важности целей, их взаимосвязей и придание им численных оценок — экспертные оценки. 4. Установление предполагаемых затрат на достижение целей — экспертные оценки, математическая статистика. 5. Прогнозирование появления целей в бу-

дущем — метод сценариев. 6. Проверка и испытание комплексов целей — методы имитации, деловые игры.

Часто допускают ошибку, смешивая понятия целевого назначения системы и критерия эффективности. В отличие от целевого назначения, определяющего целенаправленность, смысл функционирования систем и основную ее задачу, критерий эффективности является показателем, определяющим эффективность пути достижения этой цели.

Критерии отдельных подсистем так же, как и их цели, увязывают в схеме дерева критериев — графической модели их взаимосвязи (см. § 1.2).

Цель в системах экономического управления имеет сложный характер и не всегда может быть выражена единым показателем, поэтому и критерий может иметь сложную форму (представлять взаимосвязанный комплекс критериев). В этих случаях обычно выявляется главный критерий и устанавливается ранжировка или приоритетная последовательность остальных.

Связь между целью и критерием имеет гибкий характер. Можно представить случаи, когда одна цель контролируется несколькими критериями, и наоборот, когда нескольким целям соответствует один критерий.

Использование дерева целей оказывается весьма плодотворным. Структура дерева целей может быть принята в качестве первого приближения построения системы моделей, указывая на взаимосвязь и взаимоподчиненность проблем.

Основное значение комплексов целей и критериев состоит в том, что они дают основания для объективной оценки с позиции общесистемной эффективности деятельности подсистем различных уровней. Дерево целей и критериев позволяет уточнять и разграничивать функции управления между подразделениями и отдельными руководителями системы управления, права и обязанности, устанавливать целесообразную степень централизации и децентрализации выработки решений.

Деревья целей и критериев могут служить средством отбора содержания информации (кто, что, о чем должен знать?). Это, в свою очередь, дает основание для отбора источников и проектирования исходных массивов информации.

Если известно, какие задачи нужно решить, чтобы достигнуть цели, то от графа целей переходят к графу задач, в котором вершины соответствуют задачам, подлежащим решению, а дуги определяются отношением включения (см. рис. 1.2). Граф целей (задач), если каждая из них соответствует некоторому лицу или подразделению, определяет структуру организации. Однако такая структура обладает многими недостатками. Как правило, она оказывается громоздкой, негибкой, не приспособляемой к изменяющимся условиям функционирования, происходит распыление сил и средств, дублирование работ (например, задачи, имеющие много общего и требующие для решения использования одинаковых процедур, оказываются разделенными между различ-

ными подразделениями). Преимуществом указанного подхода является то, что каждый орган управления сосредотачивает в своем подчинении те структурные элементы, которые ответственны за решение задач, необходимых для обеспечения решения задачи, предписанной этому узлу управления.

Основным элементом анализа при использовании методологии АДАС является агрегат (по аналогии с терминологией, используемой Н. П. Бусленко), модуль. При этом система рассматривается как множество взаимосвязанных агрегатов (модулей).

Важнейшими агрегатами при анализе структуры систем являются: технологический, обеспечивающий преобразование материалов, ресурсов, услуг и т. д.; информационный, обеспечивающий сбор, преобразование, обработку и распределение информации; управленческий, обеспечивающий выполнение заданных целей и вырабатывающий управляющие воздействия остальным агрегатам. АДАС при этом является средством описания системы путем выявления ее агрегатов и их взаимосвязей.

Каждый агрегат определяется:

— входами (технологическими, информационными и управленческими, включающими в себя цели и ограничения, задаваемые другими агрегатами);

— выходами, которые определяются аналогично входам;

— операторами преобразования, представляющими совокупность внутренних операций агрегата, позволяющих из входов получать выходы;

— устройствами, методами и правилами, которые используются при реализации преобразования.

Управляющие воздействия, а также цели, критерии и ограничения могут быть внутренними и внешними по отношению к агрегату. Кроме того, агрегаты характеризуются контролируемыми параметрами и обратными связями.

Пример взаимосвязи трех основных агрегатов приведен на рис. 1.10. Условные обозначения, применяемые для представления анализируемых систем, аналогичны применяемым при построении структурно-информационно-временных схем.

Анализируемая система представляется в виде совокупности взаимосвязанных агрегатов, изображаемых на различных этапах в зависимости от целей анализа с различной степенью детализации. При этом структура системы или отдельные ее части могут быть отражены в виде сквозных оперограмм (цепочек решений) либо сетей, либо в виде системы вложенных агрегатов. Оперограммы могут состояться на повторяющиеся (например, составление производственного графика), либо неповторяющиеся задачи (строительство нового завода, внедрение нового вида продукции и т. д.).

Рассматриваемая система агрегатов служит отправной точкой для анализа и последующего совершенствования структуры системы. АДАС позволяет изучить функционирование системы и выявить его недостатки.

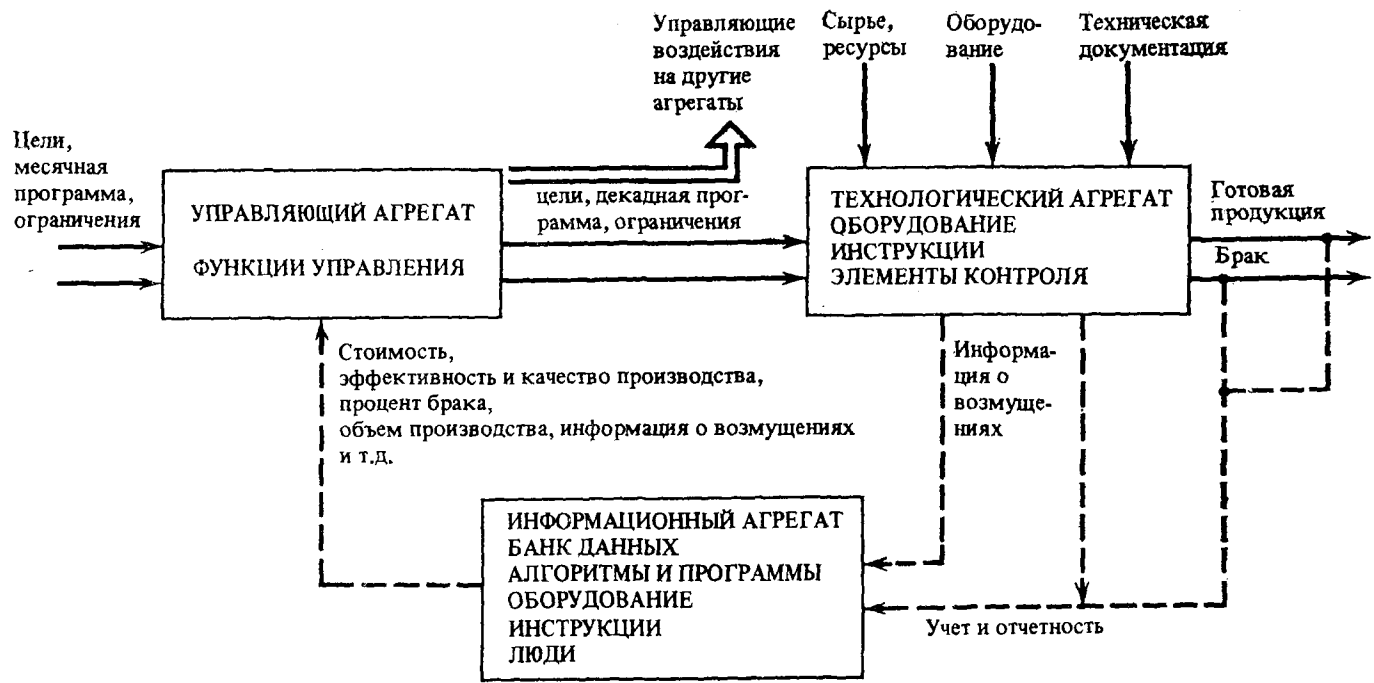


Рис. 1.10

Отметим некоторые свойства и характеристики системы, выявление которых значительно облегчается при использовании АДАС: отсутствие или плохое определение существенных переменных (отсутствуют критерии измерения качества функционирования) и переменных управления; свобода (либо излишняя регламентация) выработки решений; ответственные лица не имеют прав принятия решения, позволяющих выполнить назначенные цели агрегата; нечеткое распределение функций управления и меры ответственности в узлах системы; нечеткое делегирование функций при распределении междууровневого управления; информация, необходимая для управления, недостаточна или избыточна; несовершенство алгоритмов принятия решений отдельных агрегатов; отсутствие или нечеткость критериев и целей на уровне агрегатов; существующее разбиение системы на агрегаты не позволяет осуществлять эффективного управления; отсутствие ряда обратных связей, отсутствие синхронизации последовательностей взаимодействия как на одном, так и на различных уровнях; не продумана система сбора и распределения информации, плохо выбраны источники информации; слишком велико число уровней управления, слишком велика взаимосвязь с агрегатами на нижнем уровне; некоторые части системы функционируют не в полном соответствии с общими целями системы; отсутствие или несогласованность контуров принятия решений; неудовлетворительное распределение информации (место назначения, частота, представление); автоматизация оборвала формальные или неформальные связи, необходимые для регулирования системы; автоматизация обработки некоторых функций привела к исчезновению управления этими функциями, т. е. ответственности, связанной с целями и средствами контроля и регулирования.

Недостатки, выявленные при анализе, требуют улучшения структуры системы, совершенствования системы управления, системы обработки данных и т. д.

Отметим, что АДАС не включает вопросов социологического исследования организаций. Этим вопросам посвящена многочисленная литература.

Результаты исследований, выполненные с помощью методологии АДАС, дополняются формализованными методами исследования систем [39].

Возможна автоматизация отдельных этапов АДАС. Так, например, в Институте системных исследований (ИИС) разработана методика и комплекс программ машинного диагностического анализа систем (система Диана) [75]. Она базируется на использовании элементов математической логики и кванторном анализе. При этом диагностический анализ включает в себя сбор и формализованное представление информации об исследуемом объекте; идентификацию объекта, которая заключается в выделении недостатков анализируемой системы. Они носят как локальный характер, например, дублирование операций, «узкие места», «информационные тупики», так и глобальный характер, т. е. касаются

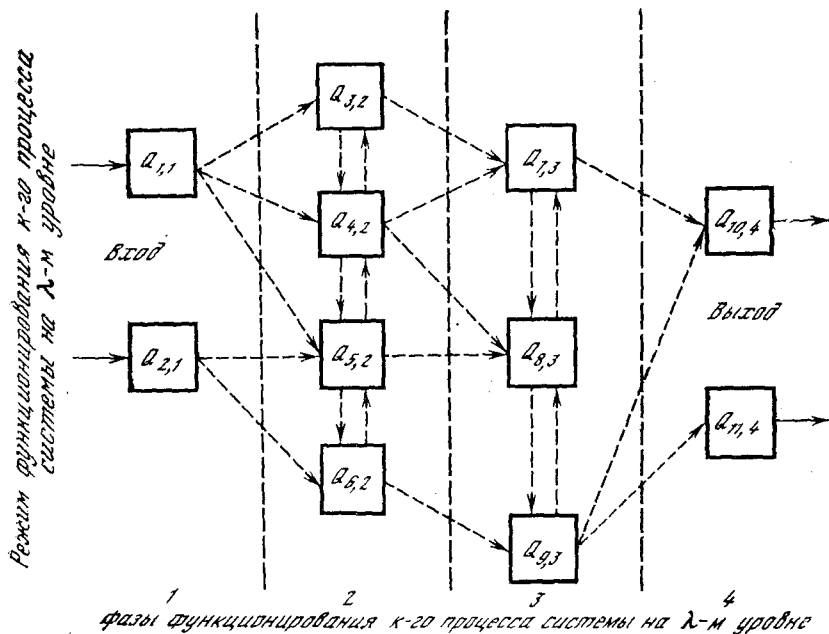


Рис. 1.11

большой части или всей системы, например, «чрезмерный диапазон сферы руководства», «отсутствие координации». Для идентификации недостатков машинным путем разработан ряд тестирующих алгоритмов. Диана реализует идентификацию сети информационных связей, обнаруживая на этой основе некоторые из недостатков, присущих этой сети.

Рассмотрим использование формализованных методов анализа и построения алгоритмической модели производственной организации на примере управления прокатным участком трубосварочного цеха металлургического завода. Эти методы могут быть полезны на отдельных этапах реализации АДАС [59] (см. § 1.3).

Пусть некоторый фрагмент системы на λ -м уровне иерархии выглядит, как представлено на рис. 1.11, где показаны возможные переходы k -го процесса от одного режима к другому в различных r -х фазах под воздействием случайных факторов ($s = 1, \dots, 11$; $r = 1, \dots, 4$). Каждый агрегат представлен в виде

$$\Phi(\bar{x}, \bar{y}) \rightarrow \text{opt}, \quad \bar{x} \in R_{\bar{x}},$$

где \bar{x} — вектор управления; \bar{y} — вектор состояния; $\Phi(\bar{x}, \bar{y})$ — целевая функция; $\bar{x} \in R_{\bar{x}}$ — ограничения на управления ($R_{\bar{x}}$ — область допустимых значений \bar{x}).

Таблица 1.1

| № п/п | Обозначение элементов | Фаза (операция) | Описание элемента (состояния) |
|-------|-----------------------|--|---|
| 1 | Q_{11}^3 | Подготовка штрипса: правка и сварка рулонов | $\min \Sigma \Delta y_{11i}^3$ при $x_{11i}^3 \in x_{11}^3$ |
| 2 | Q_{21}^3 | Мероприятия по улучшению качества металла | Изменение x_{11}^3 |
| 3 | Q_{12}^3 | Нагрев штрипса (верхний предельный режим) | $\min \Sigma \Delta y_{12i}^3$ при $x_{12i}^3 \in x_{12}^3$ |
| 4 | Q_{22}^3 | Нагрев штрипса (номинальный режим) | $\min \Sigma \Delta y_{22i}^3$ при $x_{22i}^3 \in x_{22}^3$ |
| 5 | Q_{32}^3 | Нагрев штрипса (нижний предельный режим) | $\min \Sigma \Delta y_{32i}^3$ при $x_{32i}^3 \in x_{32}^3$ |
| 6 | Q_{42}^3 | Изменение параметров нагрева | Изменение x_{s2}^3 |
| 7 | Q_{13}^3 | Формовка, сварка, редуцирование, калибровка (верхний предельный режим) | $\min \Sigma \Delta y_{13i}^3$ при $x_{13i}^3 \in x_{13}^3$ |
| 8 | Q_{23}^3 | Формовка, сварка, редуцирование, калибровка (номинальный режим) | $\min \Sigma \Delta y_{23i}^3$ при $x_{23i}^3 \in x_{23}^3$ |
| 9 | Q_{33}^3 | Формовка, сварка, редуцирование, калибровка (нижний предельный режим) | $\min \Sigma \Delta y_{33i}^3$ при $x_{33i}^3 \in x_{33}^3$ |
| 10 | Q_{43}^3 | Вырубка обнаруженного брака | $\Sigma B_k = 0$, где B_k — брак k -го типа |
| 11 | Q_{53}^3 | Изменение параметров управления сварочным станом | Изменение x_{s3}^3 |
| 12 | Q_{14}^3 | Легучие ножницы (синхронная работа) | $\min \Sigma \Delta y_{14i}^3$ при $x_{14i}^3 \in x_{14}^3$ |
| 13 | Q_{24}^3 | Легучие ножницы (несинхронная работа) | $\min \Sigma \Delta y_{24i}^3$ при $x_{24i}^3 \in x_{24}^3$ |
| 14 | Q_{34}^3 | Изменение параметров резания | $\bar{x}_{24i}^3 \rightarrow x_{14}^3$ |
| 15 | Q_{15}^3 | Контроль качества выпускаемой продукции | $\min \Sigma B_i$ при $\sum_l x_{ikl} > x_{ik}$ |
| 16 | Q_{11}^2 | Определение оптимальной последовательности прокатки | $\min T_\alpha(m)$ при $S_{mk} \in S_n$ $\sum_k x_{ik} \geq x_i$ |
| 17 | Q_{21}^2 | Определение загруженности агрегатов | Расчет $A_{jnt} = A_j + a_{ij}x_i$ доп |
| 18 | Q_{12}^2 | Составление недельных планов-графиков | Определение $\sum_i x_{im} = x_m$, где m — признак недели |

Таблица 1.1 (окончание).

| № п/п | Обозначение элементов | Фаза (операция) | Описание элемента (состояния) |
|-------|-----------------------|---|---|
| 19 | Q_{22}^2 | Корректировка недельных планов-графиков | Определение $\sum_i x_{im} + x_{i\text{доп}}$ |
| 20 | Q_{32}^2 | Обработка вновь поступивших заказов | Характеристики заказа: $i_{\text{доп}}$ — наименование заказа $\eta_{i\text{доп}}$ — степень прочности $x_{i\text{доп}}$ — величина заказа |
| 21 | Q_{13}^2 | Составление суточных графиков прокатки | Определение $\sum_i x_{ikl} = x_{kl}$ |
| 22 | Q_{11}^1 | Определение ограничений на выпуск продукции | Определение $b_i; a_{ij}; A_j$ |
| 23 | Q_{12}^1 | Расчет плана производства на месяц | $\max \sum_{i=1}^n (O_i - C_i)x_i$, при $x_i \geq b_i$ $\sum_i a_{ij}x_i \leq A_j$ |
| 24 | Q_{22}^1 | Корректировка плана производства | $\max \sum_{i=1}^{n+v} (O_i - C_i)x_i$ при $x_i \geq b_i, \sum_i a_{ij}x_i \leq A'_j$ |

Общий функционал цели объекта управления можно записать в виде

$$F = G_{\Pi}[\Phi'_{SR}(\bar{x}, \bar{y})],$$

где G_{Π} — оператор целевого сопряжения агрегатов системы.

Система управления прокатным участком трубосварочного цеха металлургического завода имеет следующие уровни иерархии, объединяющие различные группы управленческих задач: перспективного планирования (расчет плана производства на квартал, месяц); оперативного планирования — расчет недельных, суточных и сменных планов-графиков выпуска продукции; управления технологическими процессами, решение задач управления режимами работы трубосварочных агрегатов.

В соответствии с методикой декомпозиции системы на агрегаты процесс прокатки сварных труб на всех уровнях управления представляется в виде совокупности взаимодействующих элементов $[Q_{sr}^j]$ (табл. 1.1), представляющих собой фиксированные состояния объекта в различных фазах его функционирования [59].

Для задач управления 1-го уровня целевой функцией является достижение максимума прибыли $\Phi' = \max_x \sum_i (O_i - C_i)x_i$, при $x_i \geq b_i, \sum_i a_{ij}x_i \leq A_j$, где O_i — оптовая цена; C_i — себестоимость;

x_i — план производства; b_i — ограничение на выпуск i -го вида продукции; a_{ij} — время, необходимое для изготовления единицы i -го вида продукции на j -м агрегате ($j = 1$); A_j — фонд времени j -го агрегата.

На 2-м уровне управления задача составления недельных и суточных графиков производства разбивается на две: сначала решается задача определения оптимальной последовательности прокатки запланированных видов продукции, а затем на ее основе рассчитываются план-графики выпуска продукции.

Распределение последовательностей прокатки сводится к оптимизации суммарного времени простоев стана при переходах от выпуска одного вида продукции к другому: $\Phi^2_1 = \min T_\alpha(m)$ при $S_{mk} \in S_n$, $\sum_k x_{ik} \geq x_i$, $i \in I$, где $T_\alpha(m)$ — суммарное время, затрачиваемое на перестройку стана при прокате m -й последовательности; x_{ik} — количество проката i -го вида, которое необходимо выпустить за k -ю смену (сутки, неделю); S_{mk} — совокупность видов продукции, которую необходимо выпустить за k -ю смену (сутки, неделю); S_n — совокупность видов продукции, которую необходимо выпустить по плановому заданию на месяц.

При составлении и корректировке планов-графиков выпуска продукции исходят из рассчитанной последовательности прокатки и максимального использования фонда времени оборудования внутри планируемого периода.

На 3-м уровне процесс прокатки разбит на пять фаз. В каждой фазе определено несколько технологических режимов (табл. 1.1).

Для элементов $\{Q_{sr}^{j-1}\}^\lambda$ первых четырех фаз процесса показателем эффективности управления служит отклонение от заданных параметров технологического режима, которое следует минимизировать, т. е. $\min \Delta y_{sr}^\lambda$, где $y_{sr}^\lambda \in Y$ — множество значений параметров процесса, характеризующих его состояние.

Обобщенным критерием эффективности на 3-м уровне является минимум функции суммарного брака $\Phi^3 = \min \sum_i B_i$ при условии выполнения плана-графика выпуска продукции $\sum_l x_{i,l} \geq x_{ik}$, где x_{ikl} — выпуск i -го вида продукции в l -й период k -х суток.

Для формализации связей между элементами $\{Q_{sr}^{j-1}\}^\lambda$ внутри уровней управления и дальнейшей композиции их в соответствии с общей целью функционирования объекта в единую алгоритмическую модель вводится совокупность логических условий (операторов), распределяющих взаимосвязи агрегатов системы в зависимости от различных факторов (колебание температуры, режим прокатки, наличие брака, степень срочности заказов, возможность корректировки выпуска продукции и др.). Например, для построения модели 2-го уровня вводится оператор P -, который проверяет условие $\eta_i \text{ доп} > \eta_m \text{ min}$, где $\eta_m \text{ min}$ — минимальная срочность заказов, т. е. проверяет степень срочности вновь при-

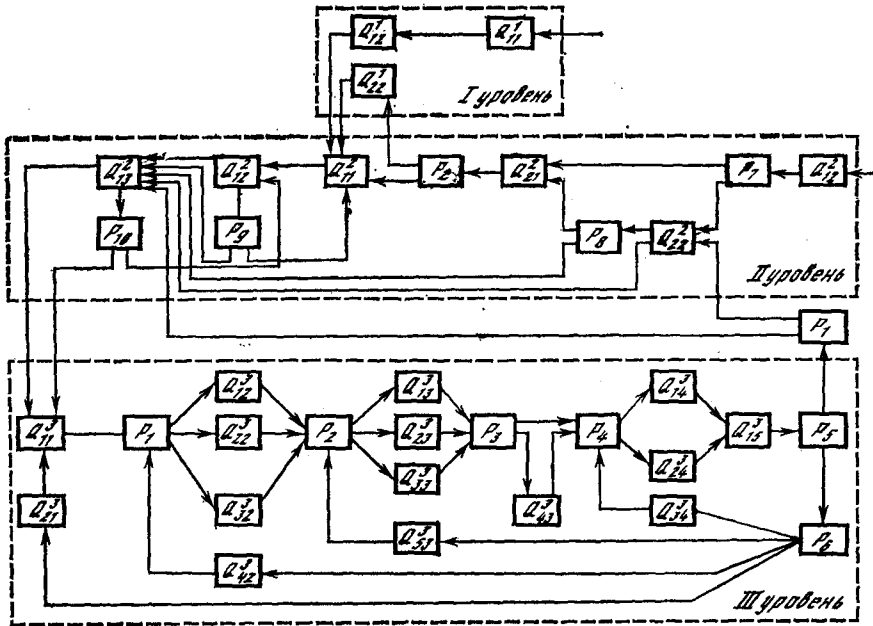


Рис. 1.12

шедшего заказа (превышает ли вновь пришедший заказ степень срочности заказов, назначенных в прокат на текущую неделю): $P_7 = 0$, если $\eta_i \text{ доп} \leq \eta_m \text{ min}$; $P_7 = 1$, если $\eta_i \text{ доп} > \eta_m \text{ min}$.

Общая модель системы с ее взаимосвязями показана на рис. 1.12. Однако оператор G_{11} , задавая логическую структуру алгоритмической модели системы, не детализирует связи между ее отдельными агрегатами и по составляющим векторов \bar{X} и \bar{Y} . При необходимости дальнейшей детализации формализации механизма сопряжения элементов целесообразно использовать стандартное описание взаимодействия элементов в сложных системах (см. § 1.3).

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

§ 2.1. Введение

Основные результаты исследований, изложенных в данной главе, являются дальнейшей детализацией общей задачи синтеза структуры сложных систем (см. § 1.2), применительно к синтезу структуры автоматизированных информационно-управляющих систем.

При синтезе структуры АСУ проводится выбор задач управления, возлагаемых на технические средства, алгоритмов их реализации в АСУ, распределение выбранных задач по узлам (уровням) системы, определение комплекса технических средств в узлах АСУ. Выбранная структура считается оптимальной, если общая эффективность разрабатываемой АСУ максимальна.

Основными элементами АСУ являются отдельные исполнители, группы лиц — подразделения, технические средства, комплексы технических средств и т. д. По отношению к обрабатываемой информации элементы АСУ могут выступать либо как источники, либо как потребители, либо как звенья обработки.

Взаимосвязь элементов может определяться соподчиненностью в процессе управления, участием в едином процессе обработки информации, взаимным расположением в пространстве и т. д.

Функции системы представляются в виде совокупности взаимосвязанных задач, которые, в свою очередь, могут быть разбиты на совокупность операций, массивов и процедур. Последовательно выполняемые операции задачи обычно называются ее этапами. По известным характеристикам операций и их взаимосвязей могут быть получены соответствующие характеристики этапов, задач и т. д.

При формализации взаимосвязей между функциями (задачами, этапами или операциями) могут учитываться взаимосвязи, отражающие либо порядок их следования, либо лишь объем или поток обмениваемой информации между функциями без указания временных характеристик. Назовем взаимосвязи первого типа временными, а второго — объемными. Естественно, что при задании временных взаимосвязей могут задаваться и соответствующие объемы или потоки. Взаимосвязи между функциями также могут быть представлены в виде графа (см. § 1.2). В общем случае взаимосвязь между задачами задается в виде некоторого оператора, который определяет в зависимости от моментов выполнения предыдущих операций моменты (или функции распределения) последующих.

Таким образом, задача синтеза структуры АСУ состоит в таком отображении определенным образом сгруппированных задач

по определенным образом сгруппированным узлам системы, при котором достигается экстремум критерия качества отображения при выполнении заданных ограничений (см. § 1.2).

При формализации задач синтеза структуры АСУ встречается два типа отображений.

Тип А. Объем задачи выполняется лишь в одном из нескольких возможных элементов.

Тип Б. Объем задачи распределяется между несколькими элементами.

Формализация задач типа А приводит к математическим задачам целочисленного программирования, а Б — смешанного линейного и целочисленного программирования.

Постановки задач синтеза структуры АСУ могут различаться по следующим условиям: наличию зависимости между задачами; типу выполняемых задач (оперативного типа, плановые); разбиению задач на этапы (операции); фиксировано или подлежит выбору множество задач; фиксированы или подлежат выбору взаимосвязи между задачами; взаимосвязям между задачами: объемные, временные, объемно-временные; наличию связей между элементами; выделены ли элементы источники и потребители; учитывается ли территориальное расположение элементов; фиксированы или подлежат выбору элементы; фиксированы или подлежат выбору взаимосвязи между элементами; типу используемых условий (тип А или Б); учитывается ли большая загрузка. Постановки задач могут также различаться типом учитываемых характеристик, видом целевых функций и ограничений (см. § 1.4).

В данной главе рассматриваются постановка общей задачи, модели и методы формализации и алгоритмизации частных задач выбора оптимальной структуры автоматизированной информационно-управляющей системы и ее отдельных подсистем, возникающие на этапах технического проектирования. В общем случае синтез структуры системы включает: выбор состава подсистем, задач и их этапов; синтез информационной подсистемы; распределение выполняемых функций, задач и информационного обеспечения по уровням и узлам системы; выбор комплекса технических средств, обеспечивающих заданные требования к качеству решения задач. Сформулирована общая задача синтеза, выделены типовые задачи синтеза основных элементов и частей системы, приведена постановка и методы решения задачи выбора оптимального варианта построения системы на синтезируемых моделях допустимых вариантов ее реализации. При этом задачи синтеза формулируются на разных уровнях агрегации: для совокупности подсистем, для отдельных подсистем, для информационной подсистемы, обладающей специфическими свойствами.

Рассмотрены методы решения задач оптимизации структуры системы с учетом взаимосвязей временного, объемного и логического типа между отдельными подсистемами, задачами и узлами системы при различных технико-экономических характеристиках

качества, алгоритмы решения задач синтеза оптимальной структуры системы с использованием методов математического программирования и теории графов, основанные на схемах «ветвей и границ» и локальной оптимизации.

В рассматриваемых постановках задач в качестве критериев оптимальности использованы: минимизации общих затрат на создание и эксплуатацию системы (при ограничениях на оперативность выполнения функций управления, загрузку узлов и др.), максимизации общей эффективности создаваемой системы (при ограничениях на затраты на создание и эксплуатацию системы, оперативность системы и др.).

При постановке и решении задач синтеза структуры, формализованных в виде нелинейных задач математического программирования, ряд ограничений, отражающих динамику работы системы (например, среднее время пребывания задач в системе), не может быть учтен в постановке исходной задачи. Это приводит к необходимости разработки итеративных процедур выбора структуры с использованием оптимизационных и имитационных моделей (см. гл. 5).

Рассматриваемые модели и методы являются обобщением опыта практической разработки таких систем, как отраслевая автоматизированная система управления «Металл», автоматизированная система управления нефтеперерабатывающего завода и др. [1—4, 34, 70].

§ 2.2. Постановка общей задачи синтеза структуры

При синтезе структуры автоматизированных информационно-управляющих систем возникает необходимость решения следующих основных задач: 1) формализации функциональных и информационных задач, узлов системы и их взаимосвязей, в том числе выбор (синтез) типовых подсистем, задач, модулей и т. д. (модели и методы решения данных задач рассматриваются в § 2.4, 2.5); 2) выбора вариантов построения узлов и их размещения (см. § 3.2); 3) выбора вариантов выполнения функциональных задач и их этапов; 4) выбора вариантов построения информационной системы; 5) формализации отображения множества взаимосвязанных задач управления и их этапов на множество взаимосвязанных узлов; 6) выделения частей, агрегирования и их оптимизации; 7) выбора оптимальных вариантов построения системы; 8) планирования очередности создания выбранного варианта системы.

Общая последовательность задач и этапов синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем приведена на рис. 2.1, а более детально этапы и задачи синтеза структуры показаны на рис. 2.4, 2.5.

На начальных этапах синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем формулируются требования к разрабатываемой системе и строятся альтернативные

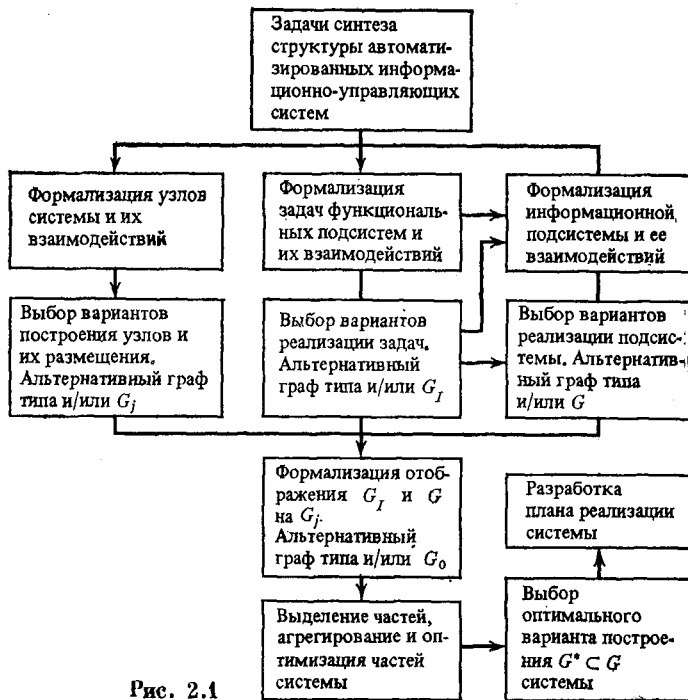


Рис. 2.1

графы (см. § 1.2), формализующие взаимосвязи функций и задач системы. Вершины I графа $G_I = (I, \Gamma_I)$ в зависимости от рассматриваемой задачи отождествляются с массивами и процедурами обработки информации, задачами управления и их этапами и т. п. Дуги Γ_I графа отражают взаимосвязи временного, логического и объемного типа (см. § 1.4).

Для информационных систем альтернативный граф G формализует варианты реализации технологии сбора, преобразования, хранения, выдачи информации и обладает рядом специфических особенностей, которые необходимо учитывать при его построении [38, 42]. По отношению к информационной системе остальные системы выступают как ее пользователи с соответствующими требованиями.

Взаимосвязи между вариантами построения узлов системы формализуются в виде альтернативного графа $G_J = (J, \Gamma_J)$. Вершины графа G_J отождествляются с вариантами построения узлов переработки информации, возможными местами их размещения, комплексами технических средств и т. д. Дуги графа Γ_J отражают характер взаимосвязи между узлами.

При построении графа G_J возникают задачи распределения взаимосвязанных или независимых элементов по некоторым другим элементам, например, технических средств по узлам и уровням, информационных массивов по уровням памяти вычислитель-

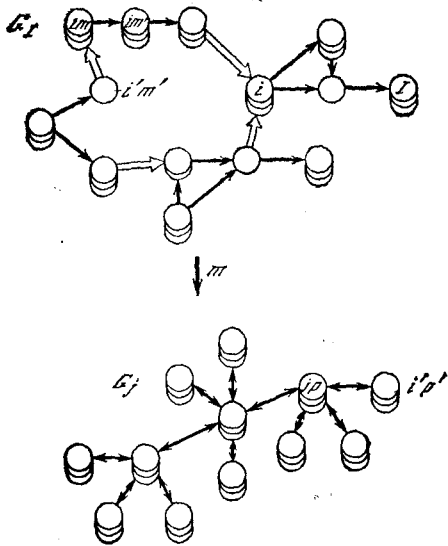


Рис. 2.2

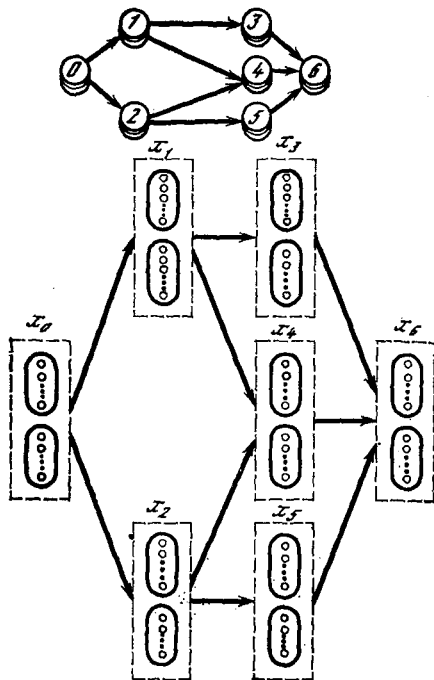


Рис. 2.3

ных средств. Для формализации и оптимизации подобного распределения могут быть использованы методы синтеза структуры, изложенные в данной главе.

Результатом выполнения начальных этапов синтеза является построение альтернативных графов G_I , G и G_J .

На следующих этапах синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем формализуется отображение (см. § 1.2) множества взаимосвязанных функций и задач управления и вариантов их выполнения (задаваемых графами G_I и G) на множество взаимосвязанных узлов системы и вариантов их построения (граф G_J) (рис. 2.2). Задача состоит в поиске оптимального отображения \mathfrak{M}^* задач по узлам системы, при котором достигается экстремум критерия качества при выполнении заданных ограничений.

Результат отображения совокупности взаимосвязанных функций и задач управления, задаваемых графами G_I и G , на множество взаимосвязанных узлов системы, задаваемых графом G_J , формализуется в виде графа $G_0 = (H_0, D_0)$, называемом альтернативным графом вариантов синтеза структуры системы. Характерной особенностью данного графа является многодольность, отдельные доли графа отражают варианты распределения каждой из функций по узлам структуры, а дуги графа характеризуют взаимосвязи между ними.

При построении графа G_0 выделяются части графа, например компоненты связности графа, которые могут быть исследованы отдельно. На выделенных частях графа решается задача исключения заведомо худших вариантов по заданным характеристикам, при этом строится агрегированный граф.

В общем случае альтернативный граф G_0 является ориентированным мультиграфом типа «И/ИЛИ». Для рассматриваемых задач этот граф обладает следующими характерными особенностями (см. рис. 2.3): а) на графе G_0 выделены множества входных и выходных вершин; б) альтернативные множества H_i графа содержат элементы типа «ИЛИ» вариантов выполнения различных способов реализации функций и задач управления с помощью различных технических средств (комплексов технических средств) в различных узлах системы; в) взаимосвязи элементов альтернативных множеств $H_i, i = \overline{1, I}$, формализуют элементы типа «И» — «ИЛИ» и характеризуют последовательность выполнения функций и задач управления; г) альтернативные множества $H_i, i = \overline{1, I}$, графа могут быть разбиты на непересекающиеся подмножества \mathfrak{N}_i , такие, что $H_i \in \mathfrak{N}_i$ и $\mathfrak{N}_i \cap \mathfrak{N}_{i'} = \emptyset$ (это соответствует отдельным подсистемам управления и т. д.); множества элементов I и J также могут быть разбиты на группы, обладающие специфическими свойствами. На этапах технического проектирования граф G_0 может быть представлен в виде структурно-информационно-временной схемы [39].

Таким образом, под синтезом структуры автоматизированных информационно-управляющих систем понимается процесс последовательного решения взаимосвязанных задач синтеза основных элементов и частей системы и выбора наилучшего варианта всей системы по заданным критериям оптимальности.

Под оптимальным вариантом реализации структуры системы понимается подграф $G^* \subset G_0$, обладающий следующими свойствами: 1) G^* — модель одного из допустимых вариантов реализации структуры системы; 2) система, реализуемая в соответствии с моделью G^* , наилучшим образом удовлетворяет заданным требованиям к характеристикам качества синтезируемой системы.

При проектировании структуры информационной системы необходимо: а) разработать технологию сбора, преобразования, хранения, обновления, распределения и передачи информации от источников к потребителям информации; б) выбрать рациональную организацию входных, промежуточных, главных и выходных информационных массивов; в) определить процедуры преобразования и контроля информации и их рациональную организацию; г) выбрать технические средства для хранения и выполнения необходимых преобразований информации; д) обеспечить выполнение требований к характеристикам качества.

Модель структуры информационной системы представляется альтернативным ориентированным графом [38] $G = (I, F, D)$, где $I = \{I_k; k = \overline{1, k_0}\}$ — множество допустимых вариантов ор-

ганизации информационных массивов; $F_r = \{F_r; r = \overline{1, r_0}\}$ — множество допустимых вариантов реализации процедур; $D = |d_{kk}^r|$, ($k = \overline{1, K_0}$; $r = \overline{1, r_0}$) — матрица, отражающая структуру взаимосвязи массивов и процедур в виде $d_{kk}^r = 1$, если массив I_k необходим для формирования массива I_k процедурой F_r , и $d_{kk}^r = 0$ в противном случае. Массивы I_k ставятся в соответствие вершинам, а процедуры F_r — пучкам дуг, порождающим отдельные вершины графа G .

Массив и его характеристики определяются [38, 42]: 1) заданным содержанием массива; 2) способами организации информационных полей в записях, записей из информационных полей и массива из записей; 3) типом носителя информации и запоминающего устройства (ЗУ); 4) стратегией обращения к массиву при записи и поиске необходимой информации.

Процедура преобразования одних массивов в другие и ее характеристики определяются [41]: 1) набором операторов, которых достаточно для выполнения требуемого преобразования; 2) порядком выполнения операторов в этом наборе; 3) назначением средств реализации для каждого оператора. Характеристики применения процедуры F_r для формирования массива I_k зависят от соответствующих характеристик исходного множества массивов $\{I_k\}_k^r = \{I_k/d_{kk}^r = 1\}$, процедуры F_r и формируемого массива I_k .

На альтернативном графе вариантов реализации структуры информационной системы G задаются варианты реализации массивов $I_k \in I_0$, а также способы их формирования с помощью процедур $F_r \in F_0$ из других массивов системы. Для каждого массива (или некоторых массивов $I_k \in I_0$) возможен выбор вариантов процедур $F_r \in F_0$, множество I_0 содержит варианты организации информационных массивов.

Таким образом, альтернативный граф вариантов реализации структуры информационной системы отображает варианты преобразования входных массивов в требуемые на выходе системы и служит для выбора оптимального варианта по заданным критериям оптимальности и ограничениям на характеристики структуры системы, ее отдельных частей и элементов. Основные этапы и задачи синтеза структуры информационной системы рассмотрены в § 2.3 (см. также [38]).

Задача синтеза оптимального варианта отображения \mathfrak{M}^* множества взаимосвязанных функций и задач управления на множество взаимосвязанных узлов формализуется как задача (1.6) — (1.9) поиска оптимального подграфа на альтернативном графе вариантов G_0 . Возникающие при этом постановки задач классифицируются: по наличию вариантов построения задач управления (I) и узлов системы (J); по характеру взаимосвязей между задачами управления и узлами системы; по виду графов G_I , G и G_J (например, последовательные, параллельные, общего вида); по виду оптимизируемых целевых функций и ограничений.

Методы формализации различных характеристик качества построения системы рассмотрены в § 1.4 и последующих параграфах при постановке и решении задач оптимизации структуры различных систем.

При синтезе альтернативного графа вариантов реализации структуры системы возможен подход, основанный на переборе комбинаций из различных вариантов реализации ее элементов. В этом случае число возможных вариантов реализации системы и ее отдельных частей может оказаться весьма большим, что затрудняет применение методики последовательного анализа и выделения допустимых и нехудших по локальным характеристикам вариантов построения элементов и частей системы. При таком подходе в альтернативном графе вариантов построения структуры системы отражаются лишь допустимые и нехудшие по заданным характеристикам варианты. Подобный подход к синтезу графа вариантов реализации структуры информационных систем предложен в [42], а краткое изложение основных этапов и задач синтеза с использованием указанного подхода приведено ниже.

§ 2.3. Основные этапы и задачи синтеза структуры информационной системы

Общий подход и последовательность синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем детализируются в данном параграфе на примере информационной системы. В процессе синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем выделяется и оптимизируется информационная система. Возможны различные подходы к выделению и оптимизации построения информационной системы: 1) выделение информационной системы проводится на основе анализа задач, выполняемых в узлах (либо некоторой совокупности узлов), полученных при распределении задач функциональных систем по узлам системы; 2) информационная система выделяется заранее; распределение ее по узлам и уровням системы проводится независимо от остальных систем либо одновременно с остальными системами; 3) то же, что в п. 2, но затем проводится интеграция информационных систем отдельных узлов, либо некоторой совокупности узлов (при этом определяется целесообразность объединения информации в интегрированной системе и состав локальных информационных систем).

В зависимости от специфики и размерности решаемых задач и уровня их агрегации используются различные подходы к синтезу структуры информационной системы. Так, первый подход используется в том случае, когда функции систем агрегированы и их детализация до отдельных массивов и процедур возможна лишь в пределах одного узла.

Рассматриваемые модели и методы синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем позволяют формализовать выбор оптимального варианта структуры системы

для рассмотренных выше вариантов. Основное внимание уделено распределению задач систем по узлам и уровням системы (§ 2.4—2.7 и гл. 3) и построению информационной системы для отдельного узла при заданном распределении задач по узлам системы.

При формализации задач распределения информационного обеспечения по узлам и уровням системы и построения интегрированной информационной системы для одного узла либо некоторой их совокупности могут быть использованы модели и методы, разработанные для оптимизации распределения задач по узлам и уровням системы и оптимизации построения информационного обеспечения системы.

Как отмечалось выше, синтез структуры информационной системы включает последовательное решение взаимосвязанных задач синтеза вариантов основных элементов и частей графовой модели системы $G_0 = (I_0, F_0, D_0)$ и выбор на ней оптимального варианта структуры системы $G^* = (I^*, F^*, D^*)$ по заданным критериям оптимальности при выполнении заданных ограничений. Общая задача синтеза структуры информационной системы разбивается на задачу синтеза графа допустимых вариантов реализации информационной системы и задачу выбора на этом графе оптимального варианта.

При синтезе структуры информационной системы возникает необходимость решения следующих типовых задач: синтеза информационных массивов; синтеза процедур преобразования одних массивов в другие; определения оптимальных вариантов отдельных частей и всей системы; выбора оптимального набора главных массивов; оптимизации подсистем формирования главных массивов из входа системы и требуемого выхода из главных массивов и др. Типовые задачи синтеза основных элементов и частей структуры информационной системы используются в общей методике синтеза и имеют самостоятельное значение при автоматизации проектирования [38, 41, 42, 52].

Общая последовательность синтеза структуры информационной системы показана на рис. 2.4, где выделены основные этапы и задачи синтеза. Исходной информацией для синтеза структуры информационной системы являются техническое задание на разработку системы и результаты предварительного обследования, на основании которых формулируются требования к характеристикам качества синтезируемой системы.

На первом этапе синтеза строится упрощенная модель структуры системы и определяются: содержание требуемого выхода и возможного входа; процедуры (формулы и алгоритмы) преобразования входной информации в требуемую на выходе системы; граф возможных преобразований информации от источников в необходимую потребителям. Выполняется согласование содержания возможного входа с содержанием требуемого выхода, результаты данного этапа отражаются в стандартной форме [39].

На втором этапе проводится анализ вариантов преобразования информации и вариантов построения информационных массивов

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

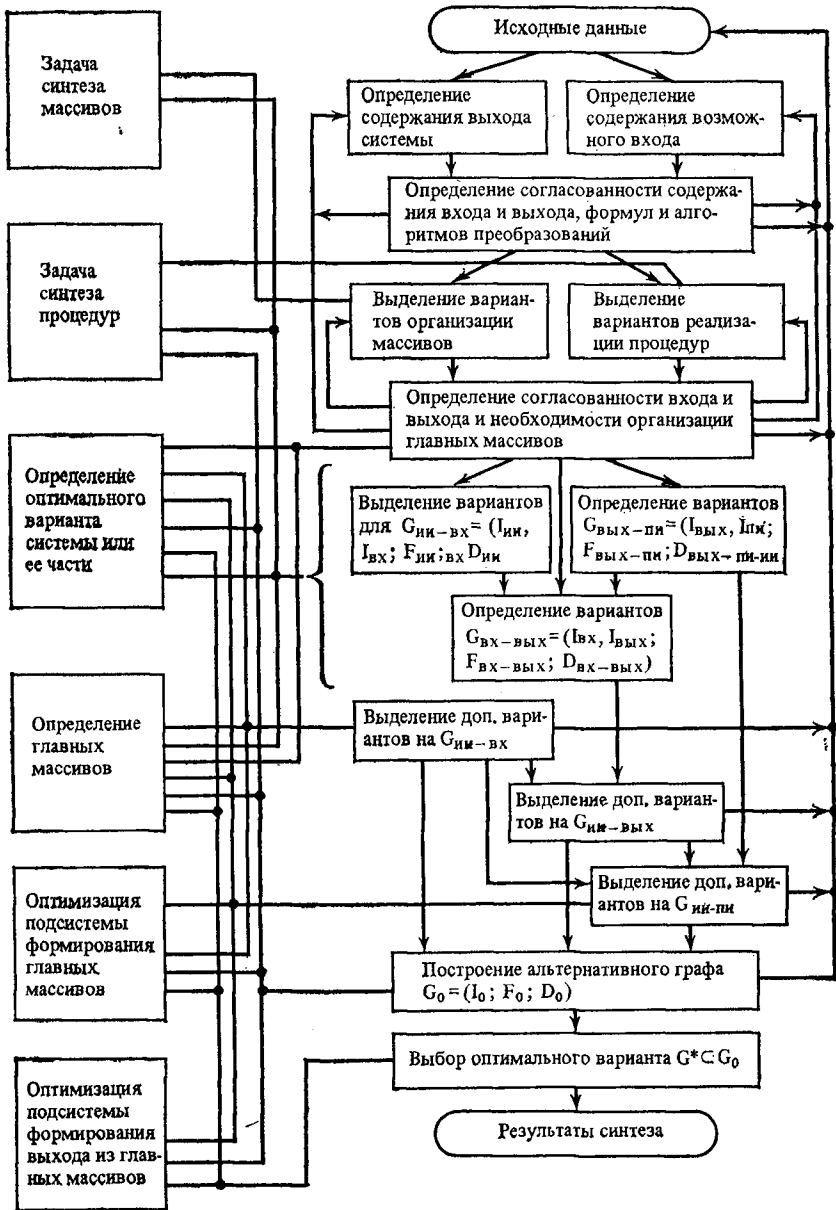


Рис. 2.4

с учетом возможностей используемого математического обеспечения и технических средств. Для процедур преобразования информации анализируются варианты их реализации в системе. Возникает необходимость в решении типовых задач синтеза основных элементов графовой модели — информационных массивов и процедур преобразования одних массивов в другие [38, 41].

Затем строятся альтернативные графы вариантов реализации основных частей структуры информационной системы: формирующей входные массивы системы из массивов источников информации; распределяющей выход системы по потребителям информации; преобразующей вход системы в требуемый выход. При построении вариантов преобразования входа в требуемый выход выделяются части, связывающие между собой соответствующие элементы возможного входа и требуемого выхода, рассогласованные во времени. В результате появляется возможность разбить граф на отдельные части: часть, содержащую варианты организации главных массивов для банка данных системы, и часть, не содержащую главных массивов. Для частей, не требующих организации главных массивов и не связанных с другими частями графа, решается задача синтеза процедур преобразования входных массивов непосредственно в выходные. Для частей, содержащих главные массивы или связанных с частями, содержащими главные массивы, необходимо решить задачу выбора оптимального варианта построения информационной системы [52]. В результате выполнения второго этапа строятся графы вариантов построения указанных частей графовой модели и выделяются части, в которых необходимо использовать главные массивы.

На третьем этапе проводится последовательный анализ основных частей графа вариантов реализации структуры (см. рис. 2.4) системы: графа вариантов реализации предполагаемого входа $G_{\text{ин.вх}} = (I_{\text{ин}}, I_{\text{вх}}, F_{\text{ин.вх}}, D)$; графа вариантов распределения выхода по потребителям информации $G_{\text{вых.пи}} = (I_{\text{вых}}, I_{\text{пи}}, F_{\text{вых.пи}}, D_{\text{вых.пи}})$, графа вариантов преобразования предполагаемого входа и требуемый выход $G_{\text{вх-вых}} = (I_{\text{вх}}, I_{\text{вых}}, F_{\text{вх-вых}}, D_{\text{вх-вых}})$. Для каждой части решается задача определения допустимых вариантов их построения. Затем эти части «сшиваются» попарно, начиная с первых двух, и проводится анализ полученных частей графа. В результате выполнения третьего этапа синтезируется альтернативный граф вариантов реализации структуры системы $G_0 = (I_0, F_0, D_0)$, содержащий допустимые и нехудшие варианты, на нем проводится выбор оптимального варианта.

На четвертом этапе решается задача определения оптимального варианта построения структуры информационной системы, т. е. задача выбора оптимального подграфа G^* на альтернативном графе вариантов G_0 . До решения этой задачи на графе G_0 выделяются отдельные блоки и на таких частях графа (связывающих лишь две вершины) исключаются заведомо худшие варианты. Аналогичным образом выделяются и исследуются компоненты связности графа G_0 .

Отметим некоторые варианты, которые могут получиться в результате выполнения третьего этапа:

— на графе G_0 отсутствуют рассогласованные во времени входные и выходные массивы, т. е. нет необходимости в организации главных массивов. В этом случае задача выбора оптимального варианта сводится к выбору наилучшей технологии преобразования входной информации к требуемому на выходе виду (синтез процедур) [41];

— граф G_0 содержит один допустимый вариант реализации информационной системы. В этом случае задача выбора оптимального варианта сводится к выбору оптимального набора главных массивов [52];

— по локальным оценкам характеристик для организации главных массивов имеется один вариант. В этом случае возникает задача определения оптимальной подсистемы формирования главных массивов из возможного входа [38];

— на графе G_0 имеется один вариант организации главных массивов, который не удовлетворяет ограничениям по допустимому объему памяти. В этом случае возникает задача оптимизации подсистемы формирования выхода с учетом дополнительных преобразований элементов главных массивов в требуемый выход, за счет чего необходимо обеспечить заданные ограничения [38].

Очевидно, что выше перечислены не все варианты, которые возникают после выполнения третьего этапа. Приведенные варианты встречались при разработке ИСС ОАСУ «Металл» и ряда других систем. Указанные варианты общей задачи выбора оптимального варианта на графе G_0 представляют самостоятельный интерес при построении системы автоматизации проектирования информационного обеспечения.

Таким образом, в соответствии с выделенными этапами последовательно применяются модели и методы: синтеза допустимых вариантов организации массивов; синтеза допустимых вариантов процедур; определения организации главных массивов; выделения и анализа изолированных компонент графовой модели и отдельных ее частей (формирующих вход, главные массивы из входа, выход из главных массивов и входа; синтеза графовой модели G_0 всей системы и выбора оптимального варианта построения системы $G^* \subset G_0$ [38]).

На каждом этапе синтеза используется последовательный анализ вариантов построения элементов, частей и системы в целом, агрегация этих элементов модели с последующей оценкой получающихся вариантов и исключением заведомо худших и недопустимых вариантов по локальным характеристикам агрегируемых частей и компонент модели. Детально задачи выбора наилучшего варианта построения структуры информационной системы на графе вариантов G_0 и методы ее решения рассмотрены в § 2.8.

§ 2.4. Формализация задач выбора оптимального варианта структуры системы

Рассмотренный в § 2.2 подход к синтезу структуры автоматизированных информационно-управляющих систем допускает формализацию в виде задач математического программирования. При этом искомое отображение \mathfrak{M}^* множества взаимосвязанных задач и их этапов (G_I и G) на множество взаимосвязанных узлов системы G_J задается соответствующим набором переменных.

Как отмечалось выше, при формализации задачи выбора оптимального варианта структуры автоматизированных информационно-управляющих систем возможны два типа отображений \mathfrak{M} : 1) тип A : каждая задача (этап) выполняется лишь в одном из нескольких возможных узлов системы; 2) тип B : задачи (этапы) выполняются в нескольких узлах системы. Формализация задач с отображением типа A приводит к математическим задачам целочисленного программирования, а B — смешанного (линейного и целочисленного) программирования.

Для формализации задачи синтеза структуры введем обозначения согласно табл. 2.1.

Пусть задано множество задач ($i = \overline{1, I}$) (этапов $m = \overline{1, m_i}$) управления и их вариантов ($k = \overline{1, K}$) и множество узлов системы ($j = \overline{1, J}$) и вариантов их построения ($p = \overline{1, P_j}$). Задача синтеза структуры в общем случае формулируется следующим образом:

$$F_0(x_{ik}, x_{imn}, x_{imj}, x_{jp}) \rightarrow \text{opt}, \quad (2.1)$$

при ограничениях

$$F_\eta(x_{ik}, x_{imn}, x_{imj}, x_{jp}) \leq F_\eta, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}, \quad (2.2)$$

где F_0 — оптимизируемые показатели качества, а F_η ($\eta = \overline{1, \eta_0}$) — ограничения различных типов на искомое отображение \mathfrak{M}^* . Рассмотрим основные типы ограничений, учитываемые в задаче (2.1)—(2.2).

Каждая задача i решается лишь в одном варианте из числа возможных:

$$\sum_{k=1}^{k_i} x_{ik} = 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.3)$$

Аналогично записывается условие для этапов и узлов:

$$\sum_{j=1}^J x_{m_i j} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, m_i}. \quad (2.4)$$

Число задач, выполняемых системой, ограничено сверху (снизу):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{k_i} x_{ik} \leq (\geq) M. \quad (2.5)$$

Таблица 2.1

| № п/п | Формулировка условия | Формализация условия |
|-------|---|---|
| 1 | Объем задачи (этапа) выполняется в одном узле (отображение типа А) | Пусть $m = \overline{1, m_i}$ — этапы i -й задачи; $j = \overline{1, J}$ узлы системы $x_{imj} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи} \\ & \text{выполняется в } j\text{-м узле,} \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}$ |
| 2 | Выбирается вариант решения задачи | $x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я задача решается} \\ & k\text{-м способом,} \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}$ |
| 3 | Выбирается вариант решения этапа | $x_{imn} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи} \\ & \text{решается } n\text{-м способом,} \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}$ |
| 4 | Выбирается вариант реализации узла (в том числе выбор комплекса технических средств в узле) | $x_{jp} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й элемент реали-} \\ & \text{зуется } p\text{-м способом,} \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}$ |
| 5 | Выбирается вариант решения задачи, вариант этапа и узел, в котором он выполняется | $x_{imnj} = \begin{cases} 1, & \text{если } m\text{-й этап } i\text{-й задачи} \\ & \text{решается в } n\text{-м варианте в} \\ & j\text{-м узле,} \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}$ |
| 6 | Выбирается вариант решения задачи, вариант этапа и узел, в котором он выполняется | $x_{kmnj} = \begin{cases} 1, & \text{если } n\text{-й вариант } m\text{-го} \\ & \text{этапа } i\text{-й задачи, решаемой} \\ & k\text{-м способом, выполняется} \\ & \text{в } j\text{-м узле,} \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}$ |

Число узлов, входящих в систему, должно быть больше (меньше) заданного:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^{P_j} x_{jp} \geq (\leq) \bar{M}. \quad (2.6)$$

В каждом узле j решается не более чем (не менее, равно) n_{ij} этапов n_{ij} -й задачи:

$$\sum_{m=1}^{m_i} x_{imj} \leq (\geq) n_{ij}, \quad j = \overline{1, J}, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.7)$$

Если требуется выполнение равенства в (2.7) и $n_{ij} = m_i$, то задача i целиком выполняется в узле j .

В узле j решается не более n_j этапов различных задач:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{m_i} x_{imj} \leq n_j, \quad j = \overline{1, J}. \quad (2.8)$$

При задании отображения типа A каждый этап i -й задачи выполняется лишь в одном узле:

$$\sum_{j=1}^J x_{imj} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, m_i}. \quad (2.9)$$

При отображении типа B этапы i -й задачи могут выполняться в нескольких узлах. Пусть величина x_{imj} равна части объема m -го этапа i -й задачи, выполняемой в j -м узле, тогда

$$\sum_{j=1}^J x_{imj} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, m_i}. \quad (2.10)$$

Если для некоторых узлов j (задач i либо их этапов m) задаются множества узлов (задач и их этапов) N_{jp} (N_{ik} , N_{imj}), связанных с j (i , m) условием типа «И»: если $x_{ip} = 1$, то и $x_{j'p} = 1$ для всех $j'p \in N_{jp}$, то это условие формализуется в виде

$$\left(\prod_{j'p \in N_{jp}} x_{j'p} - 1 \right) x_{jp} = 0, \quad j = \overline{1, J}, \quad p = \overline{1, P_j}. \quad (2.11)$$

Если требуется, чтобы при $x_{jp} = 1$ равенство $x_{j'p} = 1$ выполнялось лишь для одного $j'p$ из заданного множества M_{jp} , то данное условие (типа «ИЛИ») запишется в виде

$$\left(\sum_{j'p \in M_{jp}} x_{j'p} - 1 \right) x_{jp} = 0, \quad j = \overline{1, J}, \quad p = \overline{1, P_j}. \quad (2.12)$$

Аналогично формализуются условия, не допускающие решение взаимосвязанных этапов m и m' в узлах, не связанных каналом связи. Пусть $d_{jj'} = 1$, если узлы j и j' связаны между собой, и $d_{jj'} = 0$ — в противном случае, тогда требуется, чтобы

$$\sum_{i, m, j} d_{jj'} x_{imj} x_{i'm'j'} = 1. \quad (2.13)$$

При синтезе отображения \mathfrak{M}^* учитываются различные характеристики качества функционирования синтезируемой системы, такие, как стоимость разработки и эксплуатации системы, временные характеристики выполнения задач, надежность, точность и достоверность передачи и обработки информации, экономические показатели функционирования системы (эффективность), загрузка узлов и др. Ограничения на характеристики задаются в виде системы неравенств (2.2), при этом используются следующие типы функций F_η : аддитивные, мультипликативные, функции с фиксированными доплатами (разрывные), смешанного типа. Рассмотрим формализацию основных характеристик:

— затраты на разработку системы

$$\sum_{i, m, j} K_{imnj} x_{imnj} \leq K, \quad (2.14)$$

где K_{imnj} — затраты на разработку m -го этапа i -й задачи, решаемого в n -м варианте в j -м узле;

— затраты на создание системы. Пусть l — тип технических средств, используемых для решения n -го варианта m -го типа i -й задачи, решаемой в k -м варианте, и C_l — стоимость технических средств l -го типа. Тогда затраты на оснащение системы техническими средствами равны

$$\sum_{i,j} C_l x_{lj} \leq C, \quad (2.15)$$

где $x_{lj} = 1$, если $\sum_{ikmn} x_{ikmnj} \geq 1$;

$x_{lj} = 0$ — в противном случае.

Затраты на функционирование системы. Пусть $B_{imnj'i'm'n'j'} = \alpha_{imnj}$, если $imnj = i'm'n'j'$; $B_{imnj'i'm'n'j'} = \beta_{imni'm'n'} \gamma_{jl'j'l'}$, если $imnj \neq i'm'n'j'$, где α_{imnj} — затраты на решение m -го этапа i -й задачи в j -м узле; $\beta_{imni'm'n'j'}$ — средний поток информации, между m -этапом i -й задачи и $m'n'$ этапом i' — задачи в процессе функционирования системы, а $\gamma_{jl'j'l'}$ — затраты на передачу единицы объема информации из узла j в узел j' , оснащенных техническими средствами l -го и l' -го типа соответственно. Тогда ограничение на затраты функционирования имеет вид

$$\sum_{i, m, n, j} B_{imnj'i'm'n'j'} x_{imnj} x_{i'm'n'j'} \leq B. \quad (2.16)$$

Аналогично записываются ограничения на эффективность и оперативность выполнения задач в узлах системы. Пусть t_{imnj} — время выполнения m -го этапа i -й задачи, решаемого n -м способом в j -м узле, а $t_{jj'}$ — время передачи единицы информации между узлами j и j' . Тогда время выполнения задачи (оперативность), которое складывается из времени последовательно выполняемых этапов и времени на передачу информации между этапами, равно

$$\sum_{m, n, j} T_{imnj'i'm'n'j'} x_{imnj} x_{i'm'n'j'} \leq T_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (2.17)$$

где $T_{imnj'i'm'n'j'} = t_{imnj}$, если $imnj = i'm'n'j'$; $T_{imnj'i'm'n'j'} = \beta_{imni'm'n'} t_{jj'}$ в противном случае.

Загрузка узлов системы. Каждый узел системы располагает ограниченным набором ресурсов $\{R_{jpt}^\gamma\}$, используемых для выполнения задач управления, здесь γ — тип ресурса, а t — период функционирования системы. Пусть R_{ikmnt}^γ — количество ресурсов γ -го типа в период t , необходимое для выполнения m -го этапа i -й задачи. Тогда ограничение на загрузку записывается следующим образом:

$$\sum_{i, k, m, n} R_{ikmnt}^\gamma x_{ikmnj} \leq R_{jpt}^\gamma - P_{jpt}^\gamma, \quad j = \overline{1, J}, \quad \gamma = \overline{1, \gamma_0}, \quad (2.18)$$

где P_{jpt}^γ — ресурсы, необходимые для выполнения оперативных задач.

Учесть динамику функционирования узлов при наличии задач оперативного типа удастся лишь в ограниченном числе случаев

(например, в случае простейшего потока и показательного закона обслуживания). В общем случае, когда потоки заявок на решение задач нестационарны и имеют специальное распределение, используются итеративные процедуры выбора оптимального варианта структуры с использованием системы имитационного моделирования (гл. 5).

При синтезе структуры информационной системы на графе G_0 используются следующие переменные: $X = \{x_{rk}\}$, ($r = \overline{1, r_0}$, $k = \overline{1, k_0}$); $y = (y_1, \dots, y_r, \dots, y_{r_0})$ и $x = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_{k_0})$, которые определяются следующим образом: $x_{rk} = 1$, если в выбранном варианте $G(X)$ для массива I_k используется процедура F_r ; $y_r = 1$, если процедура F_r используется для формирования хотя бы одного массива в системе, $\sum_k x_{rk} \geq 1$; $x_k = 1$, если массив I_k будет реализован ($\sum_{r,k} x_{rk} d_{rk}^r \geq 1$); $x_{rk} = y_r = x_k = 0$ в противном случае. Тогда задача выбора оптимального варианта построения структуры информационной системы состоит в определении такого подграфа $G^*(X) = (I(X), F(X), D(X))$ на графе G_0 , которому соответствуют наилучшие характеристики качества варианта построения системы. Введенные переменные должны удовлетворять ограничениям, формализующим связность элементов модели $G(X) = (I(X), F(X), D(X))$ и определяющим наличие хотя бы одного варианта на графе $G(X)$ преобразования массивов $I_{вх}$ в массивы $I_{\mu} \in I_{вых}$. Эти ограничения определяют:

$$x_{\mu} = 1, \quad \forall \mu = \overline{1, \mu_0}, \quad (2.19)$$

необходимость получения всего требуемого выхода;

$$\sum_{r=1}^{r_0} x_{r\mu} = 1, \quad \forall \mu = \overline{1, \mu_0}, \quad (2.20)$$

необходимость выбора только одного варианта процедуры для каждого выходного массива;

$$\sum_{r=1}^{r_0} x_{rk} \leq x_k, \quad \forall k = \overline{\eta_0 + 1, k_0}, \quad (2.21)$$

необходимость выбора лишь одного варианта процедуры для каждого включаемого в модель системы массива;

$$\sum_{k=1}^{k_0 - \mu_0} d_{kk}^r x_k \geq x_{rk}, \quad \forall r = \overline{1, r_0}, \quad k = \overline{\eta_0 + 1, k_0}, \quad (2.22)$$

необходимость включения в модель лишь тех массивов, которые требуются в качестве входных хотя бы для одной процедуры;

$$\sum_{r=1}^{r_0} \sum_{k=\eta_0+1}^{k_0} d_{kk}^r x_{rk} \geq x_k, \quad \forall k = \overline{1, k_0 - \mu_0}, \quad (2.23)$$

возможность выбора варианта процедуры в зависимости от возможности включения в модель необходимых ей исходных массивов.

Различные постановки задач синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем приводят к весьма сложным многоиндексным задачам смешанного программирования (с целочисленными, булевыми и непрерывными переменными).

Вычислительные методы, используемые для решения поставленных задач синтеза структуры, могут быть классифицированы следующим образом: сведение задач к стандартной форме; комбинаторные методы; эвристические алгоритмы [29].

Возникающие при синтезе структуры задачи с нелинейностями типа произведения булевых переменных и типа «фиксированных доплат» могут быть сведены к решению эквивалентных линейных задач смешанного программирования в стандартной форме. Рассмотрим некоторые способы, используемые в дальнейшем в гл. 2—4.

«Нелинейности» типа произведения булевых переменных приводятся к линейному виду введением дополнительных переменных и линейных ограничений. Пусть в целевой функции или ограничениях встречается выражение вида $\prod_{i=1}^m x_i$, где x_i — булевы переменные. Введем переменную $z = \prod_{i=1}^m x_i$, принимающую значения 0 или 1. Тогда рассматриваемое условие может быть заменено на следующую систему линейных неравенств: $1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \leq 1 - z \leq m - \sum_{i=1}^m x_i$.

Возможность сведения задач с условиями типа фиксированных доплат в целевой функции и ограничениях к стандартной форме основывается на наличии верхних границ для переменных. Выражения типа фиксированных доплат записываются следующим образом: $\bar{x}_{ij} = 1$, если $L(x_{ij}) > 0$, и $\bar{x}_{ij} = 0$, если $L(x_{ij}) = 0$, где $L(x_{ij})$ — линейное выражение по x_{ij} . Пусть $M = \max L(x_{ij})$, тогда рассматриваемое условие эквивалентно при решении задач минимизации линейной функции от \bar{x}_{ij} выражению $M\bar{x}_{ij} \leq L(x_{ij})$, $L(x_{ij}) \geq 0$.

При формализации параллельно выполняемых операций возникают выражения типа $W = \max_i (L_1, \dots, L_i, \dots, L_m)$, где L_i — выражения от булевых переменных. Подобное выражение можно представить в линейной форме введением переменной z_i ($i = \overline{1, m}$), принимающей значения 1 или 0, и условий $W = \sum_{i=1}^m z_i L_i$; $W \geq L_i$, $i = \overline{1, m}$; $\sum_{i=1}^m z_i = 1$. Если L_i — выражения

с произведением булевых переменных, то они могут быть приведены к линейному виду рассмотренным выше способом.

Очевидно, что возможности данного подхода ограничены, так как при сведении задачи к стандартной форме утрачивается специфика задач, которая может быть использована для построения значительно более эффективных алгоритмов. При использовании математического обеспечения ЦВМ третьего поколения для решения задач линейного программирования со смешанными переменными могут быть решены задачи, имеющие до 2000 переменных и до 2000 ограничений (система использует два диска и требует не менее 240 кбайт оперативной памяти).

Если задачи синтеза структуры систем имеют большую размерность, что не позволяет использовать «стандартное» математическое обеспечение, то для их решения используются различные комбинаторные методы, основанные на упорядоченном переборе с использованием схемы «ветвей и границ», обеспечивающих получение точного либо приближенного решения задачи [70].

При формализации задач синтеза оптимальной структуры в виде моделей математического программирования (2.1)–(2.2) множество допустимых вариантов построения системы формализуется в виде системы ограничений на различные характеристики. На этом множестве задается целевая функция F_0 , связанная с одной или несколькими характеристиками системы. Задача состоит в определении допустимого варианта построения системы, оптимизирующего значение целевой функции. Такой подход к задаче при практическом использовании результатов оптимизации встречает ряд трудностей, связанных с тем, что разработчиков часто не удовлетворяет один оптимальный вариант построения системы. В большинстве случаев необходимо знать, за счет чего достигнута оптимизация, и если «потери» по другим характеристикам велики, то выбирается вариант, достаточно близкий к оптимальному, имеющий лучшие значения по другим характеристикам.

Для выбора варианта структуры системы может быть использовано множество вариантов D_n^δ . Варианты n , принадлежащие данному множеству, отличаются не более чем на величину δ по основному критерию, удовлетворяют ограничениям задачи и оптимальны по Парето, по совокупности рассматриваемых характеристик. Задача в этом случае сводится к поиску множества D_n^δ . Заметим, что при $n = 1$ или $\delta = 0$ задача сводится к некоторой экстремальной задаче, а при $n < \infty$ и $\delta < \infty$ задача состоит в выделении множества вариантов, допустимых и оптимальных по Парето. Задача поиска D_n^δ является более общей и соответственно более трудоемкой, однако схема «ветвей и границ», используемая в дальнейшем для решения задач, позволяет определить искомое множество D_n^δ . В дальнейшем при постановке экстремальных задач синтеза структуры решаются соответствующие задачи о поиске множества D_n^δ .

Рассмотренный подход может быть использован также при выборе оптимальной структуры для задач, формализованных в графовой интерпретации (гл. 3). Общая схема решения задач состоит: в выделении, определении характеристик и исключении (с использованием идей доминирования) вариантов построения частей графа, заведомо не входящих в оптимальное решение; для уменьшения размерности исходного альтернативного графа используется процедура агрегирования, состоящая в последовательной замене последовательных и параллельных частей графа; переборе допустимых вариантов построения структуры системы с использованием схемы «ветвей и границ» для нахождения множества D_n^{δ} .

Для задач синтеза структуры большой размерности, точное решение которых затруднено, при использовании схемы «ветвей и границ» используются методы, позволяющие находить рациональное решение (§ 2.5).

§ 2.5. Формализованные методы распределения задач по узлам системы управления

Решение задачи синтеза оптимальной структуры АСУ в общем виде весьма трудно, поэтому в ряде случаев решаются задачи построения рациональной структуры АСУ. Рассмотрим один из возможных подходов к решению такой задачи, основанной на поэтапном решении ряда частных задач [33, 70].

В данном параграфе изложена методика определения рациональной структуры автоматизированных информационно-управляющих систем, основанная на взаимосвязанном решении ряда частных задач с использованием оптимизационных и имитационных моделей, и для решения общей задачи используется итеративная процедура. Основные этапы формализованного распределения задач по узлам системы и их взаимосвязь приведены на рис. 2.5.

Предполагается, что предварительно определено назначение проектируемой системы, критерии эффективности, условия решения задач в системе. Для каждой задачи устанавливаются варианты их решения, входная и выходная информация, а также проводится оценка объема операций, необходимых для реализации алгоритмов. Структура и звенья существующей системы управления рассматриваются как потенциальные звенья проектируемой системы. Анализируются характеристики технических средств, которые предполагается применить в системе. Информация о предполагаемых структурно-информационно-временных связях между различными задачами в проектируемой системе представляется на стандартных формах документов (форма ОСИВС и граф реализации задач) [39].

На основании имеющихся данных о задачах системы и алгоритмах их решения проводится анализ каждого алгоритма для определения требований к качеству их реализации и техническим средствам, необходимым для этой реализации. Используя харак-

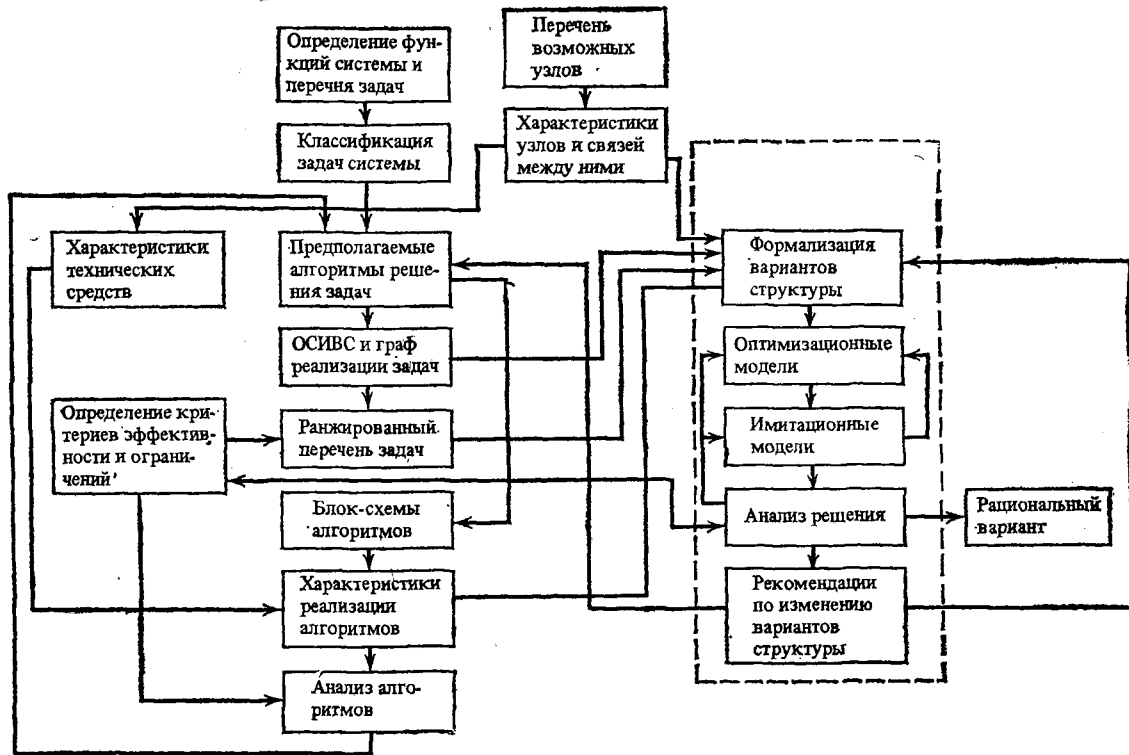


Рис. 2.5

теристики средств, оцениваем объем работы по решению каждой задачи.

Следующий этап состоит в перечислении возможных вариантов распределения задач по узлам АСУ. При этом нет необходимости в перечислении всех возможных вариантов распределения, а следует ограничиться только теми, рассмотрение которых определяется заданными ограничениями и практическими соображениями.

При большом числе задач следует на первоначальном этапе исключить из рассмотрения задачи, «вес» которых мал по сравнению с «весом» остальных. После этого проводится оценка вариантов распределения и выбирается вариант с экстремальным значением критерия. Процесс выбора оптимального варианта может носить итеративный характер; в выбранный вариант распределения могут быть внесены целенаправленные изменения для его улучшения.

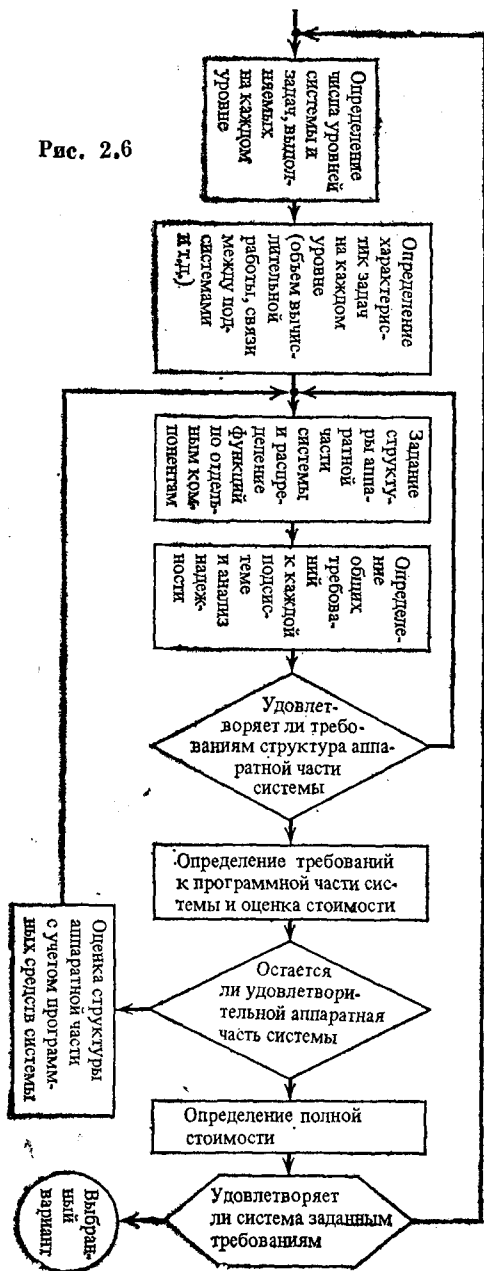
Таким образом, процесс выбора рационального варианта структуры включает: оценку различных вариантов построения структуры системы; определение перечня задач, возлагаемых на технические средства; выбор технических средств; формализацию вариантов распределения задач по узлам системы; формализацию динамики функционирования узлов системы; определение характеристик различных вариантов построения структуры системы; корректировку в случае необходимости вариантов выполнения задач и распределения их по узлам системы; уточнение состава выбранных технических средств, а также критериев оптимальности и ограничений; определение оптимальной (рациональной) структуры системы.

Близкий подход к задаче выбора структуры иерархической системы управления рассматривался в [76]. Этот подход основан на одновременном учете требований по стоимости, функциональной гибкости и надежности системы. Число уровней иерархии с учетом этих факторов должно быть минимальным. Необходимо четкое определение связей между уровнями системы; при этом взаимодействие уровней должно быть минимальным. При нарушении связей между уровнями нижние уровни должны функционировать (возможно, с уменьшением эффективности).

На рис. 2.6 приведена последовательность основных этапов при синтезе структуры иерархических систем управления. Данный алгоритм синтеза структуры систем управления основывается на итеративном процессе «проб и ошибок».

При решении задач синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем ряд ограничений, отражающих динамику работы системы, не может быть учтен в постановке исходной задачи, формализованной как нелинейная задача математического программирования (§ 2.3). Это приводит к необходимости использования итеративных процедур выбора структуры системы с применением оптимизационных и имитационных моделей.

Рис. 2.6



Решение задачи синтеза оптимальной структуры системы управления с учетом динамики управляемых объектов, узлов системы и технических средств значительно усложняется тем, что определение оптимальных правил функционирования узлов (и соответствующих характеристик качества управления) может быть выполнено лишь после того, как становится известен перечень задач, решаемых данным узлом, и оптимальная дисциплина их обслуживания, а в свою очередь распределение задач по узлам зависит от характеристик их обслуживания в узлах.

Основными способами учета динамики функционирования узлов системы при синтезе оптимальной структуры являются: включение в математическую постановку задачи упрощенных моделей, позволяющих учитывать характеристики качества управления, например время ожидания обслуживания. Данный способ, если удастся поставить оптимальную задачу, обычно намного увеличивает размерность задачи, поскольку задача математического программирования нелинейна и необходимо ее сведение к стандартному линейному виду.

При применении итеративной процедуры для получения квазиоптимального решения [70] на первом шаге определяется перечень задач и их распределение по узлам системы, а на последующих устанавливаются характерис-

тики динамики функционирования узлов и, если это необходимо, проводится соответствующая корректировка временных ограничений и допустимой загрузки узлов, и цикл повторяется. В ряде случаев данный подход является единственно возможным, так как для многих систем отсутствуют аналитические зависимости для параметров, определяющих динамику функционирования системы.

Рассмотрим применение итеративной процедуры выбора структуры системы с использованием оптимизационных и имитационных моделей. Пусть решается задача (2.1)–(2.2) с учетом ограничений на среднее время пребывания задач в системе и необходимо, например, так распределить задачи по узлам системы, чтобы минимизировать затраты на выполнение задач (2.16), при этом должны выполняться ограничения на загрузку узлов (2.18) и качество выполнения задач. Очевидно, что задача сформулирована неполностью, так как не указаны правила работы узла, от которых существенно зависит время ожидания.

Учесть динамику функционирования узлов в постановке задачи синтеза структуры системы, формализованной как задача математического программирования, удастся лишь в некоторых случаях. Например, если задачи упорядочены по приоритетам и номер задачи совпадает с номером ее относительного приоритета, то ограничение на среднее время пребывания задач в системе может быть записано в виде

$$\sum_{j=1}^J \left(t_{ij} + \frac{\sum_{i=1}^I t_{ij} \rho_{ij} x_{ij}}{2 \left(1 - \sum_{i=1}^{i-1} \rho_{ij} x_{ij} \right) \left(1 - \sum_{i=1}^i \rho_{ij} x_{ij} \right)} \right) x_{ij} \leq T_i^{\text{доп}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (2.24)$$

где используются обозначения § 2.2 и, кроме того, ρ_{ij} — загрузка j -го узла задачами i -го типа ($\rho_{ij} = \lambda_{ij} t_{ij}$), где λ_{ij} — интенсивность выполнения задач i -го типа в j -м узле, а t_{ij} — среднее время их выполнения; $T_i^{\text{доп}}$ — допустимое среднее время пребывания задач в системе.

Данное ограничение при ряде упрощающих предположений может быть линеаризовано введением дополнительных целочисленных переменных (см. § 2.4). Аналогично могут быть исследованы простейшие системы с абсолютными приоритетами и др. Решение в более сложных случаях, даже при заданной системе приоритетов, значительно усложняется из-за невозможности аналитически сформулировать условия задачи. Для анализа многоступенчатых систем в этих случаях используются методы моделирования (см. гл. 5).

Для выбора рациональных вариантов структуры с учетом динамики функционирования узлов могут быть использованы следующие подходы: включение имитационного блока в алгоритм типа «ветвей и границ» для решения оптимизационной задачи, при нахождении оценок задачи и при оценке полных решений; итера-

тивное решение последовательности оптимизационных и имитационных задач, при этом результаты имитационного моделирования используются для уточнения постановки оптимизационных задач (см. также гл. 5). Применение первого подхода при синтезе структуры часто затруднено из-за сложности получения точных оценок на начальных этапах ветвления и большого времени имитации, которое, например при использовании методов статистического моделирования, может значительно превосходить время решения оптимизационных задач.

Рассмотрим применение итеративной процедуры для нахождения приближенного решения задачи (2.1)–(2.2), например, с учетом ограничений на среднее время решения задач и условия на допустимую вероятность превышения заданного времени решения задач: $P\left\{\sum_j \bar{v}_{ij} x_{ij} > t_i^{\text{доп}}\right\} \leq e_i^{\text{доп}}$.

На первом этапе решается задача (2.1)–(2.2), дополненная ограничениями, приближенно учитывающими условия на среднее время решения задач и дополнительное условие, например, в виде (2.24). При этом $\rho_j^{(0)} = 1$, если $\sum_{i \in I_j} \rho_{ij} \geq 1$, либо $\rho_j^{(0)} = \sum_{i \in I_j} \rho_{ij}$ в противном случае. На втором этапе с помощью имитационной модели анализируется полученное на первом этапе решение (см. гл. 5). Определяются узлы, в которых не выполняются заданные ограничения. Для тех узлов, в которых не выполняется ограничение, на последующих шагах монотонно уменьшается допустимая загрузка. Пусть задачи, которые могут выполняться в j -м узле, упорядочены по величине загрузки ($\rho_{ij} \leq \rho_{i+1, j}$, $i = \overline{1, I-1}$), тогда на первых I шагах величина $\rho_j^{(0)} = \rho_j^{(0)} - \rho_{kj}$, $k = \overline{1, I}$. На последующих шагах (на k -м шаге) величина допустимой загрузки определяется из рекуррентного соотношения $\min\left\{\rho^{(k-1)}; \left(\sum_{l \in I_k} \rho_{lj}\right) + \rho_{lj} \{l \in I_k\}\right\}$, где I_k — множество индексов задач, загрузка которых исключена из допустимой величины $\rho_i^{\text{доп}}$ к k -му шагу.

Если в процессе анализа работы узлов окажется, что выполнение некоторых задач в узлах нецелесообразно, то формулируется ряд оптимизационных задач (2.1)–(2.2), в которых запрещено выполнение этих задач в данных узлах. При использовании данной процедуры за конечное число шагов получается рациональное решение, либо будет показано, что решения не существует (после очередной итерации оптимизационная задача не имеет решения).

Изложенная методика синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем с использованием оптимизационных (§ 2.6 и 2.7) и имитационных (§ 5.3) моделей эффективно применена при оптимизации структуры ряда систем и используется также в гл. 5.

§ 2.6. Методы синтеза структуры систем для независимых задач управления

В данном разделе изложены постановки задач синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем, в которых не учитываются взаимосвязи по передаче информации между узлами системы. Для решения предложенных оптимизационных моделей синтеза структуры разработаны алгоритмы, основанные на схемах «ветвей и границ» и локальной оптимизации.

Используя обозначения, введенные в § 2.4, функции, выполняемые системой, формализуем в виде множества задач $i \in I$, каждая i -я задача может состоять из m_i этапов (в целях упрощения обозначений каждый этап считается отдельной задачей). Пусть также задан объем операций, необходимый для выполнения i -й задачи u_i ; множество узлов $j = \overline{1, J}$ системы управления (если в j -м узле может быть использовано несколько различных технических средств, то каждый из этих вариантов рассматривается как отдельный узел); интенсивность выполнения задач i -го типа в j -м узле — a_{ij} ; интенсивность поступления задач i -го типа для решения — λ_i ; время решения i -й задачи в j -м узле — t_{ij} ($t_{ij} = u_i/a_{ij}$); допустимая загрузка j -го узла — ρ_j ; затраты на реализацию i -й задачи в j -м узле — w_{ij} ; связи между решаемыми задачами, их этапами и узлами, формализуемые в виде альтернативных графов (см. гл. 1).

Введем переменную $x_{ij} = 1$, если i -я задача выполняется в j -м узле, и $x_{ij} = 0$ — в противном случае.

Рассмотрим постановки задач формализованного распределения множества задач между различными узлами системы при различных критериях и ограничениях [31, 70].

В зависимости от специфики разрабатываемой системы в виде критериев и ограничений при синтезе структуры системы могут использоваться различные характеристики качества:

— минимизация затрат на реализацию задач

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{ij} x_{ij}; \quad (2.25)$$

— минимизация общего времени решения задач

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{ij} x_{ij}; \quad (2.26)$$

— минимизация максимального общего времени решения задач

$$\min \left(\max_j \sum_{i=1}^I t_{ij} x_{ij} \right). \quad (2.27)$$

Возможна оптимизация по более сложным критериям, включающим в себя (2.25)–(2.27), а также использование критериев более общего типа, таких, как получение максимального эффекта, минимизация затрат на создание и эксплуатацию системы и др. (см. § 2.6 и гл. 3).

Оптимизация может проводиться при ограничениях: на связи между задачами

$$G_I = (I, \Gamma_I); \quad (2.28)$$

на связи между узлами

$$G_J = (J, \Gamma_J); \quad (2.29)$$

на общие затраты на реализацию задач в АСУ либо затраты на реализацию задач в узлах

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_{ij} x_{ij} \leq w_{\text{доп}}, \quad (2.30)$$

$$\sum_{i=1}^I w_{ij} x_{ij} \leq w_j^{\text{доп}}, \quad j = \overline{1, J}; \quad (2.31)$$

на загрузку узлов

$$\sum_{i=1}^I \lambda_i t_{ij} x_{ij} \leq \rho_j, \quad j = \overline{1, J}. \quad (2.32)$$

на общее время решения всех задач

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{ij} x_{ij} \leq T; \quad (2.33)$$

на время решения отдельных задач

$$\sum_{j=1}^J t_{ij} x_{ij} \leq \tau_i, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.34)$$

Рассмотрим решение поставленных выше задач при условии, что каждая отдельная задача решается только в одном узле системы, т. е.

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.35)$$

Эффективность распределения задач по узлам АСУ определяется большим количеством факторов. Это затрудняет решение задачи и получение наглядного представления о характере влияния отдельных параметров и ограничений на эффективность распределения.

1. Рассмотрим задачу минимизации общих затрат (2.25) или общего времени решения (2.26) при ограничениях на загрузку каждого из узлов (2.32) или на затраты в каждом узле (2.31) соответственно, т. е. задачу вида

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij}, \quad (2.36)$$

$$\sum_{i=1}^I a_{ij} x_{ij} \leq b_j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2.37)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.38)$$

В применении к данной задаче метод ветвей и границ состоит в направленном движении по вершинам дерева, получаемого при фиксировании части переменных x_{ij} . Дерево ветвления строится следующим образом. Вершины первого уровня получаем, фиксируя поочередно элементы первого столбца матрицы системы (2.37); вершины второго уровня — фиксируя поочередно элементы второго столбца матрицы системы (2.37), и т. д.

Перебор можно существенно сократить, если учесть, что решение должно удовлетворять уравнению (2.37), и использовать оценки для каждой вершины дерева ветвлений, а также некоторые свойства рассматриваемой задачи, что существенно при решении задач большой размерности. Например, ветвление может быть начато с того столбца, для которого разность между минимальным и остальными элементами столбца максимальна. Это позволяет на начальных этапах исключить бесперспективные варианты, так как при таком способе быстрее нарушаются ограничения (2.37). Последующие столбцы также должны быть упорядочены в соответствии с этим правилом.

Вначале из матрицы коэффициентов a_{ij} системы (2.37) исключаем все элементы $a_{ij} > b_j$ ($i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$). При этом возможны следующие случаи:

- 1) в некотором столбце исключены все элементы a_{ij} . Оптимального решения нет;
- 2) в некотором столбце остался лишь один элемент a_{ij} , который входит в оптимальное решение (если оно существует). Значение b_j заменяем на $(b_j - a_{ij})$ и этот элемент в дальнейшем не учитываем;
- 3) в некотором столбце осталось несколько элементов. После просмотра всех столбцов матрицы переходим к выполнению ветвления.

Оценку для каждой вершины находим, включая в решение соответствующие элементы x_{ij} . Значение b_j при этом заменяется на $(b_j - \sum_{i < i^*} a_{ij})$, $j = \overline{1, J}$, где i^* — число уровней ветвления. После этого проверяется выполнение рассмотренных выше условий 1—3.

В тех столбцах, где осталось несколько элементов, выбирается наименьший, т. е. $\bar{c}_{ij} = \min_j c_{ij}$, и оценка равна $\sum_{i < i^*} c_{ij} + \sum_{i \geq i^*} \bar{c}_{ij}$.

2. Рассмотрим задачу минимизации общих затрат (2.25) или общего времени решения (2.26) при ограничениях на общее время решения (2.33) или общие затраты (2.30) соответственно, т. е. задачу вида

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij}, \quad (2.39)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{ij} x_{ij} \leq B, \quad (2.40)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.41)$$

Вначале из матриц коэффициентов c_{ij} и b_{ij} исключаем элементы, которые не могут войти ни в одно допустимое решение. Для этого берутся минимальные элементы всех столбцов, кроме одного в матрице коэффициентов системы (2.40), и проверяется условие

$$\sum_{i=1}^{l-1} \bar{b}_{ij} + b_{lj} + \sum_{i=l+1}^I \bar{b}_{ij} \leq B, \quad l = \overline{1, I},$$

где \bar{b}_{ij} — минимальный элемент в соответствующем столбце.

Поскольку из (2.41) следует, что в каждом столбце может быть только один элемент, то $\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij}x_{ij}$, без учета ограничения

(2.40) равен $\sum_{i=1}^I \min_i \sum_{j=1}^J c_{ij}x_{ij}$, и если для элементов выполняются условия $c_{ij} > c_{il}$ и $b_{ij} > b_{il}$ ($l \neq j$), то они могут быть исключены из рассмотрения. Если оставшиеся в столбцах минимальные элементы системы (2.39) удовлетворяют ограничениям (2.40), то полученное решение оптимально.

Ветвление осуществляется с учетом оценки и ограничения (2.40) для каждой вершины, что существенно сокращает число рассматриваемых вариантов.

Оценка для каждой вершины для (2.39) находится аналогично оценке для системы (2.36). Ограничение при этом имеет вид $\sum_{i < i^*} b_{ij} + \sum_{i \geq i^*} \bar{b}_{ij}$, где i^* — уровень ветвления и $\bar{b}_{ij} = \min_j b_{ij}$ для столбцов, элементы которых еще не вошли в решение и сравниваются с заданным значением B из системы (2.40).

3. Рассмотрим задачу минимизации общих затрат (2.25) или общего времени решения (2.26) при ограничениях на общее время (2.33) и загрузку узлов (2.30) или на общие затраты (2.30) и загрузку узлов (2.32) соответственно, т. е. задачу вида

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J a_{ij}x_{ij}, \quad (2.42)$$

$$\sum_{i=1}^I b_{ij}x_{ij} \leq B_j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2.43)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij}x_{ij} \leq c, \quad (2.44)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.45)$$

Вначале из матриц коэффициентов a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} исключаем те элементы, которые заведомо не могут войти в оптимальное решение. Способ исключения элементов матрицы из системы (2.43) аналогичен способу исключения элементов матрицы (2.37) задачи 1, а способ исключения элементов матрицы из системы (2.44) аналогичен способу исключения элементов из системы (2.40) и заклю-

чается в исключении всех элементов, для которых не выполняется условие

$$\sum_{i=1}^{l-1} \bar{c}_{ij} + c_{ij} + \sum_{i=l+1}^I \bar{c}_{ij} \leq c, \quad l = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J},$$

где \bar{c}_{ij} — минимальный элемент в соответствующем столбце. Применяются эти способы последовательно при каждом исключении элементов.

Оценка для матрицы коэффициентов (2.42) находится аналогично оценке для (2.36).

Ограничение равно $\sum_{i < i^*} c_{ij} + \sum_{i \geq i^*} \bar{c}_{ij}$, где i^* — уровень ветвления, и $\bar{c}_{ij} = \min c_{ij}$ для столбцов, элементы которых не вошли в решение.

4. Рассмотрим задачу минимизации времени выполнения задач (2.27) при ограничении (2.35), т. е.

$$\min \max_j \left(\sum_{i=1}^I t_{ij} x_{ij} \right), \quad (2.46)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (2.47)$$

Оптимальное решение находится с помощью решения ряда частных задач вида (2.36)—(2.38), причем ограничения в (2.37) определяют минимальное время решения всех задач.

Нижняя граница допустимого времени решения задач b_j в (2.37) определяется из условия $\max_i \min_j t_{ij}$. Верхняя граница времени решения задач определяется выбором минимального элемента в каждом столбце.

В заключение отметим, что представляет интерес решение поставленных задач, учитывая дополнительные ограничения вида (2.28) и (2.29), время перехода с этапа на этап для отдельных задач и случайные факторы функционирования системы.

Заметим, что задачи с целочисленными переменными часто допускают наглядную интерпретацию в виде сетевой модели. Решение состоит в поиске одного или нескольких «кратчайших» путей, удовлетворяющих заданным свойствам.

Пр и м е р. Пусть требуется так распределить решаемые задачи по узлам, чтобы общая длительность решения задач не превосходила заданной величины (задача 2). Пусть также матрицы $|c_{ij}|$, $|b_{ij}|$ и B имеют вид

$$|c_{ij}| = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 7 & 8 & 9 & 10 & 5 \\ 2 & 1 & 6 & 7 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad |b_{ij}| = \begin{vmatrix} 1,5 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 2 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 5 \end{vmatrix}; \quad B = 20. \quad (2.48)$$

После исключения элементов, заведомо не входящих в решение, в соответствии с п. 2 с. 77 получим

$$|c_{ij}| = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 2 & 1 & & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 5 \end{vmatrix}; \quad |b_{ij}| = \begin{vmatrix} 1,5 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & & & \\ & & & & 5 \end{vmatrix}; \quad B = 20.$$

Очевидно, что элементы (c_{13}, b_{13}) и (c_{14}, b_{14}) входят в решение. В результате матрицы примут вид

$$|c_{ij}| = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 7 \\ 2 & 1 & \\ & & 1 \end{vmatrix}; \quad |b_{ij}| = \begin{vmatrix} 1,5 & 2 & 4 \\ 2 & 5 & \\ & & 5 \end{vmatrix}; \quad B = 13.$$

Процесс ветвления для полученных матриц показан на рис. 2.7. Для каждой вершины дерева ветвления приведены значения зафиксированного элемента матрицы c_{ij} , оценки критерия и ограничения (например, для первой вершины первого уровня ветвления величины 3, 5 и 7,5 соответственно). Решение задачи выделено в (2.48) шрифтом.

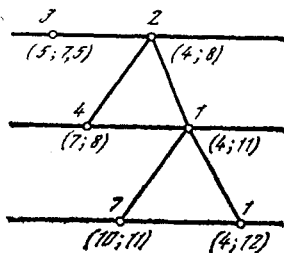


Рис. 2.7

Заметим, что оптимальное решение задач синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем с применением изложенных моделей и методов может быть получено в ряде случаев без использования ЦВМ.

В дальнейшем в работе [77] предложен метод решения задачи (2.36) — (2.38), сводящий ее к обобщенной транспортной модели.

В рассматриваемой модели выполняемые задачи также считаются независимыми, однако в исходной постановке учитывается место возникновения задач и соответствующие затраты на передачу информации в тот узел системы (сети вычислительных машин), в котором они будут выполняться.

Пусть $J = (1, \dots, j, \dots, n)$ — множество вершин, соответствующих местам фактического выполнения работ; $K = \{1, \dots, k, \dots, n\}$ — множество вершин, соответствующих «источникам» работ (множества J и K представляют собой различные модификации одного и того же множества, поскольку все вершины рассматриваемой сети могут быть местами формирования и выполнения работ); $I_k = \{1, \dots, i_k, \dots, g_k\}$ — множество работ, обязанных своим происхождением k -му узлу; I — объединение всех множеств I_k ($k \in K$); N — число элементов во множестве I ; R_{ikm} — m -мерный вектор с компонентами r_{ikm} , представляющими собой количество ресурса типа m , необходимого для выполнения работы i_k (в качестве ресурса могут выступать процессорное время, объем памяти первого уровня и др.); c_j — m -мерный вектор, компоненты которого c_{jm} задают запас ресурса типа m в вершине j ; m_{ijk} — константа пропорциональности, определяющая отношение «скоростей» вычислений в вершинах k и j при выполнении работы i_k ;

p_{ijk} — процессорное время выполнения работы i_k в вершине j (с учетом предыдущего обозначения $p_{ijk} = m_{ijk}p_{kik}$); v_{ijk} — мера эффективности выполнения работы i_k в вершине j ; t_{ijk} — время передачи работы i_k из вершины k в вершину j (в отсутствие дуги (j, k) или при низкой ее пропускной способности величины t_{ijk} выбираются достаточно большими); l_{jk} — пропускная способность дуги (j, k) ; d_{ijk} — среднее время задержки в выполнении работы i_k в вершине j ; q_j — стоимость единицы процессорного времени в вершине j ; q_{jk} — стоимость использования дуги (j, k) (в единицу времени) для передачи информации от узла j к узлу k ($q_{kk} = 0$); x_{ijk} — переменная, принимающая значение 1 или 0 в зависимости от того, выполняется или не выполняется работа i_k в вершине j ; T_j — суммарный ресурс процессорного времени в j -й вершине (как правило, для всех j $T_j = T$, где T определяется «горизонтом» планирования); TR_j — время ввода задачи в машину j -й вершины; $TT_j = T_j - TR_j$ (во многих случаях временем TR_j по сравнению с T_j можно пренебречь, и тогда TT_j практически совпадает с T_j). Задача формулируется следующим образом:

$$\max \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} \sum_{i_k \in I_k} x_{ijk}, \quad (2.49)$$

при ограничениях

$$\sum_{k \in K} \sum_{i_k \in I_k} p_{ijk} x_{ijk} \leq TT_j, \quad (2.50)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad (2.51)$$

$$x_{ijk} = \{0, 1\}, \quad j \in J, \quad i_k \in I_k. \quad (2.52)$$

В модели (2.49) — (2.52) предполагается, что $R_{ik} \leq c_j$ (всем x_{ijk} , для которых это не так, присвоены нулевые значения), а также $p_{ijk} = m_{ijk}p_{kik}$.

В приведенной модели отдельные работы считаются равноправными. Если же на множестве работ задана некоторая приоритетность в виде, например, оценок v_{ijk} эффективности выполнения работы в пункте j , то критерий (2.49) будет иметь вид

$$\max \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{i_k \in I_k} v_{ijk} x_{ijk}. \quad (2.53)$$

Сформулированные модели могут трактоваться как задачи о максимальном потоке. Однако решение последних не гарантирует получение искомым решений, поскольку величины x_{ijk} могут оказаться не целыми (что соответствует «дроблению» работы i_k). Можно переформулировать модели в виде обобщенной транспортной задачи с дополнительным условием целочисленности переменных. Для получения такой формулировки рассмотрим множество вычислительных машин $J = (1, \dots, j, \dots, n)$ и множество работ $I = \{1, \dots, i, \dots, N\}$. Выделением этих множеств можно ограничиться, поскольку указание пункта, в котором возникла та или иная работа, в формулировке (2.53), (2.50) — (2.52)

не существенно. С учетом этого и использованием естественных переобозначений задача (2.53), (2.50)—(2.52) переходит в следующую:

$$\min Z_v = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} x_{ij}, \quad c_{ij} = -v_{ij}, \quad (2.54)$$

$$\sum_{i \in I} p_{ij} x_{ij} \leq TT_j, \quad j \in J; \quad (2.55)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq 1, \quad i \in I, \quad (2.56)$$

$$x_{ij} = 0, 1, \quad i \in I, \quad j \in J. \quad (2.57)$$

Задача (2.54)—(2.57) может быть известным приемом сведена к стандартной форме обобщенной транспортной задачи. Для этого вводятся фиктивная $(n + 1)$ -я вычислительная машина и фиктивная $(N + 1)$ -я работа. Кроме того, вводятся обозначения $J^* = JU(n + 1)$; $I^* = I \cup (N + 1)$ и полагаются $c_{ij} = M$ (для $i = n + 1, i \in I$), $c_{ij} = -M$ (для $j \in J^*$ и $j \in N + 1$), $TT_{n+1} = M'$, где M и M' — достаточно большие положительные константы. С учетом данных обозначений из задачи (2.54)—(2.57) получается следующая:

$$\min Z_0 = \sum_{i \in I^*} \sum_{j \in J^*} c_{ij} x_{ij}, \quad (2.58)$$

$$\sum_{i \in I^*} p_{ij} x_{ij} = TT_j, \quad j \in J^*, \quad (2.59)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad i \in I, \quad (2.60)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i \in I^*, \quad j \in J^*, \quad (2.61)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad j \in J. \quad (2.62)$$

Задача без ограничения (2.62) представляет собой обобщенную транспортную задачу (см., например, [20]). По используемой терминологии любая пара индексов (i, j) называется клеткой. Множество клеток с фиксированным первым индексом называется строкой, а множество клеток с фиксированным вторым индексом называется столбцом. Базисное решение системы (2.59) — (2.61) B содержит ровно $(n + N + 1)$ таких клеток. Среди всех базисов задачи (2.58) — (2.61) главную роль для задачи (2.58) — (2.62) играют особые базисы, которые не содержат ни одной пары различных клеток $(i_1 j_1)$ и $(i_2 j_2)$, таких, что $i_1 = i_2$ (т. е. особый базис включает в себя не более одной клетки из любого столбца).

Теорема [77]. Множество возможных решений задачи (2.58) — (2.62) совпадает со множеством особых базисов задачи (2.58) — (2.61).

Приведенная теорема следует из того факта, что для любого особого базиса обобщенной транспортной задачи в силу условия (2.60) автоматически выполняется условие (2.62).

С учетом установленной в теореме связи между задачами (2.58) — (2.61) и (2.58) — (2.62) предложен алгоритм решения последних, построенный по схеме метода «ветвей и границ» [77]. Пред-

лагаемый алгоритм подобен алгоритму решения задачи коммивояжера, в котором последовательно исключаются «многоконтурные» решения задачи назначения. В данном алгоритме осуществляется последовательное разбиение множества особых базисов задачи (2.58) — (2.61) с получением для каждого подмножества оценки целевой функции (2.58). Эта оценка получается с помощью решения задачи типа задачи (2.58) — (2.61) меньшего размера. Ветвление в алгоритме осуществляется следующим образом. Пусть при решении задачи (2.58) — (2.61) для соответствующего подмножества особых базисов оказалось, что оптимальный базис является особым. Тогда полученное решение является возможным решением задачи (2.58) — (2.62) и становится либо оптимальным решением этой задачи, либо текущим рекордным решением, либо отбрасывается. В любом из этих случаев ветвление на оцененном подмножестве не проводится. Если же оптимальный базис оказался не особым, то происходит ветвление на два подмножества. Для проведения его находится некоторый столбец t , содержащий по крайней мере две клетки (s_1, t) и (s_2, t) полученного оптимального базиса. Выбирается любая из таких клеток (их может быть и больше двух) (s, t) и множество особых базисов делится на два подмножества: а) подмножество, содержащее клетку (s, t) ; б) подмножество, не содержащее клетки (s, t) . Каждое из полученных подмножеств в дальнейшем исследуется и разбивается (в случае необходимости) тем же образом.

Как показали эксперименты [77] (эксперименты проводились на ЦВМ UNIVAC 1108 и CDC 6400), для сетей, содержащих до 10 ЦВМ, при горизонте планирования, равном 60 мин, и числе распределяемых работ, равном 500, среднее время решения задач не превышало 2,5 ч.

§ 2.7. Методы решения задач синтеза структуры систем с учетом взаимосвязей по передаче информации между узлами

Рассмотрим постановку задач синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем с учетом взаимосвязи задач и узлов по обмену информацией между ними [1, 70].

Обозначим через $|\alpha_{ik'k'}|$ матрицу взаимосвязей между задачами, при этом величины $\alpha_{ik'k'}$ определяют величину среднего потока информации от k' этапа i' задачи к k -му этапу i -й задачи ($k, k' = \overline{1, K}, i, i' = \overline{1, I}$). Если задачи не связаны, то $\alpha_{ik'k'} = 0$. Пусть $|\gamma_{jij'l'}|$ — матрица, определяющая затраты на передачу единицы информации из узла j , оборудованного комплектом технических средств l -го типа, в узел j' , оборудованный комплектом технических средств l' -го типа ($l, l' = \overline{1, L}, j, j' = \overline{1, J}$). Для несвязанных узлов $v_{jij'l'} = \infty$. Затраты на передачу информации между узлами определяются при заданной структуре системы связи. Пусть также $m_{i\delta}$ — величины, характеризующие ресурс δ -го типа ($\delta = \overline{1, \delta_0}$) l -го комплекса технических средств; a_{ikjl} — эксплуата-

ционные затраты на решение i -й задачи k -м способом в j -м узле, оборудованном комплексом технических средств l -го типа: $m_{ikl\delta}$ — потребность в ресурсах δ -го типа технических средств l -го комплекса для решения i -й задачи, решаемой k -м способом (например, загрузка, суммарное процессорное время); c_{lj} — затраты на эксплуатацию l -го комплекса технических средств в j -м узле; R_l — капитальные затраты на технические средства; R_{ikjl} — затраты на разработку и внедрение k -го варианта i -й задачи, решаемой в j -м узле с использованием l -го комплекса технических средств.

Используя переменные x_{ikjl} и x_{lj} (см. § 2.4), основные характеристики эффективности структуры системы (§ 1.4) в данном случае запишем в виде табл. 2.2.

Таблица 2.2

| № п/п | Характеристика | Формула для вычисления |
|-------|---|---|
| 1 | Затраты на разработку задач и привязку их к техническим средствам узлов (в том числе с использованием типовых проектов) | $\sum_{ikjl} R_{ikjl} x_{ikjl}$ |
| 2 | Затраты на технические средства | $\sum_{jl} R_l x_{lj}$ |
| 3 | Затраты на выполнение задач в узлах | $\sum_{ikjl} b_{ikj} t x_{ikjl}$ |
| 4 | Затраты на передачу информации между узлами | $\sum_{ikjl} \gamma_{jlj'l'} \alpha_{ikik'} x_{ikjl} x_{i'k'j'l'}$ |
| 5 | Затраты на эксплуатацию технических средств | $\sum_{jl} b_{lj} x_{lj}$ |
| 6 | Эффект от выполнения задач | $\sum_{ikjl} c_{ikj} x_{ikjl}$ |
| 7 | Загрузка комплексов технических средств в узлах | $\sum_{ik} m_{ikjl} x_{ikjl}, \quad l = \overline{1, L}, \quad j = \overline{1, J}$ |
| 8 | Время выполнения этапов задач, либо их совокупности | $\sum_{kjl} t_{ikjl} x_{ikjl}$ для заданных i |

Рассмотрим решение задачи выбора структуры автоматизированных информационно-управляющих систем, минимизирующей затраты на систему и состоящей в определении уровней и вариантов решения задач управления в системе с учетом затрат на обмен информацией между задачами, решаемыми на различных уровнях, и затрат на эксплуатацию системы. С учетом характеристик табл. 2.2 задача запишется следующим образом:

$$\min \left[\sum_{ikjl} a_{ikjv'k'j'} x_{ikjl} x_{i'k'j'l'} + \sum_{lj} b_{lj} x_{lj} \right], \quad (2.63)$$

где $a_{ikj'k'j'} = b_{ikj}$, если индексы ikj и $i'k'j'$ у переменных x_{ikjl} совпадают, $a_{ikj'k'j'} = \alpha_{ik'k'}\gamma_{jl'l'}$ в противном случае.

При следующих ограничениях:

$$\sum_{kjl} x_{ikjl} \leq 1, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.64)$$

$$\sum_l x_{jl} = 1, \quad j = \overline{1, J}; \quad (2.65)$$

$$\sum_{ikl} m_{ikl\delta} x_{ikjl} \leq \sum_l m_{l\delta} x_{lj}, \quad j = \overline{1, J}, \quad \delta = \overline{1, \delta_0}; \quad (2.66)$$

$$\sum_{lj} R_l x_{lj} + \sum_{ikjl} R_{ikj} x_{ikjl} \leq R. \quad (2.67)$$

Величина критерия (2.63) определяет эксплуатационные затраты на функционирование системы. Ограничение (2.64) не допускает решения i -й задачи в различных узлах. Ограничение (2.65) определяет выбор лишь одного типа комплекса технических средств для решения задач в узле. Ограничение (2.67) учитывает тот факт, что ресурсы на разработку не должны превышать заданной величины R . Аналогичная постановка для максимизации суммарной эффективности выбранного варианта структуры приведена в [1].

Для решения различных вариантов данной задачи разработаны алгоритмы, использующие для нахождения оптимального варианта схему «ветвей и границ» [1, 70].

Рассмотрим использование данного подхода для решения задачи (2.63) — (2.67) при заданных технических средствах в узлах системы. Задача формулируется следующим образом:

$$\min \sum_{i, k, j} b_{ikj'k'j'} x_{ikj} x_{i'k'j'}; \quad (2.68)$$

при ограничениях

$$\sum_{kj} x_{ikj} = 1, \quad i = \overline{1, I}; \quad (2.69)$$

$$\sum_{ikj} R_{ikj} x_{ikj} \leq R; \quad (2.70)$$

$$\sum_{ik} m_{ikj} x_{ikj} \leq m_j, \quad j = \overline{1, J}. \quad (2.71)$$

Процедура ветвления определяется следующим образом. Распределение I задач с k_i вариантами по J узлам задается матрицей

$$X = |x_{ikj}|. \quad (2.72)$$

Очевидно, множество различных распределений I задач с k_i вариантами по J узлам совпадает с множеством матриц вида (2.72), где $i = \overline{1, I}$, $k = \overline{1, K_i}$, $J = \overline{1, J}$.

1-й шаг ветвления. Пусть R_0 — множество матриц вида (2.72). Разобьем R_0 на mk_1 непересекающихся подмножеств. Для этого зафиксируем элементы первой строки матрицы, придавая им значения из (2.72).

s -й шаг ветвления. В матрице (2.72) с ранее зафиксированными $s - 1$ строками фиксируется s -я строка. Для получения полного дерева ветвлений необходимо I шагов.

Способ нахождения оценок и стратегия движения по дереву решений состоит в следующем. Пусть на некотором шаге движения по дереву мы переходим к узлам s -го уровня. Для узлов s -го уровня пересчитаем значения $R^{(s)} = R^{(s-1)} - R_{skj}$ и $m_j^{(s)} = m_j^{(s-1)} - m_{skj}$. Для узлов дерева решений s -го уровня проверяем достаточное условие невыполнения ограничения (2.70). Пусть $R_i = \min_{kj} \{R_{ikj}\}$,

$i = \overline{s + 1, I}$. Если

$$\sum_{i=s+1}^I R_i > R^{(s)}, \quad (2.73)$$

то дерево с вершиной (skj) из дальнейшего рассмотрения исключается. Для оставшихся узлов s -го уровня проверяется достаточное условие невыполнения ограничения (2.71). Пусть $m_i = \min_{kj} \{m_{ikj}\}$,

$i = \overline{s + 1, I}$. Если

$$\sum_{i=s+1}^I m_i > \sum_j m_j^{(s)}, \quad (2.74)$$

то дерево с вершиной skj исключается из рассмотрения.

Для всех узлов s -го уровня, для которых не выполнены условия (2.73), (2.74), вычисляется оценка критерия для подмножества решений, содержащихся в дереве с вершиной (skj) . Для узла (skj) множество распределений задач и их вариантов по узлам совпадает с множеством матриц вида (2.72) с зафиксированными s строками. Множество всех незафиксированных задач обозначим $\Phi = \{f: i = \overline{s + 1, I}\}$, а множество зафиксированных $\Phi_1 = \{f: i = \overline{1, s}\}$. Здесь индекс f равняется произведению индексов ik . Критерий (2.68) при этом имеет вид $W = A + W_1$, где $A = \sum_{fj'j''} b_{j'f'j''} x_{j'f'j''}$, $ff' \in \Phi$, x_{fj} заданы первыми s строками матрицы (2.72);

$$W_1 = \min \sum_{fj'j''} b_{j'f'j''} x_{f'j''j''}, \quad (2.75)$$

где у x_{fj} , $x_{f'j''}$ хотя было одно из f или $f' \in \Phi$.

Для всех $f \in \Phi$ вычислим β_f :

$$\beta_f = \sum_{f \in \Phi_1} d_{ff'} \min_j \{\gamma_{jj'}\} + 0,5 \sum_{f \in \Phi} \min \{\alpha_{ff'} \gamma_{jj'}\}. \quad (2.76)$$

Первая сумма учитывает минимально возможные связи задачи f со всеми зафиксированными задачами $f \in \Phi_1$, а вторая сумма отражает минимально возможные связи задачи $f \in \Phi$ со всеми остальными задачами из Φ . Пересчитываются значения a_{ff} , где $f \in \Phi$: $\bar{a}_{ff} = a_{ff} + \beta_f$.

Построим следующую оценочную (вспомогательную) задачу:

$$W_2 = \min \sum_{j, f \in \Phi} \bar{a}_{ff} x_{ff} \quad (2.77)$$

при ограничениях (2.69) — (2.74). Заметим, что оценочная задача является линейной, для ее решения могут быть использованы известные алгоритмы (см. § 2.4 и 4.2).

Способ нахождения оценки критерия (2.68) подмножества решений с вершиной в skj устанавливает следующая.

Теорема. Пусть x принадлежит множеству X допустимых решений задачи (2.69) — (2.74). X^* — оптимальное решение оценочной задачи. Тогда $W_2(X^*) \leq W_1(x)$, $x \in X$.

Доказательство. Заметим, что оценочная задача и задача (2.68) — (2.74) имеют одно и то же множество допустимых решений, заданное системой ограничений (2.69) — (2.74). Покажем, что для любого $x \in X$ выполняется неравенство $W_2(x) \leq W_1(x)$. Действительно, $W_1(x)$ представляет собой сумму вида (2.75) с заданными значениями x_{ff} , которая состоит из n_1 слагаемых вида a_{ff} и n_2 слагаемых вида $(\alpha_{ff} \cdot \gamma_{jj'})$, где только одно из $f \in \Phi$ и n_3 слагаемых вида $(\alpha_{ff'} \cdot \gamma_{jj'})$, где f и $f' \in \Phi$; $n_1 = I - s$; n_2 — число связей между незафиксированными задачами из Φ и s зафиксированными задачами; n_3 — число связей между задачами $f \in \Phi$. В сумме W_1 заменим n_2 слагаемых вида $\alpha_{ff} \cdot \gamma_{jj'}$ на большие по величине слагаемые $(\alpha_{ff'} \cdot \min \gamma_{jj'})$ и n_3 слагаемых вида $(\alpha_{ff'} \cdot \gamma_{jj'})$ на большие слагаемые вида $(\min_{jj'} \{\alpha_{ff'} \cdot \gamma_{jj'}\})$. При такой замене W_1

не может уменьшиться и равно $W_2(x)$. Кроме того, очевидны следующие неравенства: $W_2(X^*) \leq W_2(x) \leq W_1(x)$, $W_2(X^*) \leq W_1(X^*)$, где $x \in X$. Отсюда следует утверждение теоремы.

Возможны различные стратегии движения по дереву решений. Например, после проверки условий (2.70), (2.71) оставшихся узлов уровня находится оценка, равная $A + W_2(X^*)$. Происходит сравнение вычисленных оценок для узлов s -го уровня со всеми ранее вычисленными оценками, полученными на предыдущих шагах движения по дереву. Выбирается узел с максимальной оценкой. Пусть он принадлежит s_1 -му уровню. На следующем шаге происходит спуск на $(s_1 + 1)$ -й уровень. Проверка условий (2.70), (2.71) и вычисление оценок происходит аналогично.

Процесс ветвления заканчивается, если на некотором шаге получено полное решение с наилучшими оценками для критериальной характеристики, либо полученное решение задачи используется для оценки задачи в целом.

Рассмотренный подход может быть эффективно использован также для решения задач выбора оптимальной структуры системы с отображением типа B , т. е. когда объем выполняемых операций для различных задач распределяется между различными узлами или уровнями системы. Заметим, что если узлы одного уровня системы идентичны, то это позволяет рассматривать работу одного

типового узла для каждого из уровней. Решение задачи в этом случае существенно упрощается.

Множество задач управления, решаемых в системе, можно разделить на плановые и оперативные. Моменты начала и окончания решения задач планового типа обычно считаются известными. Задачи оперативного типа поступают в систему случайным образом.

Качество решения задач оперативного типа характеризуется величиной

$$P(t_i > t_i^*) \leq \varepsilon_i,$$

где $P(t_i > t_i^*)$ — вероятность того, что время решения i -й задачи (t_i) превысит некоторое критическое значение (t_i^*); ε_i — величины, задаваемые в зависимости от важности задачи.

Характеристики качества обслуживания задач в узлах системы при используемых в настоящее время режимах работы ЦВМ (режимах разделения времени) могут быть исследованы независимо друг от друга [12]. Это позволяет для заданных x_{ij} получить ограничения типа (2.32) либо частотным методом, либо методом имитационного моделирования (см. гл. 5).

Заметим, что рассмотренная постановка задачи синтеза структуры может быть также использована для решения задачи разбиения системы на совокупность взаимосвязанных подсистем, блоков, модулей и т. д. Критерием оптимизации в этих случаях может быть дополнительно число внешних либо внутренних связей и др. (см. также гл. 2).

При синтезе автоматизированных телеавтоматических систем массового обслуживания с учетом необходимости централизации информации о распределении ресурсов и минимизации расходов на сеть связи задача выбора оптимальной структуры системы состоит в определении (по критерию приведенных затрат) размещения пунктов вычислительных комплексов, распределении функций между ними, а также распределении информационных и программных массивов между комплексами и внутри их отдельных устройств [23].

Задача решается в два этапа. На первом минимизируется целевая функция

$$Q = \min \sum_{n=1}^N \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijn} s_{ij} + \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^L z_{vn} (D_{inv} + Q_{inv}) \right].$$

где x_{ijn} и z_{vn} — булевы переменные, равные единице при наличии i -го массива на j -м запоминающем устройстве центра n , и связи между внешними устройствами v и центром обработки n соответственно; s_{ij} , D_{inv} , Q_{inv} — приведенные затраты на размещение i -го массива информации в j -м запоминающем устройстве, передачу информации о запросе типа l по каналам связи между внешним устройством v и центром и обработку запроса типа l , поступившего из внешнего устройства v в центр n , соответственно. При этом учитываются ограничения на количество аппаратуры, которое может быть задействовано в системе в целом и в каждом комплексе

в отдельности, максимально возможное число комплексов и возможное время ожидания заявок в очередях на обслуживание.

Значения переменных, минимизирующих целевую функцию при заданных ограничениях, определяют: количество комплектов аппаратуры, необходимое системе; пункты их размещения в зависимости от точек возникновения и характеристик входных потоков информации (предполагается, что статистические характеристики входных потоков заданы); схему связи внешних устройств с вычислительными комплексами и комплексов между собой, распределение массивов информации и программ между комплексами; объем аппаратуры каждого комплекса.

На втором этапе распределением функций между центральным и периферийными процессорами каждого центра, программ по уровням памяти минимизируется среднее время пребывания заявки в системе при параллельной обработке запросов

$$T = \min \left(\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I p_{il} \sum_j x_{ij} t_{il} + \max_k T_k^{\text{обп}} \right),$$

где p_{il} — частота обращения к массиву i по заявке l ; t_{il} — время пересылки информации из периферийной машины в процессор и обратно при обработке массива i ; $T_k^{\text{обп}}$ — суммарное время обработки массивов в k -й ЦВМ.

Имеющиеся нелинейности (например, из-за учета возникающих очередей), приводятся к линейному виду введением дополнительных переменных и ограничений. Таким образом, решение задачи на обоих этапах сводится к булевому линейному программированию [29].

Близкие задачи возникают при выборе структуры и технических характеристик устройств систем централизованного контроля (СЦК). Наиболее важной и сложной является задача выбора элементов структуры системы, т. е. числа и типов конкретных устройств контроля из заданной номенклатуры средств, их расположения на производстве и распределения датчиков по отдельным устройствам.

Математически задача ставится следующим образом [57]. Дано множество $X = \{x : x = 1, n\}$ цехов, участков или агрегатов, каждому элементу которого соответствует d_x — число контролируемых величин. Дано множество $Y = \{y : y = 1, m\}$ возможных мест установки устройств контроля, причем каждому элементу соответствуют капитальные вложения B_y , необходимые для установки в данное место y устройства контроля. Определены L_{xy} — стоимости линий связи между каждым участком x и каждым возможным местом установки устройства контроля y . Задано множество $T = \{t : t = 0, 1, \dots, v\}$ возможных модификаций устройств контроля, каждому элементу которого соответствуют d_t — максимальное число датчиков, которое может быть подсоединено к t -му устройству контроля, и c_t — стоимость t -го устройства контроля.

Последнее значение может быть приближенно сформулировано в виде функциональной связи $c_t = \varphi(d_t)$.

Требуется найти необходимые модификации устройств контроля из заданного множества T , их расположения по множеству Y и наличие связи каждого элемента множества Y с элементами множества X .

Целевой функцией задачи являются затраты на создание СЦК

$$\min F = \min \left\{ \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^m l_{xy} w_{xy} + \sum_{y=1}^m P_y(d_y) \right\}. \quad (2.78)$$

где w_{xy} — искомая неизвестная, равная единице, если существует связь между данными элементами x и y , и равная нулю в противном случае.

$$P_y(d_y) = \begin{cases} 0 & \text{при } d_y = 0 \text{ (нет датчиков, подключаемых к элементу } y); \\ B_y + \varphi(d_y), & d_y \in \{d_1, \dots, d_v\}. \end{cases}$$

Решение должно удовлетворять следующим ограничениям: все контролируемые величины каждого участка должны быть подключены к одному устройству контроля:

$$\sum_{y=1}^m w_{xy} = 1, \quad x_i = \overline{1, n}. \quad (2.79)$$

Следует использовать такую модификацию устройства контроля, которая обеспечивает контроль всех величин, подводимых к устройству:

$$\sum_{x=1}^n d_x w_{xy} \leq d_y, \quad y = \overline{1, m}; \quad d_y \in \{d_1, \dots, d_i, \dots, d_v\}. \quad (2.80)$$

Сформулированная задача (2.78)—(2.80) является задачей дискретного программирования, для решения которой разработана эффективная модификация метода «ветвей и границ» с ветвлением по обобщенным характеристикам [57].

Естественно, что более целесообразным было бы решение одной общей задачи, позволяющей найти сразу и структуру СЦК и необходимые параметры всех входящих в нее устройств. Однако подобную задачу трудно сформулировать, и это заставляет на рассматриваемом этапе разработки идти путем последовательных приближений, сочетая формальное решение отдельных задач с содержательным их анализом посредством сопоставления полученных решений и последующей корректировкой отдельных постановок.

Рассмотрим задачу синтеза иерархической структуры автоматизированной системы управления производственного комплекса с непрерывной технологией по критерию трудоемкости алгоритма управления [53].

Оптимизация структуры проводится по двум показателям. Первым показателем является трудоемкость управления, характе-

ризующая затраты (стоимость) человеко-машинного времени при управлении производственным комплексом с заданной структурой по определенному и достаточно сложному алгоритму работы системы. Данный алгоритм представляет собой декомпозиционную модель оперативного планирования комплекса. Вторым показателем определяет вариацию целевой функции, обусловленную изменением точности модели производственного комплекса при варьировании структуры.

В предположении, что реальные потери по функционалу системы тем больше, чем грубее модель, становится возможным сопоставление двух зависимостей для L -уровневых структур s -го вида: трудоемкости $M_L(s)$ и функционала $Q_L(s)$. Экстремум разности между ними определяет оптимальную структуру.

Для формализации задачи необходимо уметь рассчитывать зависимости $M_L(s)$ и $Q_L(s)$. Первая из них рассчитывается в следующей постановке:

$$M_L(s) = c_M \sum_{l=2}^L \tau_l m_l \frac{T_L}{T_{l-1}} \rightarrow \min, \quad (2.81)$$

$$\tau_l = r_l n_l, \quad \sum_{k=1}^{k_{l-1}} n_{lk} = \sum_{k=1}^{k_{l-1}} \sum_{j=1}^{j_l} n_{lkj} \leq A_M, \quad (2.82)$$

$$n_{lk} = \rho_l \sum_{v=1}^{M_{l-1}} n_{l-1, vk} + \Delta n_{lk}, \quad k \in K_{l-1}, \quad (2.83)$$

$$\frac{2}{\sum_{v=1}^{M_{l-1}} n_{l-1, vk}} \leq \rho_l \leq \frac{n_{l-1} - 1}{\sum_{v=1}^{M_{l-1}} n_{l-1, vk} + \Delta n_{lk}}, \quad (2.84)$$

$$n_{lk} \geq 2, \quad m_l \geq 1. \quad (2.85)$$

Под знаком суммы в (2.81) стоит время принятия решения при выработке закона управления комплексом на интервале $[0, T]$; c_M — стоимость единицы времени; τ_l — время принятия решения управляющими человеко-машинными системами каждой подсистемы на l -м уровне; m_l — число подсистем на l -м уровне; T_l — дискретность управления на l -м уровне; r_l — коэффициент пропорциональности; n_{lk} — размер задачи согласования подсистем $(l-1)$ -го уровня со стороны старшей подсистемы l -го уровня в течение k -го временного интервала, принадлежащего отрезку управления $[0, T]$; n_{lkj} — значение n_{lk} в j -й итерации процесса согласования; A_M — ограничение по пропускной способности человеко-машинной системы; ρ_l — коэффициент пропорциональности между размерами моделей подсистем $(l, l-1)$ -уровневого куста древовидной иерархии; Δn_{lk} — число переменных в модели старшей подсистемы куста, отсутствующих в моделях младших подсистем куста; k_l — множество индексов k -х интервалов на l -м уровне.

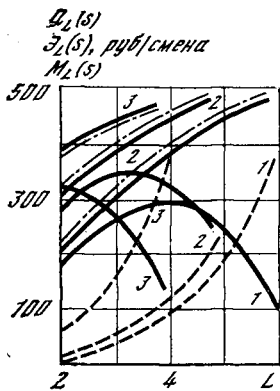


Рис. 2.8

На рис. 2.8 изображены показатели качества структуры ($\mathcal{E}_L(s) = M_L(s) - c_Q Q_L(s)$, c_Q — масштабный коэффициент), рассчитанные при выборе трех вариантов структуры конкретного производственного комплекса [53] (на рис. 2.8 сплошная линия соответствует значению $\mathcal{E}_L(s)$, штрихпунктирная — $M_L(s)$, пунктирная — $c_Q Q_L(s)$).

§ 2.8. Оптимизация структуры информационных систем

В данном параграфе рассматриваются задачи выбора оптимального варианта построения структуры информационной системы, которые являются детализацией общей задачи синтеза структуры (см. гл. 1).

Общая задача синтеза структуры информационной системы включает построение альтернативного графа допустимых вариантов построения системы G_0 и выбор на этом графе оптимального варианта $G^* = (I^*, F^*, D^*) \subset G_0$.

Методика построения альтернативного графа допустимых вариантов реализации системы основана на взаимосвязанном решении типовых задач синтеза основных элементов и частей синтезируемой системы. Основными из этих задач являются: выбор оптимального варианта G^* структуры информационной системы на графе G_0 , определение содержания и состава главных массивов, выбор наилучших вариантов подсистем формирования выхода из главных массивов и главных массивов из возможного входа, определение наилучших вариантов построения отдельных массивов и процедур [38, 42]. С математической точки зрения эти задачи относятся к классу комбинаторных задач дискретного математического программирования с линейными либо нелинейными целевыми функциями и ограничениями. В графовой интерпретации указанные задачи сводятся к определению оптимальных подграфов на ориентированных графах типа «И/ИЛИ».

Задача выбора оптимального варианта структуры информационной системы на альтернативном графе, содержащем возможные варианты реализации входных, главных и выходных массивов и агрегированные процедуры, определяющие варианты их преобразования, состоит в следующем. Пусть на графе G_0 выделены возможные наборы главных массивов, тогда задача состоит в определении таких наборов входных, главных и выходных массивов, а также соответствующих процедур, при которых оптимизируется заданный критерий качества и выполняются ограничения.

В качестве критериев оптимальности выбираемого варианта структуры информационной системы используется стоимость разработки, внедрения и эксплуатации системы. При оптимизации учитываются такие характеристики, как время разработки, быстродействие формирования требуемого выхода, необходимый объем памяти для размещения массивов, достоверность информации и ряд других, определяющих качество отдельных подсистем.

В зависимости от типа характеристик, используемых в качестве критерия и ограничений, рассматриваемая задача выбора структуры информационной системы является линейной либо нелинейной целочисленной задачей. Нелинейные характеристики (например, быстродействие системы) введением дополнительных переменных и ограничений могут быть сведены к линейному виду (см. § 2.4). Это позволяет применять стандартные методы и машинные программы для решения задач линейного целочисленного программирования. Для решения задач большой размерности разработаны методы с использованием схемы «ветвей и границ» и локальной оптимизации, рассмотренные ниже.

В процессе синтеза оптимального варианта структуры информационной системы выбираются главные массивы, однако задача выбора главных массивов имеет и самостоятельное значение и состоит в следующем. На графовой модели G_0 информационной системы, на которой отмечены рассогласованные во времени входные и выходные вершины графа, необходимо определить подмножество вершин $I_{\text{бд}} \subset I_0$ графа G_0 , исключение которого разрывает связь отмеченных пар входных и выходных вершин, а система с главными массивами $I_{\text{бд}}$ наилучшим образом удовлетворяет требованиям к заданным характеристикам качества [52].

В общем случае задача синтеза оптимальной структуры информационной системы с использованием графовой формализации ставится следующим образом. Необходимо синтезировать граф вариантов построения системы G_0 , включающий допустимые варианты преобразования информации источников в требуемому потребителям, и выбрать на нем оптимальный подграф $G^* \subset G_0$ по заданным критериям и ограничениям (гл. 1).

Графовая модель G_0 допустимых вариантов построения информационной системы (см. § 2.3) представляется ориентированным альтернативным графом с элементами типа «И/ИЛИ» (рис. 2.9), который обладает следующими свойствами: в процессе синтеза на графе G_0 выделены множества входных $I_{\text{вх}}$ и выходных $I_{\text{вых}}$ мас-

| Варианты получения исходной для ИСС информации от источников информации | Варианты формирования базисного объема | Варианты организации базиса | Варианты формирования главных массивов | Варианты организации базиса временной памяти | Варианты формирования базиса выходов | Варианты организации выходов | Варианты распределения информации потребителям | Варианты обеспечения потребителей необходимой информацией |
|---|--|-----------------------------|--|--|--------------------------------------|------------------------------|--|---|
|---|--|-----------------------------|--|--|--------------------------------------|------------------------------|--|---|

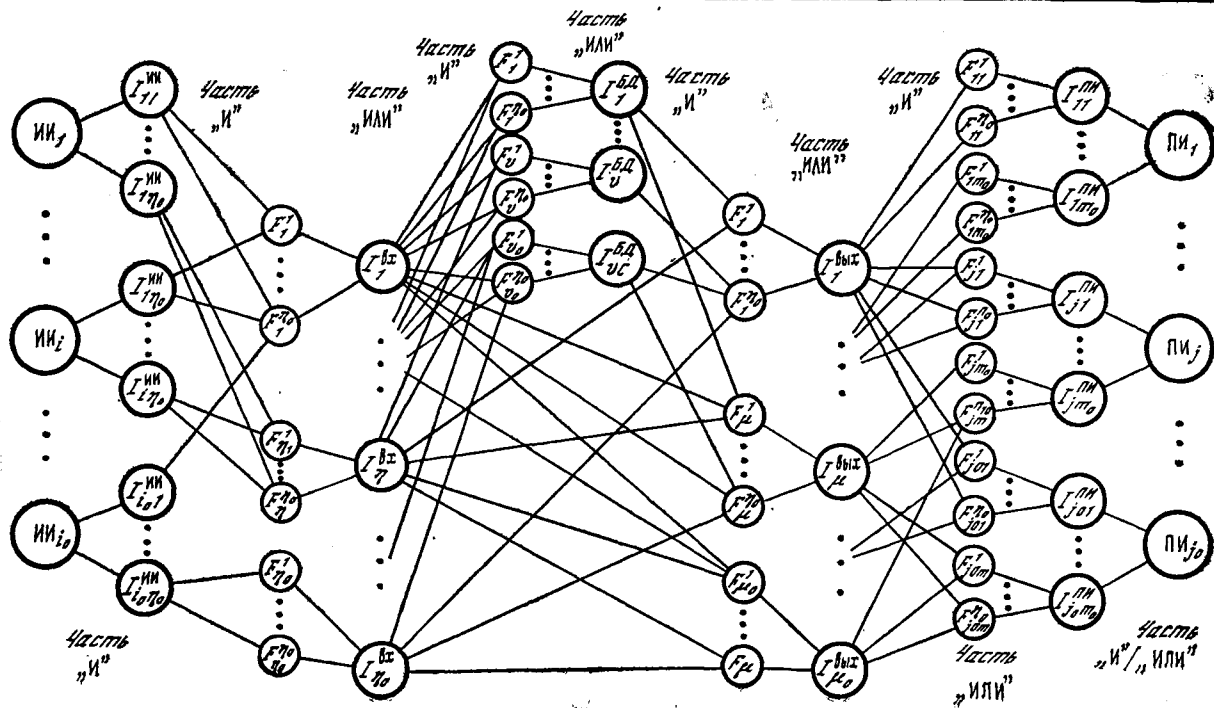


Рис. 2.9

сивов; отдельные массивы $I_k \in I_0$ могут входить в различные подмножества $\{I_k\}_k^r$, отражающие элементы типа «И» и являющиеся начальными для пучков дуг, которые отражают процедуры преобразования F_r одних массивов в другие; вершины графа $I_k \in \{I / \setminus I_{\text{вх}}\}$ могут получаться с применением различных процедур F_r (элементы модели типа «ИЛИ»); вершины $I_\mu^{\text{вых}}$ должны быть достижимы из множества $I_{\text{вх}}$ на графе G_0 . Взаимосвязи графа G_0 определяются матрицей D_0 на множествах элементов I_k и F_r .

Элементам I_k и F_r графа G_0 ставятся в соответствие наборы чисел, отражающие значения характеристик этих элементов и тех частей модели G_0 , которые их определяют. Заданы критерии оптимальности построения информационной системы и ограничения на характеристики качества (§ 1.4).

Главные массивы являются важной и во многом определяющей качество системы компонентой, а от их выбора существенно зависит оптимальность системы в целом. В зависимости от выбора массивов $I_v \subset I_{\text{бд}}$ информационной системы в качестве главных состав соответствующих программ для их формирования и получения из них требуемой на выходе системы информации может существенно отличаться. Пусть, например, граф, показанный на рис. 2.10, а, отражает модель преобразования входа информационной системы в требуемый выход. Система включает ряд процедур и массивов, из которых в качестве главных могут быть выбраны их различные допустимые сочетания, как, например, это показано на рис. 2.10, б—г. Получающиеся при этом агрегированные процедуры отличаются по составу входящих в них процедур и промежуточных массивов, что, в свою очередь, определяет характеристики формирования главных массивов, их хранения, формирования из них требуемого выхода системы и системы в целом.

В зависимости от уровня агрегирования процедур и определения набора главных массивов $I_{\text{бд}}$ системы графовая модель G_0 может быть упрощена до многодольного графа (входные массивы — агрегированные процедуры — главные массивы — агрегированные процедуры — выходные массивы), который может содержать типовые комплексы программ, модули и части типовых проектов. На стадии анализа и отбора наилучших вариантов построения элементов и частей системы, из которых строится допустимые варианты системы в целом, может быть использована имитационная модель [38]. Характеристики агрегированных процедур вычисляются через соответствующие характеристики входящих в них процедур и промежуточных массивов. В результате строится модель системы в виде альтернативного графа, приведенного на рис. 2.11, где $I_{\eta}^{\text{вх}} = \{I_{\eta}, \eta = \overline{1, \eta_0}\}$ — входные, $I_{\mu}^{\text{вых}} = \{I_{\mu}^{\text{вых}}, \mu = \overline{1, \mu_0}\}$ — выходные, $I_{\nu} = \{I_{\nu}, \nu = \overline{1, \nu_0}\}$ — главные массивы, $F_r = \{F_r, r = \overline{1, r_0}\}$ — агрегированные процедуры формирования главных массивов из входных, выходных из главных и входных массивов. Альтернативный граф вариантов $G_0 = (I_{\text{вх}}, I_{\text{бд}}, I_{\text{вых}}, F_0, D_0)$ отражает агрегированную модель

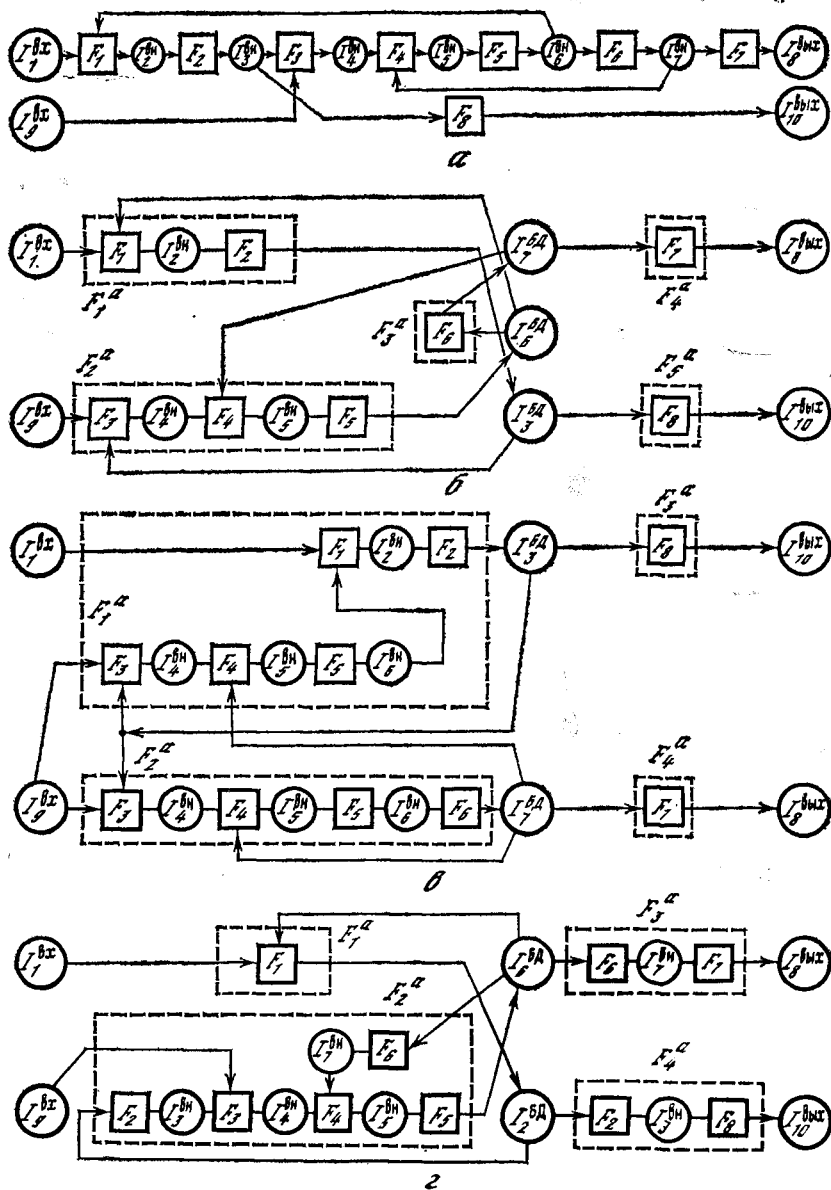


Рис. 2.10

вариантов построения системы на элементах $I_{\eta}^{BX} \in I_{BX}$, $I_v \in I_{BD}$, $I_{\mu} \in I_{ВЫХ}$ и $F_r^2 \in F_0$, а матрица $D_0 = |d_{kr}|$, $k = \eta$, v ; $r = 1, r_0$; $\eta = 1, \eta_0$, $v = 1, v_0$ задает структуру графа в виде $d_{rk} = 1$, если массив I_k используется процедурой F_r , и $d_{kr} = 0$ в противном случае. Варианты процедур для формирования раз-

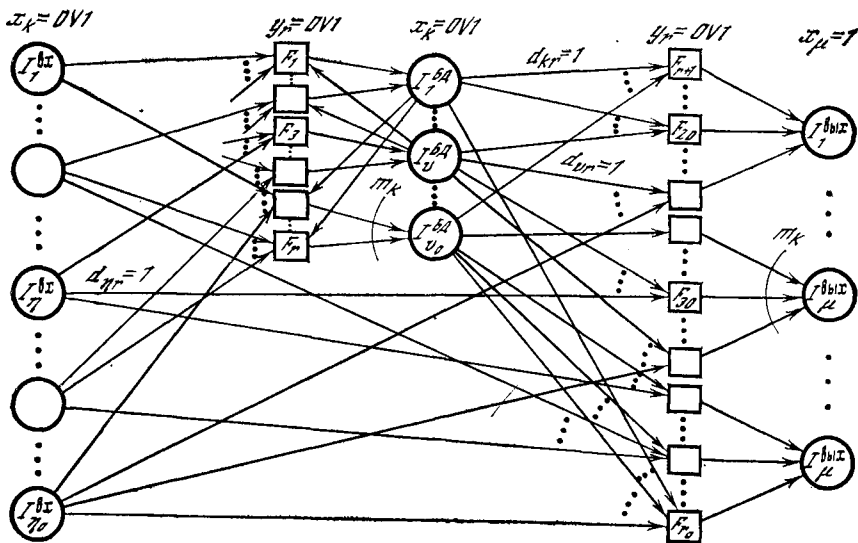


Рис. 2.11

личных массивов задаются множествами \mathfrak{M}_k , содержащими индексы лишь тех процедур F_r , которые могут использоваться для формирования массива I_k ($\forall k = \eta, \nu; \nu = \overline{1, \nu_0}; \mu = \overline{1, \mu_0}$).

На элементах модели G_0 задаются следующие переменные: $x_k = 1$, если массив I_k входит в выбираемый вариант построения системы; $y_r = 1$, если процедура F_r входит в выбираемый вариант построения системы; $x_k = y_r = 0$ в противном случае.

Величины $D_k = \sum_{r=1}^{r_0} d_{kr}$, $\forall k = \eta, \nu$ при $\eta = \overline{1, \eta_0}$ и $\nu = \overline{1, \nu_0}$

выражают число различных процедур модели G_0 , использующих массив I_k , $\forall k = \eta, \nu$. Тогда условия, аналогичные (2.19) — (2.23) общей задачи, применительно к рассматриваемой модели запишутся в следующем виде:

$$\sum_{r \in \mathfrak{M}_\mu} y_r = 1, \quad \forall \mu = \overline{1, \mu_0}; \quad (2.86)$$

(аналог условий (2.20));

$$\sum_{r \in \mathfrak{M}_\nu} y_r = x_\nu, \quad \forall \nu = \overline{1, \nu_0}; \quad (2.87)$$

(аналог условия (2.21));

$$D_k x_k - \sum_{r=1}^{r_0} d_{kr} y_r \geq 0, \quad \forall k = \eta, \nu; \quad (2.88)$$

где $0 \leq D_k^{-1} \sum_{r=1}^{r_0} d_{kr} y_r \leq 1$, $\forall k = \eta, \nu$, $\eta = \overline{1, \eta_0}$; $\nu = \overline{1, \nu_0}$, что

Таблица 2.3

| № п/п | Характеристика качества ИСС | Формула для вычисления |
|----------|---|--|
| 1 | Стоимость разработки | $c_p(x; y) = \sum_{k=1}^{k_0} c_p(I_k) x_k + \sum_{r=1}^{r_0} c_p(F_r) y_r$ |
| 2 | Время разработки | $t_p(x; y) = \sum_{k=1}^{k_0} t_p(I_k) x_k + \sum_{r=1}^{r_0} t_p(F_r) y_r$ |
| 3 | Эксплуатационные расходы | $c_\theta(x; y) = \sum_{v=1}^{v_0} x_v \sum_{\theta=1}^{\theta_0} c_{x\theta}(\theta) z_\theta(I_v^{\theta\pi}) +$ $+ \sum_{k=1}^{k_0} [c_\theta(I_k) x_k + \sum_{r=1}^{r_0} c_\theta(F_r; I_k) y_r];$ $c_\theta(I_k) = p(I_k) \sum_{\theta=1}^{\theta_0} c_\theta t_\theta^\theta(I_k);$ $c_\theta(F_r; I_k) = p(F_r) \sum_{\theta=1}^{\theta_0} c_\theta t_\theta^\theta(F_r) + \sum_{k=1}^{k_0} d_{kr} c_\theta(I_k)$ |
| 4 | Необходимый объем памяти ЗУ каждого θ -го типа | $L_\theta(x) = \sum_{v=1}^{v_0} L_\theta(I_v^{\theta\pi}) x_v;$ $L_\theta(I_v^{\theta\pi}) = \sum_{k \in K_v} L_\theta(I_k);$ $K_v = \{k I_k \in I_v^{\theta\pi}\}$ |
| 5 | Требуемое число средств каждого θ -го типа | $z_\theta(x; y) = \sum_{k=1}^{k_0} z_\theta(I_k) x_k + \sum_{r=1}^{r_0} z_\theta(F_r) y_r;$ $z_\theta(I_k) = \sum_{k \in K_k} z_\theta(I_k); K_k = \{k I_k \in I_k\};$ $z_\theta(F_r) = \sum_{\omega \in R_r} z_\theta(F_\omega); R_r = \{\omega F_\omega \in F_r\}$ |
| 6 | Расход времени (занятость) средств каждого θ -го типа при эксплуатации | $T_\theta(x; y) = \sum_{r=1}^{r_0} p(F_r) [t_\theta^\theta(F_r) y_r +$ $+ \sum_{k=1}^{k_0} d_{kr} t_\theta^\theta(I_k) x_k];$ $p(F_r) \text{ — активность процедуры } F_r$ |

очевидно из определения y_r , d_{kr} и D_k (аналог условий (2.23)).

С учетом (2.86), (2.87), определения переменных x_k и y_r и связи между ними (2.88) характеристики качества системы могут быть представлены в линейной форме на альтернативном графе (рис. 2.11), как это показано в табл. 2.3; см. также [38]. Для решения задачи оказывается возможным применить стандартные методы и машинные программы для решения задач линейного (целочисленного или смешанного) программирования, входящие в математическое обеспечение современных ЦВМ. Нелинейные характеристики (например, быстродействие) с помощью введения дополнительных переменных и стандартных преобразований сводятся к линейной форме (см. § 2.4). Однако введение дополнительных переменных приводит к увеличению числа ограничений

и размерности исходной задачи. Поэтому для решения задачи выбора наилучшего варианта построения структуры информационной системы в случае большой размерности целесообразно применять специальные методы, отражающие специфику задачи.

На стадии агрегации исходного альтернативного графа вариантов построения системы G до графа G_0 могут быть использованы методы имитационного моделирования. При этом вычисляются характеристики вариантов организации входных, главных и выходных массивов, а также агрегированных процедур модели. Для вычисленных характеристик проверяются заданные ограничения, что позволяет исключить из модели G_0 заведомо недопустимые варианты построения элементов и частей системы. При выделении начального решения задачи проверяются ограничения на переменные (2.86) — (2.88), фиксируются фрагменты графа G_0 , не имеющие вариантов, и для таких фрагментов проверяются локальные ограничения по характеристикам информационной системы при «сшивании» этих фрагментов с различными вариантами других частей модели G_0 . Одновременно исключаются недопустимые и заведомо худшие варианты на модели G_0 , что позволяет зафиксировать ряд переменных, которые и составляют начальное решение задачи. Ветвление из начального решения осуществляется по незафиксированным переменным x_k ($k = \nu, \mu; \nu = \overline{1, \nu_0}, \mu = \overline{1, \mu_0}$) с просмотром вариантов по y_r при $r \in \mathfrak{M}_k$ и оценкой просматриваемых вариантов по их возможному продолжению.

Полученные допустимые полные или частичные решения вместе с соответствующими оценками их характеристик запоминаются в массиве частичных решений, упорядоченном по ухудшению оценок для критериальных характеристик системы в целом. Это позволяет упростить выбор частичного решения с наилучшими оценками, наиболее перспективного для продолжения ветвления, исключение промежуточных вершин при ветвлении и их замену. Примеры решения общей и частных задач приведены в [38].

При проектировании систем обработки информации требуется синтезировать такую ее структуру, т. е. такую последовательность и число этапов обработки, контроля и исправления информации, которая обеспечивает максимальную достоверность обрабатываемой информации при удовлетворении ограничений на материальные и временные затраты. Возможна также постановка задачи определения оптимальной структуры обработки, при которой минимизируется время или материальные затраты с учетом ограничений на достоверность обрабатываемой информации [32].

Исходные данные обычно проходят следующие этапы обработки: запись исходных данных на первичный документ, передачу первичных данных в центр подготовки данных, преобразование и перезапись информации на промежуточные документы, перезапись информации на машинный носитель. На каждом из

указанных этапов возникают ошибки. На количество и характер возникновения ошибок влияют: несовершенство структуры и алгоритмов обработки информации, ненадежная работа оборудования и т. д.

Анализ различных схем обработки данных позволяет выделить стандартную схему обработки для любого из этапов, состоящую из операций непосредственно обработки данных, контроля и исправления ошибок. На некоторых этапах обработки операции контроля и исправления ошибок могут либо отсутствовать, либо осуществляться для группы из нескольких этапов, на каждом из которых, в свою очередь, осуществляется локальный контроль и исправление ошибок. После исправления ошибочных данных они вновь обрабатываются с последующим контролем и исправлением. Этот процесс может повторяться u раз.

Наибольшее распространение в настоящее время получили схемы, представленные на рис. 2.12, а, б. Для формализации задачи введем следующие обозначения: $i = \overline{1, m}$ — этапы первичной обработки информации; $j = \overline{1, n}$ — этапы контроля и исправления ошибок; q_i — вероятность искажения единицы объема информации на i -м этапе обработки; f_j — вероятность обнаружения ошибки для единицы объема информации на j -м этапе контроля; $e_j = 1 - f_j$ — вероятность пропуска ошибки; вероятность принятия правильно обработанной единицы объема информации за ошибку считается равной нулю; τ_i — время обработки единицы объема информации на i -м этапе обработки; θ_j и t_j — время контроля и исправления единицы объема информации на j -м этапе контроля соответственно; \bar{T} — заданное время обработки и контроля информации; w_i — затраты на обработку единицы объема на i -м этапе обработки; v_j и u_j — затраты на контроль и исправление единицы объема информации на j -м этапе соответственно; \bar{W} — общие затраты на обработку и контроль информации; N — объем обрабатываемой информации.

Тогда задача максимизации вероятности достоверной обработки информации для последовательной схемы рис. 2.12, а при $i = j = m$ и при заданных ограничениях на время и затраты запишется в виде

$$\max \sigma = \max_{v_i} \prod_{i=1}^m p_i \frac{1 - (q_i f_i)^{1+v_i}}{1 - q_i f_i} \quad (2.89)$$

при условиях, что

$$N \sum_{i=1}^m \frac{1 - (q_i f_i)^{v_i}}{1 - q_i f_i} (q_i f_i \tau_i + \theta_i + q_i f_i t_i) \leq \bar{T} - N \sum_{i=1}^m \tau_i, \quad (2.90)$$

$$N \sum_{i=1}^m \frac{1 - (q_i f_i)^{v_i}}{1 - q_i f_i} (q_i f_i w_i + v_i + q_i f_i u_i) \leq \bar{W} - N \sum_{i=1}^m w_i. \quad (2.91)$$

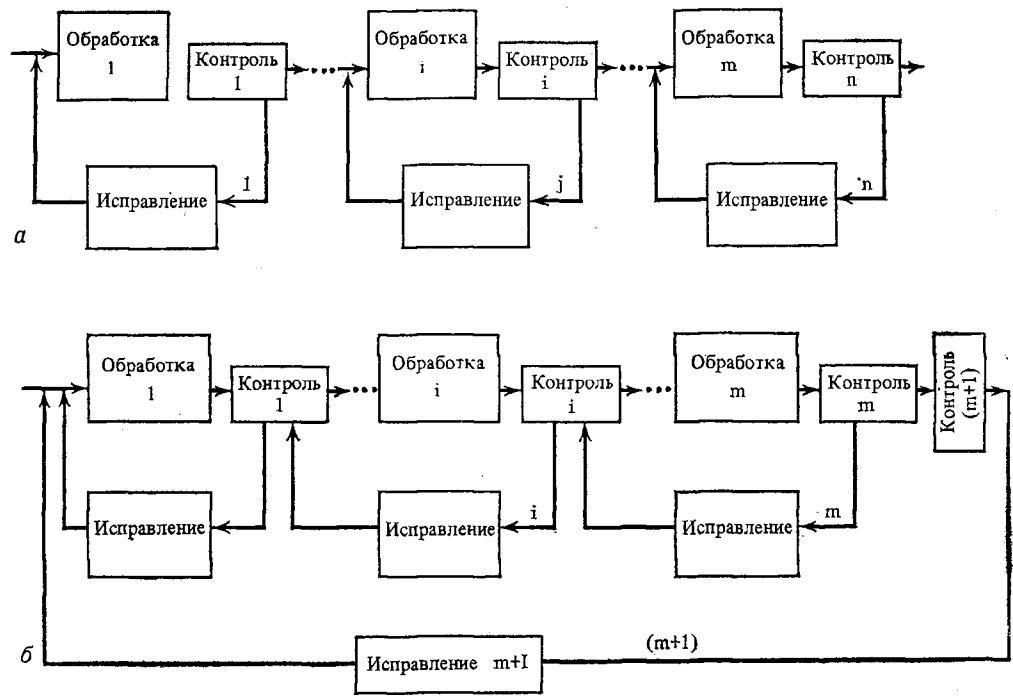


Рис. 2.12

Решение может быть получено методом множителей Лагранжа и при ограничении на время обработки и контроля имеет вид

$$y_i = \ln \left[1 - \frac{q_i f_i (1 - q_i f_i) \left(\bar{T} - N \sum_{i=1}^m \tau_i \right)}{N (q_i f_i \tau_i + \theta_i + q_i f_i t_i) \sum_{i=1}^m q_i f_i} \right] (\ln q_i f_i)^{-1} - 1. \quad (2.92)$$

При минимизации времени обработки при ограничении на вероятность достоверной обработки данных получим [32]

$$y_i = \ln \left\{ 1 - \frac{q_i f_i (1 - q_i f_i)}{N (q_i f_i \tau_i + \theta_i + q_i f_i t_i)} \left[\sigma \left(\prod_{i=1}^m \frac{p_i q_i f_i}{N (q_i f_i \tau_i + \theta_i + q_i f_i t_i)} \right)^{-1} \right]^{1/m} \right\} \times (\ln q_i f_i)^{-1} - 1.$$

Для получения целочисленного решения данной задачи может быть использован, например, метод динамического программирования.

Функциональное уравнение Р. Беллмана для последовательной схемы имеет вид

$$\begin{aligned} F_i(y_i) &= \max_{0 \leq y_i \leq y_{i \max}} [\sigma_i F_{i-1}(y_1, \dots, y_{i-1})] = \\ &= \max_{0 \leq y_i \leq y_{i \max}} \left[p_i \frac{1 - (q_i f_i)^{1+y_i}}{1 - q_i f_i} F_{i-1}(y_1, \dots, y_{i-1}) \right]; \\ F_1(y_1) &= \max_{0 \leq y_1 \leq y_{1 \max}} \left[p_1 \frac{1 - (q_1 f_1)^{1+y_1}}{1 - q_1 f_1} \right], \end{aligned}$$

где $y_{i \max}$, $i = \overline{1, m}$, определяется из выражений, аналогичных (2.92), но для стандартной схемы обработки.

При практическом использовании метода динамического программирования для уменьшения объема вычислений следует ввести ряд допущений. Так, при сравнении двух вариантов структуры можно ввести допустимую погрешность ε_j по ограничениям j -го типа ($j = \overline{1, k}$), а также допустимую погрешность по вероятности достоверной обработки ε_σ . Если какие-либо два варианта системы обработки данных отличаются друг от друга по ограничениям j -го типа или по вероятности σ на величину не больше чем ε_j и ε_σ , они считаются идентичными. Для рассматриваемых моделей обработки данных при $\varepsilon_\sigma = 1 \cdot 10^4$ в практических случаях величина $y_{i \max} = 4 \dots 5$.

Рассмотрим решение задачи оптимизации структуры первичной обработки данных для схемы, изображенной на рис. 2.12, б. Критерий оптимизации для данной схемы запишется в виде

$$\max c \frac{1 - (df_{m+1})^{1+y_{m+1}}}{1 - df_{m+1}}, \quad (2.93)$$

$$\text{где } c = \prod_{i=1}^m p_i \frac{1 - (q_i f_i)^{1+y_i}}{1 - q_i f_i} = \prod_{i=1}^m p_i a_i (1 - b_i^{1+y_i}),$$

$$d = 1 - c = 1 - \prod_{i=1}^m p_i a_i (1 - b_i^{1+y_i}).$$

Ограничения по времени и затратам на обработку имеют вид

$$N \left[\frac{1 - (df_{m+1})^{y_{m+1}}}{1 - df_{m+1}} (\tau_e df_{m+1} + \theta_{m+1} + df_{m+1} t_{m+1}) + \tau_e \right] \leq \bar{T}, \quad (2.94)$$

$$\text{где } \tau_e = \sum_{i=1}^m [a_i (1 - b_i^{y_i}) (b_i \tau_i + \theta_i + b_i t_i) + \tau_i];$$

$$N \left[\frac{1 - (df_{m+1})^{y_{m+1}}}{1 - df_{m+1}} (w_e df_{m+1} + v_{m+1} + u_{m+1} df_{m+1}) + w_e \right] \leq \bar{W}, \quad (2.95)$$

$$\text{где } w_e = \sum_{i=1}^m [a_i (1 - b_i^{y_i}) (b_i w_i + v_i + u_i b_i) + w_i].$$

Введем обозначения $\alpha = 1/(1 - df_{m+1})$, $\beta = df_{m+1}$. Критерий оптимизации (2.93) и ограничения (2.94), (2.95) в этом случае запишутся в виде

$$\begin{aligned} & \max \alpha c (1 - \beta^{1+y_{m+1}}), \\ & N [\alpha (1 - \beta^{y_{m+1}}) (\beta \tau_e + \theta_{m+1} + \beta t_{m+1}) + \tau_e] \leq \bar{T}, \\ & N [\alpha (1 - \beta^{y_{m+1}}) (\beta w_e + v_{m+1} + \beta u_{m+1}) + w_e] \leq \bar{W}. \end{aligned} \quad (2.96)$$

Задачу максимизации функции (2.96) с учетом одного из ограничений, записанного в виде равенства, можно решить, например, методом, аналогичным методу условных множителей Лагранжа, однако множитель определяется с помощью итеративного процесса [32]. Быстрота сходимости итеративного процесса зависит от того, насколько удачно сделан первоначальный выбор величин y_i , $i = \overline{1, m+1}$.

Для уменьшения числа итераций при поиске решения следует при выборе оценки y_i^0 , $i = \overline{1, m+1}$, придерживаться следующего правила: большие значения назначать на те же этапы первичной обработки информации, на которых максимальны f и q , а затраты и время контроля и исправления данных минимальны.

§ 2.9. Оптимизация структуры организационных систем

От того, как организована система управления, на каком уровне, каким образом принимаются управленческие решения, как осуществляется обмен информацией между ее элементами, в значительной, а иногда и в решающей мере зависит эффективность управления и в конечном счете эффективность деятельности всей системы по достижению поставленных целей. Организационная

структура определяет распределение управленческих задач и полномочий на принятие решений между лицами или группами лиц, образующих структурные подразделения системы управления. Наиболее распространенным типом организационных структур систем организационного управления являются иерархические или многоуровневые структуры.

Деятельность по управлению представляет собой совокупность управленческих задач, т. е. комплекс взаимосвязанных операций по обработке информации и принятию решений. Множество управленческих задач по определенным классификационным признакам разбивается на ряд подмножеств — функций управления. Состав и взаимосвязи управленческих задач системы управления представляют ее функциональную структуру.

Синтез организационных структур осуществляется либо в целях совершенствования существующих систем управления, либо для создания новых. В зависимости от задач, стоящих перед разработчиками систем управления, реорганизация может затрагивать всю или определенную часть системы управления. В последнем случае требуется синтезировать структуру заданной подсистемы управления, сохранив существующую структуру остальных подсистем.

Проблема синтеза структуры организационной системы состоит в определении оптимальной иерархической структуры управления, которая при прочих равных условиях обеспечивает максимальную отдачу от используемых ресурсов в процессе достижения организацией определенных целей.

Исследования организационной структуры в настоящее время все еще в значительной мере основаны на здравом смысле и носят качественный характер. Формирование организационной структуры — в основном область интуиции и искусства. Научный подход к этой области начал развиваться только в последнее время.

Модель организационно-функциональной (управленческой) структуры должна отражать иерархию управления, характер взаимосвязей между управляющими узлами различных уровней, распределение функций управления по уровням и узлам системы с учетом возможных принципов управления и функционирования системы (в том числе структуры автоматизированного информационно-управляющего комплекса).

Традиционно структура системы считается той основой, которая наиболее консервативна и мало изменяется во времени. Однако в настоящее время структурные параметры перестают быть неизменными, это требует разработки специальных методов синтеза и планирования развития структуры систем. Динамические задачи синтеза структуры требуют создания методов формализации и оптимизации, начиная от сценариев развития системы (с учетом целевых программ, долгосрочных планов развития производства, принципов управления и методов контроля за реализацией и стимулированием выполнения плана) до выбора рациональных производственных и управленческих структур (см. гл. 1).

При этом задача синтеза оптимальной структуры включает в себя: определение оптимального состава и взаимосвязей узлов системы; выбор иерархии управления, согласование целей подсистем различных уровней и оптимальное стимулирование их работы; оптимальное распределение выполняемых функций по уровням и узлам системы управления; выбор структуры систем передачи и обработки информации (в том числе структуры информационно-управляющего многомашинного комплекса). Эти модели должны учитывать динамику развития элементов системы, их взаимосвязей. Наконец, организационная структура должна создаваться с учетом поведения людей и коллективов, вступающих в отношения между собой при решении общих задач.

Круг проблем, возникающий при синтезе структуры организационных систем, весьма многообразен. Для решения отдельных задач синтеза структуры могут быть использованы многие модели и методы синтеза структуры, рассмотренные в остальных главах книги (см. также [16, 25, 26, 46, 48, 50, 54]).

Для исследования вопросов построения структуры организационных систем обычно оказываются недостаточными классические методы исследования технических систем. Это связано с участием человека и коллективов людей в процессе управления, с трудностью формализации и анализа многочисленных связей между элементами системы.

Весьма сложны вопросы рационального распределения функций, прав и обязанностей между различными исполнителями в системе. Для анализа возможных последствий распределения функций между исполнителями и принимаемых ими решений в настоящее время используются лишь методы деловых игр или методы моделирования.

Разнообразие систем организационного управления, определяемое большим разнообразием объектов управления, целей, стоящих перед системами, а также условиями их функционирования, затрудняют создание единого универсального метода синтеза их структуры, одинаково эффективного во всех конкретных случаях.

Модели и методы синтеза структуры организационных систем могут охватывать структуры: организационную, административную, функциональную, информационную (либо некоторое их сочетание) (см. рис. 1.2). Наиболее разработанными являются модели и методы оптимизации построения информационной структуры организационных систем (см. § 2.3; 2.8, а также [40]). Классификация моделей и методов синтеза структуры организационных систем может быть выполнена по различным факторам (см. также § 1.5):

— не формализованные, носят в основном качественный характер (структура управления рассматривается преимущественно с точки зрения текущих задач, в статике, преобладает описательный подход к структурам: они трактуются как набор линейных и функциональных служб);

— формализованные;

— охватывают организационную, административную, функциональную и информационную структуру (либо их сочетание);

— по уровням иерархии в системе управления и типу организаций, для оптимизации структуры которых они предназначены (отдельные подразделения, предприятия, объединения, НИИ и КБ, отрасли и др.);

— исследуется система в статике или в динамике (учитывается ли динамика функционирования системы);

— задано (или определяется в процессе синтеза) число уровней управления и подсистем на каждом уровне (в том числе число и квалификация работников);

— задано (или определяется) распределение функций по уровням и узлам системы;

— по типу и особенностям математических моделей, критериев и ограничений и методам решения задач (см. § 1.5).

Приведенная классификация моделей и методов синтеза структуры организационных систем показывает их многообразие. Весьма сложна также проблема получения необходимой информации для рационального построения систем, особенно для вновь создаваемых систем. Поэтому при проектировании организационных структур широко используются методы экспертного анализа для сравнительной оценки разных вариантов. С помощью специалистов и практических работников устанавливаются преимущества и недостатки каждого варианта, готовится необходимая информация для разработки предложений, отвечающих сформулированным требованиям.

Проектирование осуществляется с использованием графических и макетно-стендовых моделей (органиграмм), «карт ответственности за достижение целей», «матриц распределения прав и обязанностей», «матриц межфункциональных связей», «контрольных списков» преимуществ и недостатков разных организационных вариантов, «проигрывания» различных схем распределения этапов принятия решений по исполнителям.

Под организационной структурой обычно понимается та часть описания организационной системы, которая характеризует распределение прав и ответственности внутри организации, однако часто в понятие организационная структура включается также вся совокупность правил и предписаний, регламентирующих деятельность членов организации (в том числе совокупность должностных инструкций, технологий обработки информации, прохождения документов и т. п.).

Отметим, что понятия власти (права) и ответственности в моделях по синтезу структуры организационных систем в настоящее время являются наименее формализованными. Власть (права) лица (группы лиц) — это способность (правомерность), оговоренная законом, инструкциями, приказами, правилами, уставами и т. д. (либо присвоенная самостоятельно), выполнения определенных действий (принимать определенные решения и т. д.). Ответственность лица (группы лиц, коллектива) — это оговорен-

ная законом, инструкциями, приказами, правилами, уставами, традициями и т. д. совокупность действий, ситуаций, за которые оно(они) несет(ут) ответственность. Компетенция лица (коллектива) — это совокупность оговоренных законом, инструкциями, приказами, правилами, уставами, традициями, профессиональной подготовкой и т. д. действий, ситуаций, относящихся к данному лицу, коллективу.

Данные трудно формализуемые понятия при анализе различных организационных структур обычно заменяются совокупностью выполняемых системой функций (или решаемых задач). Работы по формализации различных законодательных документов (инструкций и т. п.) лишь начинают развиваться, отметим проект Legol [78].

Недостаточно формализован также процесс принятия решений в организационных системах. Наибольшие успехи здесь достигнуты при отработке техники принятия решений для лица, принимающего решения (ЛПР) [25] (наибольшее внимание в этих работах уделяется вопросам отработки механизмов принятия экспертных оценок для слабоформализованных проблем).

Построение организационной структуры в настоящее время обычно сопутствует разработке АСУ и начинается с анализа функций и информационных потоков в организации [39]. При анализе системы прежде всего строится структурная схема организации в виде графа, вершины которого могут соответствовать отдельным подразделениям или руководителям. Ориентированные ребра графа отражают административные и функциональные связи в организации.

На первом этапе строится граф административных связей, который в случае иерархической системы управления имеет вид дерева. На втором этапе на схеме отображаются выявленные в процессе обследования функциональные связи. На следующих этапах определяются функции организации, характеристики решаемых ею задач, а также функции и описания информационных потоков подразделений, на основании которых строятся структурные схемы подразделений.

Результаты исследования структуры и функций организации удобно представлять в виде специальной обобщенной структурно-информационно-временной схемы [39]. Аналогичные документы разрабатываются и на этапе проектирования структуры системы. В результате анализа структуры обычно удается выявить нерациональность схем принятия решений, движения и обработки информации, распределения функций между подразделениями и т. п. (см. также § 1.5).

Процесс реорганизации (совершенствования) структуры системы включает в себя следующие этапы: анализ системы, опыта совершенствования подобных систем, принципов управления, экономико-математических методов, а также средств вычислительной техники и средств переработки информации: выдвижение ряда вариантов построения системы; отбор оптимального (рациональ-

ного) варианта. Совершенствование структуры системы может проводиться и независимо от создания автоматизированных систем управления.

Частота реорганизации структуры определяется бурной технической революцией, свидетелями которой мы являемся, и будет ускоряться с каждым годом. Причем в настоящее время достаточно часто меняются структура и функции не только низших, но и высших ступеней управления.

Выбор эффективной организационной структуры усложняется отсутствием достаточно обоснованных формализованных критериев, отражающих цели организации. Например, цель организаций административного типа — улучшение качества управления. Ясно, что формализовать такого рода цели достаточно трудно. Цель большинства предприятий — увеличение количества выпускаемой продукции или поддержание его на заданном уровне. В этом случае количественным критерием качества структуры может служить производительность труда, точнее, ее изменение как результат изменений организационной структуры. Формализация критерия усложняется, если предприятие выпускает много видов продукции.

В зависимости от изменения внешней среды и внутренних условий изменяются цели организации, а следовательно, и ее структура.

При синтезе организационной системы сложен выбор критерия оптимальности структуры (обычно многомерного), который определяется целями и стратегией функционирования организации. Критериями оптимальности функционирования организации могут быть [79]:

1. Эффективность стабильного состояния организации, когда организация выпускает заданный объем продукции данного качества с наименьшими расходами.

2. Увеличение оперативных возможностей организации, которые определяются способностью организации изменять количество выпускаемой продукции в соответствии с заданиями.

3. Увеличение стратегических возможностей организации, которые определяются способностью организации реагировать на изменение видов продукции, изменение технологии, введение нового производства и т. д.

4. Увеличение структурных возможностей, которые определяют способность организации быстро изменять свою структуру.

Цели функционирования, естественно, должны выбираться с учетом реальных ограничений экономического характера, финансовых, людских и материальных ресурсов и пр. Нетрудно видеть, что перейти от таких критериев оптимальности непосредственно к количественным критериям синтеза структур достаточно трудно.

Один из наиболее распространенных в настоящее время количественных критериев, используемых при объединении решаемых организаций задач в подсистемы, связан с понятием близости

решаемых задач. Близость задач в организации может выражаться, например, в том, что решение одной из них невозможно без решения другой. Задачи могут считаться близкими в связи с использованием при их выполнении одних и тех же ресурсов. Кроме того, близость можно оценивать по величине потока информации, которой обмениваются подразделения, или по степени изменения взаимосвязей во времени.

Объединение в одну подсистему наиболее близких задач облегчает как управление ходом решения задач внутри самих подсистем, так и координацию деятельности подсистем в целом. Если в подсистеме объединяются наиболее тесно связанные задачи (с учетом нормы управляемости), объем информации, которой обмениваются подсистемы, значительно сокращается. Благодаря этому уменьшается время, затрачиваемое на обмен информацией, и система быстрее реагирует на всякого рода изменения. Критерием выбора структуры при этом может служить упрощение координации деятельности подсистем (объединение в подсистемы наиболее сильно связанных задач в соответствии с их близостью).

При анализе процессов управления, происходящих в организации, важным является понятие элементарной операции. Операции назовем элементарными, если при синтезе данной структуры дальнейшая их детализировка не имеет смысла. В зависимости от уровня рассмотрения элементарными операциями в организационных системах могут быть операции производства, сбыта, финансирования, обработки информации, принятия решений и т. п. [9].

В общем случае каждой элементарной операции e_i поставим в соответствие входной и выходной векторы $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{im})$ и $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{in})$ соответственно. В ряде случаев преобразование вектора x_i в вектор y_i можно выразить математически:

$$y_i = f_i(x_i), \quad (2.97)$$

где f_i — функция преобразования. Например, операцией может считаться задача принятия решения, состоящая в выборе по определенному критерию одной альтернативы y_i . Операцией может считаться производство k видов продукции в количествах y_{i1}, \dots, y_{in} при потреблении видов сырья в объемах x_{i1}, \dots, x_{im} .

Когда преобразование линейно, формулу (2.97) можно записать в матричном виде:

$$y_i = A_i x_i, \quad (2.98)$$

где A_i — матрица преобразований.

Элементарные операции в организации оказываются связанными друг с другом. Связь операций удобно представить графом $\Gamma'(E, H')$ без петель, множество вершин E которого соответствует операциям e_1, \dots, e_n , а каждая дуга $h'_{ij} \in H'$ указывает на то, что выход операции e_i является входом операции e_j .

Как правило, преобразование (2.97) сопряжено с затратой ресурсов (вычислительных или производственных усилий, денежных средств, сырья и т. п.). В этом случае, кроме логических

связей между операциями e_i , необходимо учесть связи, обусловленные наличием ограничений типа

$$\Phi_k [f_i(x_i)] \leq u_k, \quad k = \overline{1, m}, \quad (2.99)$$

где u_k — количество ресурсов k -го типа или ресурсы, выполняющие k -ю функцию, а $E_k \subset E$ — подмножество операций, занятых выполнением k -й функции и потребляющих ресурсы k -го типа.

Распространенным частным случаем (2.99) является выражение линейного типа

$$\sum_{i=1}^{n_k} u_{ki} f_i(x_i) \leq u_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (2.100)$$

Связи между операциями, возникающие при наличии ограничений типа (2.99), будем называть ресурсными или функциональными. Эти связи также можно изображать графически, построив ресурсный граф $\Gamma'' [E \cup V, N'']$, в котором множество вершин $V = (v_1, \dots, v_m)$ представляет источники ресурсов (они могут быть и фиктивными). Каждая дуга h_{kj}'' показывает, что операции e_j требуются ресурсы k -го типа.

Отметим, что таким образом можно изображать связи операций, которые не сводятся к технологическим, например, принадлежность одному проекту, географическому району и т. д. Эти связи можно также причислить к разряду ресурсных.

Чтобы получить полную картину взаимосвязей операций организации, необходимо построить объединенный граф $\Gamma (E \cup V, N' \cup N'')$, получаемый из графа Γ' добавлением ресурсных вершин и дуг графа Γ'' (который будем называть графом взаимосвязи операций).

Разбиение множества элементов E на N несвязанных подмножеств запишется как E_1, E_2, \dots, E_N , где $E_i \subset E$ и $E_i \cap E_j = \emptyset$ для $i, j = \overline{1, N}$ и $\bigcup_{i=1}^N E_i = E$. Задача состоит в том, чтобы

получить разбиение, которое минимизирует функцию $\sum_{i=1}^N C(E_i)$, где $C(E_i)$ — некоторая функция, определенная на множестве разбиений $E_i, i = \overline{1, N}$.

Задача синтеза структуры управления состоит в разбиении E на подмножества E_1, \dots, E_N при различных критериях разбиения системы (графа Γ) на подсистемы (подграфы). При этом близость операции e_i к операции e_j будем характеризовать величиной m_{ij} , где m_{ij} — значение потока по дуге h_{ij} графа Γ , измеряемое объемом информации, количеством материалов, объемом перевозок и др.

Связный подграф D графа Γ называется подсистемой системы E . Подсистемы D и F называются независимыми, если они не имеют общих элементов, т. е. $D \cap F = \emptyset$.

Порядком $r(D) = \bar{r}$ подсистемы D называется количество ее элементов. Величина максимально допустимого порядка \bar{r} характеризует норму управляемости данной подсистемы.

Сила внутренних и внешних связей подсистемы F системы $D \subset E$ характеризуется суммарными величинами потоков $m(F)$ и $n(F)$ соответственно по всем дугам, соединяющим подсистему $F \subset D$ с другими элементами системы $D \subset E$ и с остальными элементами всей системы, т. е.

$$m(F) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_{i,j} m_{ij}, & \text{где } e_i \in F, e_j \in D \setminus F, \text{ при } r(F) > 1, \\ \infty & \text{при } r(F) = 1, \end{cases}$$

$$n(F) = \sum_{i,j} (m_{ij} + m_{ji}), \text{ где } e_i \in F, e_j \in E \setminus D.$$

Система D называется сильно связанной, если для любой подсистемы $F \subset D$ имеет место $m(F) > n(F)$.

Сформулируем задачи разбиения с различными критериями разбиения системы E на подсистемы E_1, \dots, E_N .

Задача 1. Найти разбиение E на подсистемы E_1, \dots, E_N при $r(E_i) \leq \bar{r}, i = \overline{1, N}$, которое минимизирует некоторую функцию от характеристик внешних связей между подсистемами (например, сумму внешних связей, величину связей между отдельными подсистемами).

Задача 2. Найти разбиение E на сильно связанные подсистемы E_1, \dots, E_N при $r(E_i) \leq \bar{r}, i = \overline{1, N}$, минимизирующие количество независимых подсистем.

Задача 3. Найти сильно связанную подсистему $E_k \subset E$ максимального порядка, содержащую заданный элемент $e_i^{(k)} \in E_k$, где $E_k = E \setminus \bigcup_{\rho=1}^{k-1} E_\rho$ при условии, что $r(E_k) \leq \bar{r}$.

Наиболее общей является

Задача 4. Найти разбиение E на оптимальное число подсистем, обладающих заданными характеристиками взаимосвязей, например, удовлетворяющих требованиям задач 1–3.

Разбиение графа Γ на подсистемы (задачи 1–4), как правило, сопряжено с разрывом связей (дуг графа Γ) между подсистемами. В частных случаях графа Γ (например, когда он соответствует Γ' или Γ'') может не потребоваться разрывать связи, графы Γ' или Γ'' могут состоять из компонент связности, но даже в этих случаях они часто оказываются связанными по критерию оптимальности функционирования всей системы.

Выделим два принципа декомпозиции: разложение переменных (операций) и разложение ограничений (ресурсных вершин). Если дуга (e_i, v_k) разрывается, $e_i \in E_i, v_k \in E_k, E_i \cap E_k = \emptyset$ (случай (e_i, e_k) сводится к данному), то вместо вершины e_i в первом случае вводим две не связанные между собой вершины e'_i и e''_i . Вершина e'_i остается связанной только с вершинами первой под-

системы, а вершина e_i'' — с вершинами второй. Это преобразование соответствует тому, что в целевой функции и ограничениях первой подсистемы x_i (x_i соответствует e_i) заменяется на x_i' , а второй подсистемы — на x_i . Благодаря этому модели подсистем становятся формально независимыми. В этом случае необходимым (а иногда и достаточным) условием согласования является выполнение равенства $x_i' = x_i''$ [44].

Как уже отмечалось ранее, разложение системы на несколько относительно автономных подсистем приводит к необходимости создания высшего координирующего органа, задачей которого является координация деятельности подсистем (в данном случае согласование переменных x_i' и x_i''). Формальными способами воздействия координирующего органа на управляемые подсистемы при этом являются: плата за взаимодействие, фиксирование взаимодействий, оценка взаимодействий и предсказание взаимодействий (см. [44]).

Во втором случае декомпозиции вместо вершины v_k вводятся две вершины v_k' и v_k'' , первая из которых связана только с первой подсистемой, а вторая — только со второй. Это соответствует тому, что вместо одного ограничения $\varphi_{k1}(x_i) + \varphi_{k2}(x_i) \leq u_k$ (u_k — количество ресурсов к v_k) на ресурсы типа k вводится два независимых ограничения: $\varphi_{k1}(x_i) \leq u_k'$ и $\varphi_{k2}(x_i) \leq u_k''$, где u_k' и u_k'' соответствует v_k' и v_k'' . Здесь необходимым (а иногда и достаточным) условием согласованности является выполнение равенства $u_k' + u_k'' = u_k$.

Формальными способами воздействия координирующего органа на подсистемы являются: распределение ресурсов и плата за ресурсы.

Таким образом, после решения задач 1—4 с помощью двух рассмотренных принципов декомпозиции производится разрыв связей и выбор способов координации.

Не уменьшая общности дальнейших рассуждений, рассмотрим ради простоты матричную модель организации, описываемую системой линейных ограничений

$$Ax \leq u, \quad x \geq 0, \quad (2.101)$$

где A — матрица, а x и u — вектор-столбцы, с критерием

$$cx \rightarrow \max, \quad (2.102)$$

где c — вектор-строка.

Рассмотрим квазиблочную матрицу

$$\left| \begin{array}{|c|c|c|} \hline A_1 & A_i & 0 \\ \hline & a_{ki} & A_k \\ \hline 0 & & A_2 \\ \hline \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} X_1 \\ x_i \\ X_2 \end{array} \right| \leq \left| \begin{array}{c} U_1 \\ U_k \\ U_2 \end{array} \right|, \quad (2.103)$$

где A_1 и A_2 — подматрицы матрицы A ; A_i , X_1 , X_2 , U_1 , U_2 — вектор-столбцы; A_k — вектор-строка.

Для того, чтобы матрица A распалась на две независимые подматрицы (на независимые подсистемы), можно воспользоваться одним из методов декомпозиции, рассмотренным выше.

Если целесообразно объединить подразделение синтезируемой структуры в соответствии с типом используемых ими ресурсов (т. е. по функциональному признаку), применяется разложение переменной x_i на x'_i и x''_i . Получаются две независимые подсистемы. Первая подсистема оптимизирует X_1 и x'_i при ограничениях

$$\left| \begin{array}{c|c} A_1 & A_i \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} X_1 \\ x'_i \end{array} \right| \leq U_1,$$

а вторая — X_2 и x''_i при ограничениях

$$\left| \begin{array}{c|c} a_{ki} & A_k \\ \hline 0 & A_2 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} x''_i \\ X_2 \end{array} \right| \leq \left| \begin{array}{c} u_k \\ U_2 \end{array} \right|.$$

Координирующий орган воздействует на подсистемы таким образом, чтобы $x'_i - x''_i \rightarrow 0$ [44]. Аналогично производится разложение графа по переменным U_1 , U_2 .

Возможно другое разделение матрицы, при котором подразделения объединяются в соответствии с направлением их работ (т. е. по линейному или тематическому признаку). В этом случае также образуются независимые подсистемы; первая подсистема оптимизирует X_1 , x_i при ограничениях

$$\left| \begin{array}{c|c} A_1 & A_i \\ \hline 0 & a_{ki} \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} X_1 \\ x_i \end{array} \right| \leq \left| \begin{array}{c} U_1 \\ u_k \end{array} \right|,$$

а вторая X_2 — при ограничениях

$$\left| \begin{array}{c} A_k \\ \hline A_2 \end{array} \right| \left| X_2 \right| \leq \left| \begin{array}{c} u_k \\ U_2 \end{array} \right|.$$

При этом координирующий орган регулирует значения u'_k , u''_k таким образом, чтобы оптимальные решения, полученные подсистемами, были оптимальными и для организации в целом и чтобы при этом выполнялось условие $u'_k + u''_k = u_k$. Такой метод декомпозиции используется, например, в работе [44]. В общем случае проводится разложение графа Γ по ресурсным вершинам.

ВЫБОР ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУР ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

§ 3.1. Введение

В данной главе приведены результаты исследований, являющиеся дальнейшим развитием методов синтеза структуры автоматизированных информационно-управляющих систем, рассмотренных в предыдущих главах, применительно к синтезу структуры АСУ летательными аппаратами [3, 37, 65, 66, 72].

Современные автоматизированные системы управления летательными аппаратами (АСУ ЛА) представляют собой сложные, иерархические, распределенные по территории, многофункциональные и многоконтурные комплексы с развитыми средствами связи между управляющими узлами. Проблема синтеза структуры подобных систем включает выбор алгоритмов реализации функций управления; выбор комплекса технических средств, обеспечивающих выполнение функций управления с учетом пространственного размещения комплекса и доступности узлов; распределение множества выполняемых функций по узлам системы с учетом взаимосвязи по технологии обработки информации и управления. При этом должны быть выполнены требования к качеству управления в системе.

Задача состоит в рациональном отображении множества взаимосвязанных функций, выполняемых системой управления, на множество взаимосвязанных узлов с соответствующими техническими средствами [70] с учетом затрат на создание или реконструкцию системы, затрат на эксплуатацию и функционирование, требований оперативности управления и надежности технических средств и других характеристик.

При синтезе структуры подобных систем возникают задачи распределения функций между бортовым управляющим комплексом и остальными узлами системы, выбора технических средств и каналов связи с учетом различных технико-экономических характеристик системы: затрат на создание и эксплуатацию; оперативности, характеризующейся длительностью выполнения цикла управления; надежности; веса и энергопотребления бортовой аппаратуры; загрузки узлов и др.

Для решения данных проблем разработан комплекс моделей и алгоритмов последовательного синтеза структуры системы (рис. 3.1) [37]. Разработанный комплекс моделей и алгоритмов позволяет определить: оптимальное число и размещение узлов управления с учетом таких характеристик, как затраты на их органи-

зацию, доступность объектов пунктами управления, глобальность управления и др.; необходимые мероприятия для обеспечения требуемой живучести системы с учетом затрат и заданных вероятностей неблагоприятных внешних воздействий; оптимальное распределение функций для совокупности взаимосвязанных подсистем по заданному множеству возможных уровней и узлов системы с учетом затрат на оснащение узлов аппаратурой и ее эксплуатацию, оперативности, загрузки аппаратуры узлов, веса и энергопотребления бортовой аппаратуры.

На первом этапе (рис. 3.1) определяется число и расположение узлов управления, а также состав узлов, управляющих объектами различных классов. При этом минимизируются затраты на организацию узлов с учетом доступности объектов узлами управления, глобальности управления и ряда других требований (§ 3.2).

На втором этапе определяются варианты построения узлов и связей между ними, исходя из требований к живучести системы управления, при этом минимизируются затраты на обеспечение живучести системы с учетом заданных вероятностей неблагоприятных внешних воздействий и возможных защитных мероприятий, уточняется состав узлов, управляющих объектами различных классов (§ 3.2).

Первые два этапа позволяют выбрать топологическую структуру системы.

На третьем этапе определяется функциональная структура, т. е. оптимизируется распределение выполняемых функций и задач управления по уровням и узлам системы, а также выбирается комплекс технических средств. При этом минимизируются затраты на оснащение узлов техническими средствами и их эксплуатацию и учитываются ограничения на оперативность, аппаратурную надежность, вес и энергопотребление бортовой аппаратуры, загрузку технических средств узлов, и др. (§ 3.3).

На последующих этапах анализируется динамика работы узлов выбранного варианта структуры системы с использованием имитационной модели (см. гл. 5).

Задачи выбора оптимальных вариантов построения узлов



Рис. 3.1

системы и их размещения формализованы и решены с использованием альтернативного графа G_j узлов АСУ (см. гл. 1). Варианты распределения функций совокупности взаимосвязанных подсистем по уровням и узлам системы формализованы в виде совокупности взаимосвязанных альтернативных графов G_0 . Специфика АСУ ЛА заключается в том, что каждый путь отдельного альтернативного графа соответствует некоторому варианту построения соответствующего контура управления системы. Подграф, состоящий из набора путей альтернативных графов, задает структуру всей системы. Целевая функция минимизирует затраты (капитальные и эксплуатационные) на оснащение узлов системы аппаратурой. В качестве ограничений учитывается нагрузка технических средств узлов различных уровней, допустимый вес и энергопотребление на борту объектов различных классов, оперативность и аппаратурная надежность по различным контурам.

Для решения задач синтеза структуры предложен подход, основанный на использовании агрегированных вариантов построения отдельных контуров, которые формируются с помощью специально разработанной модели типового контура управления. Этот подход применен при разработке алгоритма решения задачи синтеза структуры с использованием схемы «ветвей и границ».

Для выбора оптимального варианта структуры типового контура управления (§ 3.4) разработаны методы и алгоритмы, позволяющие определить множество вариантов структуры системы, включающее оптимальный вариант, а также варианты, значения критерия которых отличаются от оптимального не более чем на заданную величину. Окончательный вариант структуры системы выбирается с участием экспертов.

§ 3.2. Задачи выбора вариантов построения узлов и их размещения

Задачи выбора оптимальных вариантов построения узлов системы и их размещения формализованы с использованием альтернативного графа G_j узлов АСУ ЛА. В процессе синтеза структуры АСУ ЛА при формализации графа G_j узлов системы и их взаимосвязей возникает ряд задач оптимизации.

На первом этапе решается задача определения минимальной совокупности узлов управления и их размещения, исходя из требований к глобальности системы управления и доступности узлов управления для объектов различных классов. Доступность объектов определяется в основном параметрами движения объектов и расположением узлов управления. Доступность задается матрицей $|d_{ij}|$, элементы которой $d_{ij} = 1$, если объект i -го класса доступен для j -го узла ($j = \overline{1, J}$), $d_{ij} = 0$ в противном случае. Доступность характеризуется временем τ_{ij} максимальной продолжительности сеанса связи между объектами i -го класса и j -м узлом управления ($j = \overline{1, J}$). Для объектов, связанных с узлами управ-

ления через ретранслятор, при определении величин τ_{ij} учитывается доступность объекта для ретранслятора и ретранслятора для узла управления. Предполагается, что объекты одного класса идентичны по техническим характеристикам и по параметрам движения.

Отношение общего времени τ_i ($i = \overline{1, I}$) доступности i -го класса объектов для системы управления ко времени τ нахождения объекта над заданной территорией определяет глобальность системы управления H_i для i -го класса объектов.

Задача определения состава и размещения узлов управления состоит в нахождении их минимального числа, исходя из затрат на их организацию, при выполнении требований к глобальности системы управления для заданных классов объектов, а также специальных требований к системе управления (например, до-

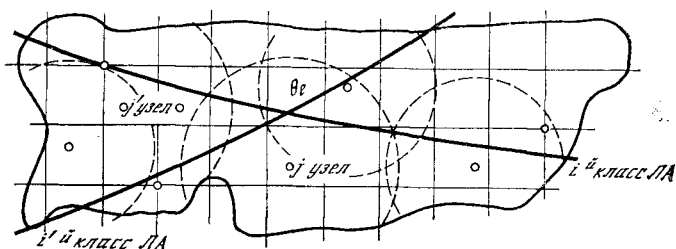


Рис. 3.2

ступность объекта не менее чем для двух узлов). В результате решения данной задачи определяется, какие узлы необходимы в системе, их размещение, а также состав узлов, управляющих объектами различных классов.

Определим, исходя из доступности объектов различных классов для $i = \overline{1, I}$ узлов управления, участки $l = \overline{1, L}$, на которых объекты доступны для соответствующих узлов управления (рис. 3.2).

Пусть L_i — множество индексов участков, на которых объекты i -го класса ($i = \overline{1, I}$) доступны для системы управления. Очевидно, что число участков для объектов i -го класса $\leq 2 |m_i|$, m_i — множество узлов, доступных для объектов i -го класса. Время доступности объекта для узла управления на l -м участке обозначим через θ_l ($l = \overline{1, L}$).

Введем переменные:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если в системе используется узел } j (j = \overline{1, J}), \\ 0 & \text{— в противном случае;} \end{cases}$$

$$y_l = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-й участок доступности используется в системе управления,} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Задача состоит в минимизации затрат на создание узлов управления

$$\min \sum_{j=1}^J c_j x_j, \quad (3.1)$$

где c_j — затраты на создание j -го узла управления ($j = \overline{1, J}$).

При ограничениях на глобальность системы управления объектами различных классов

$$\sum_{i \in I_i} \theta_i y_i \geq H_i \tau_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3.2)$$

при специальных ограничениях, например, на число узлов, необходимых для управления объектами i -го класса

$$\sum_{j \in m_i} x_j \geq k_i, \quad i = \overline{1, I}. \quad (3.3)$$

Взаимосвязь между переменными x_j и y_l задается условиями

$$\sum_{j \in n_l} x_j \geq y_l \geq \frac{1}{|n_l|} \sum_{j \in n_l} x_j, \quad l = \overline{1, L}, \quad (3.4)$$

где n_l — множество узлов, доступных на l -м участке для объектов соответствующего класса.

Рассмотренная задача (3.1) — (3.4) является линейной целочисленной задачей математического программирования, и для ее решения используется стандартное математическое обеспечение.

На втором этапе для выбранной совокупности узлов системы управления и их взаимосвязей устанавливаются варианты построения узлов и связей между ними, обеспечивающие повышение живучести системы, определяемой вероятностью выполнения системой функций управления с учетом возможных неблагоприятных внешних воздействий.

Различные варианты построения узлов и связей между ними, направленные на увеличение живучести системы, формализуются в виде альтернативного графа G_j . Для повышения живучести используются дублирование узлов и каналов связи, повышение защищенности узлов и т. д. Каждый вариант построения узлов или линий связи характеризуется затратами на их осуществление и вероятностью выхода из строя за рассматриваемый интервал времени.

Для каждого класса объектов задается минимальная совокупность узлов, функционирование которых обеспечивает выполнение заданных функций управления. Далее предполагается, что такой совокупностью являются элементы связи, соединяющей объект с центром управления. Типовая схема управления объектами i -го класса $i = \overline{1, I}$ приведена на рис. 3.3.

Задача определения вариантов построения узлов и связей между ними состоит в минимизации затрат на мероприятия, обеспеченные

печивающие выполнение системой функций управления, при ограничениях, характеризующих живучесть системы управления для различных классов объектов.

Для формализации задачи обозначим через P_{ik} ($k = \overline{1, K_i}, i = \overline{1, I}$), P_{jk} ($k = \overline{1, K_j}, j = \overline{1, J}$), P_{Rk} ($k = \overline{1, K_r}$) вероятности надежной работы соответственно k -го варианта построения i -го объекта, j -го узла системы либо R -го ретранслятора за рассматриваемый интервал времени с учетом неблагоприятных внешних воздействий; индекс $j = 0$ соответствует центральному узлу управления, а индексы $j = \overline{1, J}$ — совокупности наземных узлов управления; P_{ijk} , P_{iRk} , P_{Rjk} , P_{jok} — вероятности успешной работы вариантов построения каналов связи соответственно между объектом и наземным узлом управления, объектом и ретрансляторами, ретрансляторами и наземным узлом управления, наземным узлом управления и центром за рассматриваемый интервал времени с учетом неблагоприятных воздействий; c_{ik} , c_{jk} , c_{Rk} , c_{ijk} , c_{iRk} , c_{Rjk} , c_{jok} — затраты на организацию вариантов построения объектов, ретрансляторов, центра и каналов связи, наземных узлов управления.

На альтернативном графе G_J вариантов построения узлов системы и их взаимосвязей выделяются последовательные участки, определяются агрегированные варианты построения выделенных участков и их характеристики. При этом из графа G_J исключаются агрегированные варианты участков, над которыми доминируют оставшиеся. Поэтому при формализации задачи далее используются агрегированные варианты для последовательных участков.

Введем переменные: $x_{ik} = 1$, если выбирается k -й вариант построения i -го объекта; $x_{jk} = 1$, если выбирается k -й вариант построения j -го узла; $x_{Rk} = 1$, если выбирается k -й вариант построения ретранслятора; $x_{imk} = 1$, если выбирается k -й вариант связи соответственно между элементами i и j , i и R , R и j , j и 0 ; $x_{ik} = x_{jk} = x_{Rk} = x_{imk} = 0$ — в противном случае. Задача выбора вариантов построения элементов графа G_J состоит в минимизации затрат

$$\min \left(\sum_{\alpha} \sum_k c_{\alpha k} x_{\alpha k} + \sum_{\beta} \sum_k c_{\beta k} x_{\beta k} \right) \quad (3.5)$$

при ограничениях

$$P_{i0}(x_{ik}, x_{0k}) [P_{Rk}(x_{Rk}, x_{iRk})(1 - P_{ijk}(x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk})) + (1 - P_{Rk} \times \\ \times (x_{Rk}, x_{iRk}))(1 - P_{ij}(x_{ijk}, x_{jk}))] \geq P_{i_i}^{\text{доп}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3.6)$$

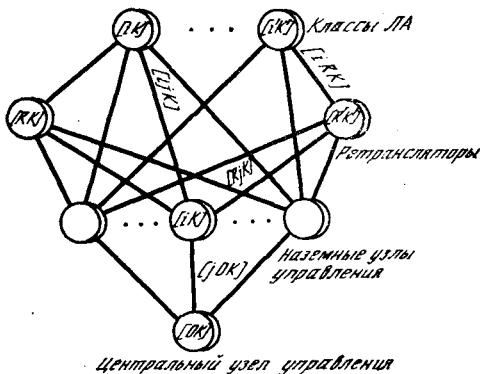


Рис. 3.3

$$\sum_k x_{\alpha k} = 1, \quad \alpha = i, j, R; \quad (3.7)$$

$$\sum_k x_{\beta k} = 1, \quad \beta = \{iR, ij, jR, j0\}, \quad (3.8)$$

где $P_{Rk}(x_{Rk}, x_{iRk}) = \left(\sum_k P_{Rk} x_{Rk}\right) \left(\sum_k P_{iRk} x_{iRk}\right)$;

$$P_{ijk}(x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk}) = \prod_j \left[1 - \left(1 - \sum_k P_{ijk} x_{ijk}\right) \left(1 - \sum_k P_{Rjk} x_{Rjk}\right) \times \right. \\ \left. \times \left(\sum_k P_{jk} x_{jk}\right)\right]; \quad P_{ik}(x_{ik}, x_{0k}) = \left(\sum_k P_{ik} x_{ik}\right) \left(\sum_k P_{0k} x_{0k}\right);$$

$$P_{ij}(x_{ijk}, x_{jk}) = \prod_j \left[1 - \left(\sum_k P_{ijk} x_{ijk}\right) \left(\sum_k P_{jk} x_{jk}\right)\right].$$

Выражение (3.6) получено с использованием метода разложения относительно особого элемента.

Для решения задачи разработан алгоритм, основанный на схеме «ветвей и границ». На первом этапе работы алгоритма исключаются варианты на последовательных участках с учетом правил доминирования и формируются агрегированные варианты. Затем исключаются варианты, заведомо не входящие в оптимальное решение, для этого на отдельных участках вычисляются максимально возможные вероятности их исправной работы. В (3.6) во всех сомножителях участков, кроме одного, варианты части заменяются на вычисленные максимально возможные вероятности исправной работы участков. В незафиксированном участке последовательно анализируются и исключаются варианты, использование которых не удовлетворяет (3.6). На втором этапе работы алгоритма осуществляется ветвление по сформулированным вариантам построения отдельных участков системы. При этом число уровней ветвления равно суммарному числу отдельных участков системы. Оценки (3.5) в процессе ветвления находятся следующим образом: для зафиксированных вариантов выбираются соответствующие величины, а для незафиксированных переменных — минимально возможные затраты на соответствующих участках. Оценки для (3.6) вычисляются аналогично, однако используются максимально возможные вероятности исправной работы для незафиксированных участков.

При исследовании систем с более сложными взаимосвязями между элементами выразить аналитически параметры системы через параметры элементов обычно не удается, поэтому в этом случае для получения оценок живучести используются методы «критических путей и сечений» [49, 64].

§ 3.3. Оптимизация распределения задач для совокупности взаимосвязанных подсистем (выбор функциональной структуры системы)

Для найденного множества узлов управления, работающих с объектами различных классов, и заданных функций управления по каждому классу объектов определяется оптимальное распреде-

ление задач взаимосвязанных подсистем по уровням и узлам системы и выбирается состав комплекса технических средств. Функции управления задаются в виде множества задач, выполняемых различными подсистемами (контурами) управления. Для объектов различных классов задаются варианты реализации задач, выполняемых подсистемами, и их распределения по уровням и узлам системы (рис. 3.4). Необходимо так распределить задачи по уровням и узлам системы и выбрать такой набор технических средств, чтобы минимизировались затраты на оснащение узлов техническими средствами и их эксплуатацию при выполнении ограничений по оперативности, аппаратурной надежности выполнения задач контуров управления, массе и энергопотреблению бортовой аппаратуры, загрузке узлов и др.

Варианты распределения функций и задач по уровням и узлам системы формализуются в виде совокупности взаимосвязанных альтернативных графов G_0 . Специфика АСУ ЛА заключается в том, что каждый путь отдельного альтернативного графа соответствует некоторому варианту построения соответствующего контура управления системы [72]. Подграф, состоящий из набора путей альтернативных графов, задает структуру всей системы.

В общем случае задача распределения функций и комплекса технических средств по уровням и узлам системы формулируется в следующем виде. Пусть Π_{im} — путь альтернативного графа G_0 вариантов построения m -го ($m = \overline{1, M}$) контура управления для i -го класса объектов ($i = \overline{1, I}$). Обозначим через F_0 целевую функцию, значение которой определяется выбранной совокупностью вариантов построения отдельных контуров, т. е. $F_0(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_M)$; $F_\alpha(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_M) \leq B_\alpha$ — ограничения для всех контуров объектов ($\alpha = \overline{1, \alpha_0}$); $F_\beta(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_M) \leq B_\beta$ — ограничения по совокупности контуров одного объекта $\beta = \overline{1, \beta_0}$; $F_\gamma(\Pi_{im}) \leq B_\gamma$ — ограничения по отдельным контурам ($\gamma = \overline{1, \gamma_0}$).

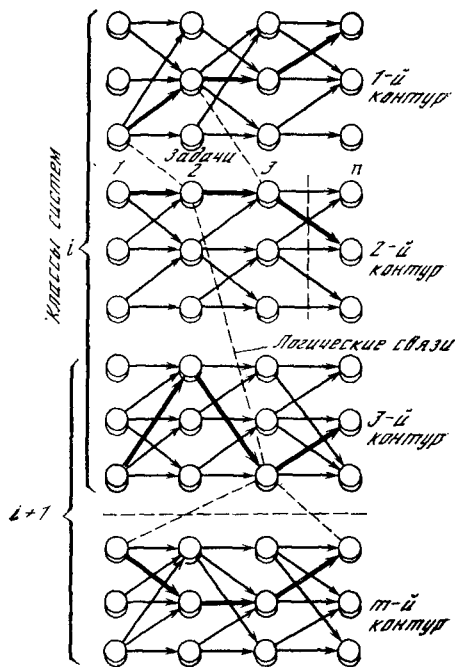


Рис. 3.4

Тогда задача синтеза оптимальной структуры АСУ ЛА запишется в виде

$$\text{extr } F_0 (\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{IM}), \quad (3.9)$$

$$F_\alpha (\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{IM}) \leq B_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, \alpha_0}; \quad (3.10)$$

$$F_\beta (\Pi_1, \dots, \Pi_{im}) \leq B_{i\beta}, \quad \beta = \overline{1, \beta_0}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (3.11)$$

$$F_\gamma (\Pi_{im}) \leq B_{\gamma im}, \quad \gamma = \overline{1, \gamma_0}, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (3.12)$$

$$\Pi_{im} \in G_0. \quad (3.13)$$

В решавшихся практических задачах минимизировались затраты (капитальные и эксплуатационные) на оснащение узлов системы аппаратурой. В качестве ограничений (3.10) выступала загрузка технических средств узлов различных уровней, в качестве ограничений (3.11) — допустимая масса и энергопотребление на борту объектов различных классов, в качестве ограничений (3.12) — оперативность и аппаратурная надежность по различным контурам. Условия (3.13) учитывают взаимосвязи логического типа.

Введем переменную $x_{nku}^{im} = 1$, если k -й вариант n -й задачи m -го контура управления i -го объекта выполняется на u -м уровне, и $x_{nku}^{im} = 0$ — в противном случае. Совокупность индексов $\{imnku\}$ однозначно определяет тип используемых средств l ($l = \overline{1, L}$). Пусть y_{lju} — целочисленная переменная, равная числу комплексов аппаратуры l -го типа, используемой в j -м узле на u -м уровне. Переменные y_{lju} однозначно определяются выбранной совокупностью переменных x_{nku}^{im} . Пусть также λ^{im} — частота выполнения задач m -го контура i -го объекта; t_{nku}^{im} — время выполнения k -го варианта n -й задачи m -го контура управления i -го объекта на u -м уровне; ρ_{lu} — допустимая загрузка технических средств l -го типа на u -м уровне.

Очевидно, что

$$\sum_{imnk} \lambda^{im} t_{nku}^{im} x_{nku}^{im} \leq \rho_{lu} y_{lju}, \quad l = \overline{1, L}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (3.14)$$

С учетом введенных переменных рассматриваемая задача формализована как нелинейная задача математического программирования с целочисленными переменными. Детальная постановка задачи для отдельного контура управления и методы ее решения рассмотрены в [3] и следующем параграфе.

Поскольку в оптимальное решение входит лишь один из возможных путей каждого альтернативного графа варианта построения контуров управления, перейдем от переменных x_{nku}^{im} к агрегированным переменным $x_{im}^\mu = 1$, если для построения m -го контура управления i -го объекта выбирается μ -й вариант (μ -й путь на альтернативном графе G_0) и $x_{im}^\mu = 0$ — в противном

случае. Очевидно, что

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} x_{im}^{\mu} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (3.15)$$

Для характеристик вариантов построения контуров введем обозначения: t_{mi}^{μ} — оперативность; R_{mi}^{μ} — аппаратурная надежность; P_{mi}^{μ} — масса бортовой аппаратуры; E_{mi}^{μ} — энергопотребление бортовой аппаратуры; b_{mi}^{μ} — затраты на эксплуатацию аппаратуры; ρ_{kimj}^{μ} — загрузка технических средств l -го типа j -го узла в μ -м варианте построения контура (mi). Данные характеристики определяются через введенные выше характеристики для отдельных задач, выполняемых контурами управления. Для определения характеристик и выделения вариантов построения отдельных контуров управления используется алгоритм оптимизации структуры типового контура управления, рассмотренный в [3].

Переменная y_{lju} равна числу комплексов аппаратуры l -го типа, которой оснащается узел j ($j = \overline{1, J}$) на u -м уровне ($u = \overline{1, u_0}$), и однозначно определяется выбранной совокупностью вариантов построения контуров управления (набором переменных x_{mi}^{μ}).

С учетом введенных обозначений и переменных задача (3.9) — (3.13) запишется в виде

$$\min \left(\sum_{l, j, u} c_{lj} y_{lju} + \sum_{m, i, \mu} b_{mi}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \right); \quad (3.16)$$

$$\sum_{mi} \left(\sum_{\mu=1}^{\mu_0} \rho_{mitu}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \right) \leq y_{lju} \rho_l, \quad l = \overline{1, L}, \quad j = \overline{1, J}, \quad u = \overline{1, u_0}; \quad (3.17)$$

$$\sum_{l=1}^L P_l y_{lj'u} \leq P_{j'u}^{\text{доп}} \quad \text{для заданных } (j'u'); \quad (3.18)$$

$$\sum_{l=1}^L E_l y_{lj'u} \leq E_{j'u}^{\text{доп}} \quad \text{для заданных } (j'u'); \quad (3.19)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} t_{mi}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \leq t_{mi}^{\text{доп}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (3.20)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} \ln R_{mi}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \geq \ln R_{mi}^{\text{доп}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (3.21)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} x_{mi}^{\mu} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (3.22)$$

$$\prod_{\mu'm'i' \in V_{mi}^{\mu}} (x_{m'i'}^{\mu} - 1) x_{mi}^{\mu} = 0 \quad \text{для заданных } (\mu'm'i'); \quad (3.23)$$

$$\sum_{\mu'm'i' \in W_{mi}^{\mu}} (x_{m'i'}^{\mu} - 1) x_{mi}^{\mu} = 0 \quad \text{для заданных } (\mu'm'i'). \quad (3.24)$$

В (3.16) первое слагаемое учитывает затраты на оснащение узлов аппаратурой, приведенные к соответствующей единице времени с учетом нормативных коэффициентов, а второе слагаемое — затраты на эксплуатацию аппаратуры. В (3.17) ρ_l — допустимая загрузка одного комплекта аппаратуры l -го типа. В (3.18)—(3.21) $\rho_{ju}^{\text{доп}}$, $E_{ju}^{\text{доп}}$, $t_{mi}^{\text{доп}}$, $R_{mi}^{\text{доп}}$ — соответственно допустимые величины массы, энергопотребления, оперативности и аппаратурной надежности. Ограничения (3.23) и (3.24) учитывают логические взаимосвязи между вариантами построения контуров типа «И» и «ИЛИ»: V_{mi}^{μ} — множество индексов вариантов, которые должны быть выбраны, если выбирается μ -й вариант m -го контура i -го класса объектов, а W_{mi}^{μ} — множество индексов вариантов, среди которых будет выбран один, если выбирается μ -й вариант m -го контура i -го класса объектов. В ограничениях (3.18) и (3.19) индекс l относится лишь к бортовым средствам. Ограничение (3.17) может быть записано в виде

$$\sum_{mi} \left(\sum_{\mu} (\rho_{milju}^{\mu} / \rho_l) x_{mi}^{\mu} \right) \leq y_{lju}, \quad l = \overline{1, L}, \quad j = \overline{1, J}, \quad u = \overline{1, u_0}.$$

Обозначим $\rho_{milju}^{\mu} / \rho_l = \bar{\rho}_{milju}^{\mu}$, тогда

$$\sum_{mi} \left(\sum_{\mu} \bar{\rho}_{milju}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \right) \leq y_{lju}, \quad l = \overline{1, L}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (3.25)$$

Для решения задачи (3.16)—(3.25) разработан алгоритм, использующий схему «ветвей» и «границ» и локальной оптимизации. На первом этапе работы алгоритма перечисляются возможные варианты построения отдельных контуров управления и исключаются варианты, недопустимые по локальным ограничениям контуров (по оперативности выполнения задач контура и аппаратурной надежности). Вычисляются агрегированные характеристики вариантов. Затем исключаются недопустимые комбинации вариантов по общим для отдельных классов объектов ограничениям (массе и энергопотреблению бортовой аппаратуры). Для этого в каждом из контуров, кроме одного, относящегося к некоторому классу объектов, выбираются варианты с минимальным значением соответствующих параметров, а в одном из контуров последовательно перебираются все варианты. Варианты данного контура, не удовлетворяющие общим ограничениям, отбрасываются. Эта же процедура выполняется и в процессе ветвления задачи после фиксации вариантов, в которых задачи выполняются на борту объектов.

Ветвление осуществляется по допустимым вариантам построения отдельных контуров управления (по допустимым путям альтернативных графов распределения функций по уровням управления G_{mi} , $i = \overline{1, I}$, $m = \overline{1, m_i}$). При этом число уровней ветвления не превосходит IM , а число вариантов при ветвлении в вершинах различных уровней в реальных задачах не превосходило 100.

Оценка для целевой функции (3.16) определяется соотношением

$$\sum_{mi} \min_{\mu \in \{mi\}} \left\{ \sum_{ij} c_{ij} \bar{\rho}_{miij}^{\mu} + b_{mi}^{\mu} \right\}.$$

Оценка на h -м шаге ветвления вычисляется следующим образом:

$$\sum_{ij} c_{ij} y_{ij}^h + \sum_{\{mi\}_h} b_{mi}^{\mu_h} + \sum_{mi \in \{mi\}_h} \min_{ij} \left\{ \left(\sum_{ij} \bar{c}_{ij}^h \rho_{miij}^{\mu} \right) + b_{mi}^{\mu} \right\}, \quad (3.26)$$

где первые два слагаемых учитывают затраты для зафиксированных к h -му шагу ветвления вариантов построения контуров, а оставшаяся часть учитывает затраты на варианты построения контуров, не зафиксированных к h -му шагу ветвления; здесь $\mu_h \in \{mi\}_h$ — зафиксированный вариант, принадлежащий множеству $\{mi\}_h$ зафиксированных вариантов к h -му шагу;

$$y_{ij}^h = \left[\sum \bar{\rho}_{miij}^{\mu} \right]^+, \quad [\cdot]^+$$

— ближайшее большее по абсолютной величине целое число; $\bar{c}_i^h = c_{ij}$, если $y_{ij}^h = 0$, либо $y_{ij}^h > 0$ и $\sum_{mi \in \{mi\}_h} \min \rho_{miij}^{\mu} \geq y_{ij}^h - \sum \bar{\rho}_{miij}^{\mu}$;

в противном случае $\bar{c}_i^h = 0$. В процессе ветвления учитываются ограничения (3.17)–(3.24). Если на h -м шаге ветвления для условия (3.18) имеем

$$\sum_{mi \in \{mi\}_h} \min_{\mu} P_{ij}^{\mu} + \sum P_{ij} > P_j^{\text{доп}}, \quad j = \overline{1, J},$$

то данная вершина исключается из дерева ветвления. Аналогичные соотношения проверяются для условия (3.19).

Логические ограничения (3.23) и (3.24) учитываются в процессе ветвления.

Выделение множества перспективных вариантов (D) построения отдельных контуров управления целесообразно выполнять на ЦВМ, если их число не превосходит 10^4 , либо с помощью алгоритма, рассмотренного в § 3.4 при большем числе вариантов.

При выделении множества перспективных вариантов построения отдельных контуров затраты на специализированные технические средства (используемые только для выполнения задач данного контура) учитываются полностью, а в затраты на универсальные технические средства включается лишь их часть, пропорциональная нагрузке задачами этих средств данного контура.

Пусть $\bar{c}_{mi} = \min_{\mu} c_{mi}^{\mu}$ и $c_{\text{сист}}$ — величина критерия (3.16) задачи (3.16)–(3.24), полученная на сочетании выделенных вариантов D для отдельных контуров. Тогда значение критерия (3.16) для оптимального решения c^* удовлетворяет соотношению

$$\sum_{mi} \bar{c}_{mi} \leq c^* \leq c_{\text{сист}}. \quad (3.27)$$

Если число вариантов построения контуров управления существенно превосходит 10^2 , то точное решение задачи затруднено из-за большой размерности массивов исходной информации и времени решения. Неравенство (3.27) позволяет оценить близость полученных решений к оптимальному по значению целевой функции. Полученное решение может быть улучшено с помощью итеративной процедуры локальной оптимизации. Для этого с помощью алгоритма оптимизации структуры типового контура управления (§ 3.4) решается задача минимизации (3.16) для каждого контура. Если в результате решения окажется, что используемые технические средства рассматриваемого контура применяются также в полученных решениях для других контуров управления и их загрузка позволяет выполнить функции данного контура, то при локальной оптимизации рассматриваемого контура стоимость их принимается равной нулю. На выделенных таким образом множества вариантов построения контуров вновь решается задача (3.16)—(3.24). В результате получается несколько вариантов решений, среди которых выбирается наилучший.

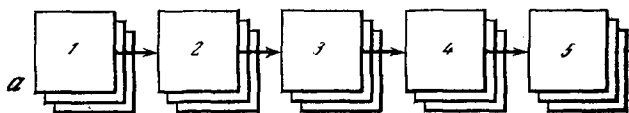
§ 3.4. Синтез структуры типовой подсистемы управления

АСУ ЛА состоит из ряда подсистем, к числу которых относятся: подсистема управления навигационными параметрами движения, подсистема контроля функциональной готовности бортового технического комплекса, подсистема телеметрии и др.

Типовая подсистема управления предназначена для выполнения последовательности взаимосвязанных функций (задач) ($i = \overline{1, I}$) по измерению, передаче и обработке информации о совокупности контролируемых параметров ЛА, выработке управляющих воздействий и контроле за их реализацией.

На рис. 3.5, а показаны основные функции, выполняемые подсистемой управления (на примере подсистемы управления центром масс ЛА) и совокупность узлов системы (рис. 3.5, б), в которых могут осуществляться эти функции ($j = \overline{1, J}$). На рис. 3.5 приняты следующие обозначения: 1 — измерение навигационных параметров и приведение к единой шкале времени; 2 — предварительная математическая обработка измерений; 3 — определение параметров орбиты; 4 — расчет установок на проведение динамических операций; 5 — преобразование командной информации и передача ее на борт ЛА.

При проектировании подсистем управления АСУ ЛА требуется распределить функции между бортовым управляющим комплексом и остальными узлами системы, выбрать способ реализации задач ($k = \overline{1, k_i}$), типы технических средств в узлах системы. ($l = \overline{1, L}$) и вариант каналов связи между узлами. При этом должны учитываться технико-экономические характеристики системы такие, как затраты на создание K и эксплуатацию C , оперативность, которая характеризует длительность выполнения цикла



управления T , надежность системы R , вес P и энергопотребление бортовой аппаратуры.

Для формализации задачи введем переменные: $x_{ikjl} = 1$, если i -я задача решается по k -му варианту в j -м узле при помощи l -го технического средства; $x_{jl} = 1$, если j -й узел оборудуется l -м техническим средством; $x_{jj'} = 1$, если необходимо создать канал связи между узлами j и j' ; $x_{ikjl} = x_{jl} = x_{jj'} = 0$ в противном случае.

Тот факт, что каждый вариант построения должен включать в себя лишь один способ

распределения задач по узлам системы и один способ выполнения каждой задачи, учитывает ограничение

$$\sum_{kjl} x_{ikjl} = 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (3.28)$$

Переменные x_{jl} и $x_{jj'}$ зависят от x_{ikjl} и используются для удобства записи аналитических выражений расчета различных характеристик вариантов структуры АСУ:

$$x_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{ik} x_{ikjl} \geq 1, \\ 0 & \text{если } \sum_{ik} x_{ikjl} = 0; \end{cases}$$

$$x_{jj'} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{iki'k'} x_{ikjl} x_{i'k'j'l'} \geq 1, \\ 0, & \text{если } \sum_{iki'k'} x_{ikjl} x_{i'k'j'l'} = 0. \end{cases}$$

Используя введенные обозначения (табл. 3.1), выпишем формулы для определения характеристик вариантов.

Капитальные затраты K включают в себя стоимость технических средств в узлах системы, стоимость создания каналов связи между узлами системы, затраты на разработку алгоритмов выполнения задач:

$$K = \sum_{ij} K_{ij} x_{jl} + \sum_{jj'} K_{jj'} x_{jj'} + \sum_{ikjl} K_{ikj} x_{ikjl}. \quad (3.29)$$

Эксплуатационные затраты C включают эксплуатационные затраты на выполнение задач управления и затраты на передачу

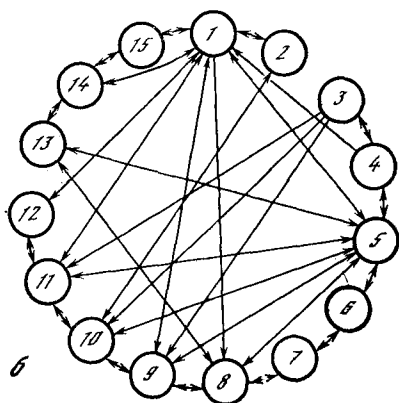


Рис. 3.5

Таблица 3.1

| Обозначение | Наименование |
|-----------------|---|
| K_l | Стоимость технического средства l либо затраты на разработку и изготовление перспективных средств |
| $K_{jj'}$ | Стоимость создания канала связи, включающая стоимость технических средств приема и передачи информации между узлами j и j' |
| K_{ikj} | Затраты на разработку информационного и математического обеспечения решения i -й задачи в k -м варианте в j -м узле системы |
| C_{ikj} | Эксплуатационные затраты на решение i -й задачи в k -м варианте в j -м узле |
| $C_{ij(i+1)j'}$ | Затраты на передачу информации от i -й задачи, решаемой в j -м узле, к $(i+1)$ -й задаче, решаемой в j' -м узле |
| t_{ikj} | Время решения i -й задачи k -м способом в j -м узле |
| $t_{ij(j+1)j'}$ | Время передачи информации от ij к $(i+1)j'$ |
| R_{ikj} | Надежность решения задачи (технического средства) |
| $R_{ij(i+1)j'}$ | Надежность передачи информации (канала связи) |
| P_l | Вес технического средства l |
| E_l | Энергопотребление технического средства l |

информации между узлами системы:

$$C = \sum_{ikjl} C_{ikj} x_{ikjl} + \sum_{ikjl} C_{ij(i+1)j'} x_{ij(i+1)j'}. \quad (3.30)$$

Время выполнения цикла, характеризующее оперативность управления, вычисляется аналогично:

$$T = \sum_{ikjl} t_{ikj} x_{ikjl} + \sum_{ikjl} t_{ij(i+1)j'} x_{ij(i+1)j'}. \quad (3.31)$$

Надежность системы равна произведению показателей надежности элементов, используемых при выполнении задач цикла управления:

$$\bar{R} = \sum_{ikjl} \bar{R}_{ikj} x_{ikjl} + \sum_{ikjl} \bar{R}_{ij(i+1)j'} x_{ij(i+1)j'}, \quad (3.32)$$

где \bar{R} , \bar{R}_{ikj} , $\bar{R}_{ij(i+1)j'}$ обозначают логарифмы соответствующих величин. Вес и энергопотребление технических средств в узлах системы

$$P_j = \sum_{ikl} P_l x_{ikjl}, \quad j \in J_p; \quad E_j = \sum_{ikl} E_l x_{ikjl}, \quad j \in J_E. \quad (3.33)$$

Исходную задачу оптимизации структуры типовой подсистемы управления запишем в следующем общем виде:

$$F_0(x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'}) \rightarrow \min; \quad (3.34)$$

$$F_\eta(x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'}) \leq B_\eta, \eta = \overline{1, \eta_0}; \quad (3.35)$$

$$\sum_{kjl} x_{ikjl} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3.36)$$

где функция F_η $\eta = \overline{0, \eta_0}$ имеет вид

$$F_\eta(x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'}) = \sum_{ikjl} a_{ikj}^\eta x_{ikjl} + \sum_{ikjl} b_{ij(i+1)j'}^\eta x_{ikjl} x_{(i+1)k'j'l'} + \\ + \sum_{ij} C_l^\eta x_{lj} + \sum_{jj'} d_{jj'}^\eta x_{jj'}. \quad (3.37)$$

В [3] предложен метод поиска множества вариантов структуры системы, содержащего не более заданного числа вариантов n , отличающихся от наилучшего по оптимизируемому критерию не более чем на δ , удовлетворяющих ограничениям задачи и принадлежащих множеству Парето по всей совокупности рассматриваемых характеристик. Множество вариантов, обладающих перечисленными свойствами, обозначим через D_n^δ . Сравнение и выбор на множестве D_n^δ наиболее предпочтительного варианта структуры системы проводится с привлечением экспертов.

Заметим, что при $n = 1$ или $\delta = 0$ задача сводится к экстремальной задаче (3.34)–(3.37). Задача поиска D_n^δ является более общей и соответственно более трудной, однако схема «ветвей и границ», которая используется в дальнейшем, позволяет определить искомое множество D_n^δ .

Сетевое представление задачи. Метод решения задачи (3.34) – (3.37) основан на представлении вариантов построения системы управления в виде последовательного графа возможных реализаций системы $G = (X, \Gamma)$ (рис. 3.6).

Множество X вершин графа состоит из I непересекающихся подмножеств $X_i, i = \overline{1, I}$. Множество X_i соответствует различным вариантам реализации i -й задачи $k = \overline{1, K_i}$ и возможному распределению этих вариантов по узлам системы $j = \overline{1, J}$. X_i упорядочены в соответствии со схемой выполнения задач.

Отображение Γ задается матрицей смежности весов графа $B = |b_{ij(i+1)j'}|$. Смежными являются лишь вершины, принадлежащие множествам X_i и X_{i+1} .

Произвольный путь $\Pi_{0, n+1}$, связывающий миноранту графа i_0 с его мажорантой i_{n+1} , является простой цепью фиксированной длины $n + 1$ и включает в себя, кроме i_0 и i_{n+1} n вершин, по одной вершине из каждого множества X_i . Так как ограничение (3.36) при этом выполняется автоматически, каждый путь соответствует некоторому варианту построения системы. Таким образом, задача выбора оптимального варианта построения системы эквивалент-

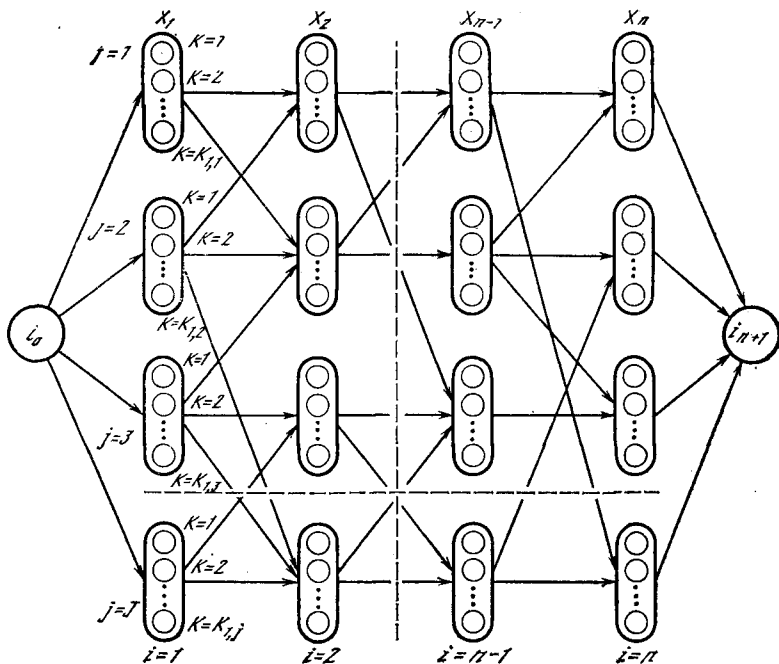


Рис. 3.6

на задаче выбора экстремального пути на графе G , удовлетворяющем ограничению (3.35)–(3.37).

Будем говорить, что на графе G задана функция, если каждому простому пути $\Pi_{a,b}$, соединяющему вершины a и b , можно поставить в соответствие некоторое число $d(\Pi_{a,b})$, называемое обобщенной длиной пути $\Pi_{a,b}$.

Задача (3.34)–(3.37) в сетевой интерпретации формулируется следующим образом: найти путь $\Pi_{0,n+1}$ на графе G , имеющий минимальную длину при $\eta = 0$ ($d_0(\Pi_{0,n+1})$) и ограниченные длины для $\eta = 1$, η_0 , $d_\eta(\Pi_{0,n+1}) \leq B_\eta$.

Введем понятие прямого и обратного потенциалов вершин графа G . Прямым потенциалом вершины a относительно вершины b и функции F_η будем называть величину $u_{a,b}^{F_\eta} = \min_{(\Pi_{a,b})} d_\eta(\Pi_{a,b})$.

Обратным потенциалом вершины a относительно вершины b и функции F_η будем называть величину $w_{a,b}^{F_\eta} = \min_{(\Pi_{a,b})} d_\eta(\Pi_{a,b})$.

Тогда для прямого и обратного потенциалов справедливы следующие свойства:

1) $u_{a,b}^{F_\eta} = w_{b,a}^{F_\eta}$, что непосредственно следует из определения прямого и обратного потенциала;

$$2) u_{bca}^{F_\eta} = \min_{(\Pi_{abc})} d_\eta(\Pi_{abc}) \leq u_{ca}^{F_\eta} + w_{cb}^{F_\eta},$$

так как длина минимального пути, связывающего вершины a и b , меньше либо равна сумме длин его частей;

$$3) u_{bca}^{F'_\eta} = u_{ca}^{F'_\eta} + w_{cb}^{F'_\eta}, \text{ где } F'_\eta \text{ — аддитивная часть } F_\eta;$$

4) $u_{bca}^{F'_\eta} = u_{ca}^{F'_\eta} + w_{cb}^{F'_\eta}$; в случае аддитивной функции F'_η длина кратчайшего пути, связывающего вершины a и b и проходящего через заданную вершину c , равна сумме прямого и обратного потенциалов вершины c относительно вершин a и b ;

$$5) u_{ab}^{F'_\eta} \leq u_{ab}^{F_\eta}.$$

Использование свойств 4 и 5 позволяет отбросить часть вершин графа G , заведомо не входящих в искомый путь $\Pi_{0, n+1}$,

так как $d_\eta(\Pi_{0, c, n+1}) = u_{n+1, c, 0}^{F_\eta} \geq u_{n+1, c, 0}^{F'_\eta} = u_{c0}^{F'_\eta} + w_{c, n+1}^{F'_\eta}$.

Если хотя бы для одного $\eta = \overline{1, \eta_0}$ выполняется условие $u_{c0}^{F'_\eta} + w_{c, n+1}^{F'_\eta} \geq B_\eta$, то вершина c удаляется из графа G .

Свойство 3 используется для вычисления оценок снизу, а свойство 2 — для вычисления оценок сверху длины пути, проходящего через заданную вершину.

Для вычисления потенциалов на G используется алгоритм индексного типа, учитывающий специфику G (многодольность). На первом этапе работы алгоритмов последовательно (за n шагов) вычисляются прямые потенциалы всех вершин графа относительно его миноранты. На втором этапе (обратный проход) выделяется кратчайший путь. При этом вычисление потенциалов происходит за один просмотр графа G .

Каждый m -й шаг при прямом проходе по графу G заключается в просмотре всех вершин, принадлежащих множеству X_m . Прямой потенциал вершины (m, j, k) вычислится по рекуррентной формуле

$$u_{mj, k, 0}^{F'_\eta} = a_{mj, k} + \min \{u_{(m+1, j', k'), 0}^{F'_\eta} + b_{(m+1, j, mj')}\}.$$

При обратном проходе на множестве X_m выбирается вершина, имеющая минимальное значение прямого потенциала — $u_{(n+1, j, k), 0}^{F'_\eta}$. Очевидно, она принадлежит искомому кратчайшему пути. Затем просматривается множество вершин X_{n-1} и для каждой вершины проверяется равенство

$$u_{(n+1, j, k), 0}^{F'_\eta} + b_{(n-1, j, k)} = u_{(n, j, k), 0}^{F'_\eta}.$$

Если равенство выполняется, то вершина принадлежит искомому кратчайшему пути. Заметим, что рассматриваемый метод позволяет за n шагов выделить все кратчайшие пути на G .

Данный алгоритм был запрограммирован на языке ФОРТРАН и входит как составная часть в алгоритм решения общей задачи [3].

Алгоритм оптимизации. Для решения рассматриваемой задачи синтеза структуры разработан алгоритм оптимизации, основанный на методе «ветвей и границ». Отметим основные особенности алгоритма.

1. Ветвление. Назовем m -фрагментом вариантов множество путей от миноранты до мажоранты графа, у которых m первых вершин совпадают ($m = \overline{1, I}$). Таким образом, все множество путей является нуль-фрагментом Z^0 . При ветвлении фрагмент Z^0 разбивается на $(k_m J)$ фрагментов Z^1 , которые, в свою очередь, разбиваются на фрагменты Z^2 и т.д. Полученное таким способом дерево вариантов имеет $(kJ)^I$ висячих вершин.

2. Вычисление оценок. Под длиной m -фрагмента $d(Z^m)$ понимается длина части пути, составленной из m первых вершин некоторого пути, принадлежащего Z^m . Кратчайшим продолжением назовем путь минимальной длины, принадлежащей Z^m . Длина кратчайшего продолжения является эффективной оценкой $\Phi(Z^m)$ снизу для Z^m и может быть найдена при помощи алгоритма поиска кратчайшего пути. Если на G задана аддитивная функция F' , то, опираясь на свойство 4, можем записать

$$\Phi(Z^m) = d(Z^m) + w_{c, n+1}^{F'} \quad (3.38)$$

(здесь вершина c принадлежит X_m и Z^m). Из свойства 3 следует, что (3.38) задает оценку и в случае не аддитивной F_n , однако она несколько грубее оценки, вычисленной по алгоритму кратчайшего пути.

3. Исключение фрагментов. В процессе поиска решения фрагмент Z^m исключается из дальнейшего рассмотрения, если

$$\Phi(Z^m) \geq \Phi_0^*, \quad (3.39)$$

где Φ_0^* — граница, равная значению F_0 для некоторого Z^I -фрагмента, полученного на предыдущих шагах поиска решения. Выбор границы Φ_0^* определяется характером задачи. Так, если определяется единственное оптимальное решение, то Φ_0^* берется равным величине F_0 лучшего Z^I . Если определяется некоторое множество «лучших» решений, например состоящее из n вариантов множества D_n^δ , то в качестве Φ_0^* принимается величина F_0 худшего $Z^I \in D_n^\delta$.

В случае, если (3.39) не выполняется, то проверяется система неравенств

$$\Phi_n(Z^m) \geq B_n, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}. \quad (3.40)$$

Если выполняется хотя бы одно из неравенств (3.40), то фрагмент Z^m исключается.

Блок-схема алгоритма поиска множества D_n^δ дана на рис. 3.7. На первом шаге работы алгоритма происходит вычисление прямых и обратных потенциалов по всем показателям для всех вершин графа G (блок 1). На втором шаге для каждой вершины $a \in$

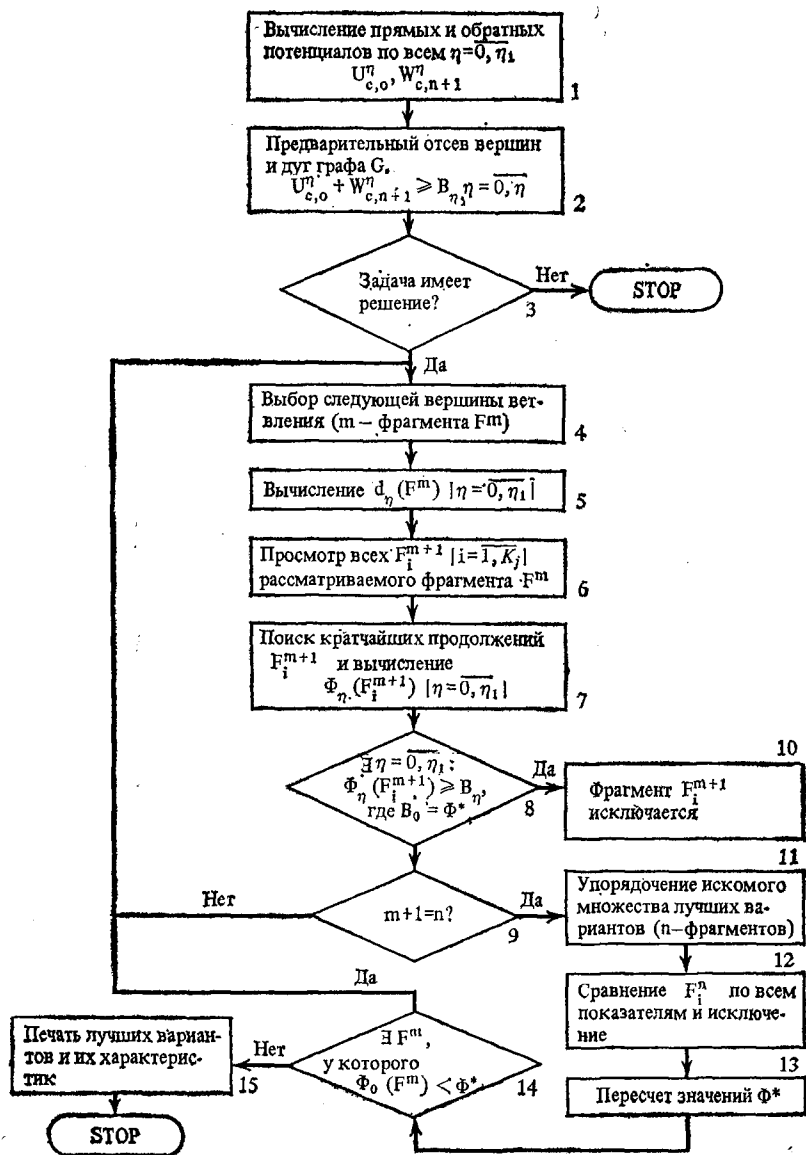


Рис. 3.7

$\in X$ проверяется система неравенств

$$u_a^\eta + w_a^\eta \geq B_\eta, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}.$$

Если выполняется хотя бы одно неравенство, то вершина и дуги, инцидентные ей, исключаются из G . В результате этой процедуры получим подграф \bar{G} (блок 2). На третьем шаге проверя-

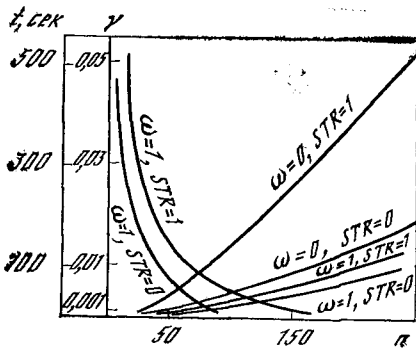


Рис. 3.8

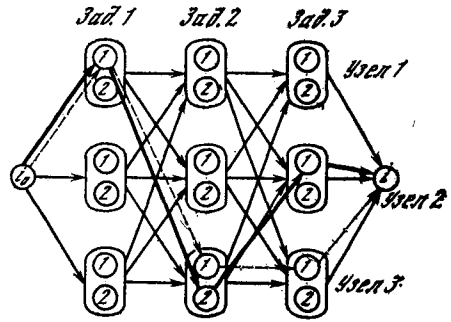


Рис. 3.9

ется связность миноранты \bar{G} с его мажорантой. Если не существует ни одного пути, связывающего миноранту с мажорантой, то задача при заданных ограничениях B_n не имеет решения. Далее работа алгоритма осуществляется в соответствии с общей схемой «ветвей и границ». Ветвление начинается с фрагмента Z^0 . В блоке 6 просматриваются все Z^1 , для каждого ищется кратчайшее продолжение и вычислится оценка снизу по всем $\eta = 0, \eta_0 - \Phi_n(Z^1)$ (блок 7). Проверются ограничения задачи для фрагментов Z^1 , которые исключаются из рассмотрения, если эти условия не выполняются (блоки 9, 10). На втором шаге из рассмотренных Z^1 выбирается фрагмент с наибольшей оценкой Φ_0 и разбивается на фрагменты Z^2 и т. д.

Если на данном шаге получены Z^1 -фрагменты, то в блоках формируется искомое множество D_n^0 . При этом часть Z^1 -фрагментов, полученных ранее, может быть исключена из D_n^0 . В результате работы алгоритма происходит последовательное улучшение вариантов, включенных в D_n^0 до получения n «лучших» вариантов.

Программа, реализующая описанный выше алгоритм, написана на языке ФОРТРАН-4 и позволяет находить n вариантов структуры типовой подсистемы управления, включающей до 15 задач управления, 15 узлов системы и 10 вариантов для каждой задачи, учитывая при этом до 10 характеристик. Зависимость времени поиска оптимального решения и отношения числа просмотренных вершин дерева вариантов к полному перебору от стратегии поиска и размерности решаемых задач показана на рис. 3.8. Расчеты проводились на массиве данных, полученных при помощи датчика случайных чисел. Размерность задачи вычислялась как произведение IQJ , где I — число задач, Q — число вариантов решения каждой задачи и J — число узлов системы; граф связей узлов был полный. Решались задачи минимизации стоимости создания и эксплуатации $\omega = 0$ и максимизации оперативности системы $\omega = 1$. В программе предусмотрено использование двух стратегий поиска: горизонтальной (выбор следующей вершины ветвления проис-

ходит из всего множества просмотренных вершин $STP = 0$) и вертикальной (следующая вершина выбирается из множества вершин, просмотренных на предыдущем шаге $STR = 1$). Как показали эксперименты (рис. 3.8), вертикальная стратегия поиска для рассматриваемых задач оказалась выгоднее горизонтальной.

Пример. Рассмотрим модельный пример расчета подсистемы, решающей три функциональные задачи: измерение координат (задача 1), обработка информации измерений (задача 2), формирование корректирующих воздействий (задача 3). Задачи могут решаться техническими средствами двух типов (вариант 1 и 2). Система включает три узла: борт ЛА, наземный управляющий комплекс 1, наземный управляющий комплекс 2. Граф возможных реализаций G для данного примера имеет вид, показанный на рис. 3.9, где жирной линией выделен путь, соответствующий оптимальному решению.

Таблица 3.2

Технико-экономические характеристики взаимосвязи между узлами системы

| Задача | | 1—2 | | | 2—3 | | |
|--------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Узел | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Условная стоимость, тыс. руб. | 0,0 | 21,3 | 14,3 | 0,0 | 14,5 | 9,1 |
| | Время, мин. | 0,0 | 17,2 | 22,3 | 0,0 | 12,7 | 19,6 |
| | Надежность | 1,000 | 0,990 | 0,950 | 1,000 | 0,980 | 0,990 |
| 2 | Условная стоимость, тыс. руб. | 53,4 | 0,0 | 17,5 | 71,5 | 0,0 | 20,3 |
| | Время, мин. | 13,5 | 0,0 | 7,6 | 21,6 | 0,0 | 14,0 |
| | Надежность | 0,990 | 1,000 | 0,960 | 0,970 | 1,000 | 0,930 |
| 3 | Условная стоимость, тыс. руб. | 12,0 | 6,7 | 0,0 | 17,5 | 10,2 | 0,0 |
| | Время, мин. | 1,9 | 15,7 | 0,0 | 4,3 | 8,7 | 0,0 |
| | Надежность | 0,960 | 0,970 | 1,000 | 0,930 | 0,980 | 1,000 |

Исходная информация к модельному примеру приведена в табл. 3.2—3.5, а результаты выбора технических средств, распределения задач управления по узлам системы, а также основные технико-экономические характеристики для трех вариантов структуры — в табл. 3.6.

Рассмотренная методология и формализация задачи синтеза структуры системы управления летательным аппаратом положены в основу разработки комплекса моделей, предназначенных для синтеза оптимальных структур систем управления.

Таблица 3.3

Характеристики технических средств

| Тип технического средства | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Условная стоимость, тыс. руб. | 83,6 | 49,3 | 97,1 | 124,2 | 17,3 | 21,4 | 41,9 | 51,7 | 112,3 |
| Вес, кг | 60,2 | 112,0 | 145,3 | 73,3 | 99,3 | 115,6 | 211,6 | 47,3 | 63,9 |
| Тип технического средства | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Условная стоимость, тыс. руб. | 103,5 | 41,3 | 18,3 | 24,5 | 81,7 | 63,2 | 173,2 | 211,0 | 49,3 |
| Вес, кг | 97,1 | 192,9 | 195,6 | 187,1 | 91,7 | 300,0 | 148,0 | 93,7 | 140,2 |

В настоящее время наблюдается интерес к комплексному решению задач синтеза структуры системы с учетом динамики ее развития, когда оптимизируется и размещение узлов системы, их оснащение, и распределение функций, обеспечивающее их эффективность, живучесть и т. д. Рассматриваемые постановки, даже если задача может быть целиком сформулирована как некоторая

Таблица 3.4

Технико-экономические характеристики вариантов решения задач в узлах системы

| Задача | | 1 | | 2 | | 3 | |
|--------|-------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Узел | | Вариант | | | | | |
| | | К-1 | К-2 | К-1 | К-2 | К-1 | К-2 |
| 1 | Условная стоимость, тыс. руб. | 47,5 | 50,2 | 73,2 | 212,4 | 54,5 | 146,3 |
| | Время, мин | 24,3 | 211,7 | 46,4 | 191,3 | 91,0 | 213,0 |
| | Надежность | 0,990 | 0,960 | 0,970 | 0,980 | 0,980 | 0,990 |
| | Тип техн. средства | 2 | 10 | 16 | 15 | 1 | 2 |
| 2 | Условная стоимость, тыс. руб. | 82,8 | 92,7 | 123,4 | 23,4 | 72,5 | 72,3 |
| | Время, мин | 24,8 | 117,2 | 115,0 | 153,0 | 13,7 | 91,3 |
| | Надежность | 0,950 | 0,980 | 0,870 | 0,995 | 0,960 | 0,987 |
| | Тип техн. средства | 4 | 5 | 8 | 6 | 7 | 9 |
| 3 | Условная стоимость, тыс. руб. | 95,3 | 107,0 | 29,8 | 92,3 | 42,7 | 71,5 |
| | Время, мин | 29,1 | 87,5 | 81,2 | 41,3 | 56,2 | 71,0 |
| | Надежность | 0,980 | 0,971 | 0,930 | 0,980 | 0,990 | 0,965 |
| | Тип техн. средства | 3 | 11 | 13 | 12 | 13 | 1 |

Таблица 3.5

Условная стоимость создания каналов связи между узлами, тыс. руб.

| Узлы | 1 | 2 | 3 |
|------|------|------|------|
| 1 | 0,0 | 9,9 | 3,0 |
| 2 | 47,5 | 0,0 | 13,7 |
| 3 | 12,3 | 21,0 | 34,8 |

Таблица 3.6

Оптимальная структура контура управления по критерию «затрат»

Вариант 1

| Задача | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|---|---|---|
| Узел решения | 1 | 2 | 3 |
| Выбранный вариант | 1 | 2 | 3 |

Характеристики

| | |
|-------------------------------|--------|
| Условная стоимость, млн. руб. | 243,6 |
| Оперативность | 163,6 |
| Вес на борту, кг | 112,0 |
| Надежность | 0,8750 |

Оптимальная структура контура управления по критерию «оперативность»

Вариант 1

| Задача | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|---|---|---|
| Узел решения | 1 | 3 | 2 |
| Выбранный вариант | 1 | 2 | 1 |

Характеристики

| | |
|-------------------------------|--------|
| Условная стоимость, млн. руб. | 378,1 |
| Оперативность | 95,2 |
| Надежность | 0,8315 |
| Вес на борту, кг | 112,0 |

Вариант 2

| Задача | 1 | 2 | 3 |
|-------------------|---|---|---|
| Узел решения | 1 | 3 | 3 |
| Выбранный вариант | 1 | 2 | 1 |

Характеристики

| | |
|-------------------------------|--------|
| Условная стоимость, млн. руб. | 324,4 |
| Оперативность | 123,7 |
| Надежность | 0,9221 |
| Вес на борту, кг | 112,0 |

задача математического программирования, представляют существенные трудности при их практическом решении из-за большой размерности. Поэтому важное значение имеет разработка соответствующих декомпозиционных методов решения конкретных задач синтеза структуры.

Возникающие при этом математические постановки задач синтеза структуры системы могут быть сформулированы с использованием целочисленных переменных различного уровня детализации, ступенчато взаимосвязанных между собой. Например, пусть переменная x_i вектора $X = \{x_i, i = \overline{1, I}\}$, принимающая целочисленные булевы значения, отражает факт использования некоторого узла в системе управления, а y_{ij} отражает возможность выполнения в узле i задачи j (либо оснащения его некоторым комплексом технических средств, массивов и процедур и т. д.).

Рассматриваемые переменные взаимосвязаны следующим образом для всех $x_i \in X$ и $y_{ij} \in Y$:

$$y_{ij} = \begin{cases} y_{ij}, & \text{если } x_i > 0, \\ 0, & \text{если } x_i = 0. \end{cases} \quad (3.41)$$

Подобную взаимосвязь переменных с различной степенью детализации естественно называть ступенчатой. Ступенчатая зависимость может быть характерна для нескольких переменных, например:

$$z_{ijk} = \begin{cases} z_{ijk}, & \text{если } x_i > 0 \text{ и } y_{ij} > 0, \\ 0, & \text{если } x_i = 0 \text{ или } y_{ij} = 0, \end{cases} \quad (3.42)$$

или в общем случае

$$z_{ij, \dots, k} = \begin{cases} z_{ij, \dots, k}, & \text{если } x_i > 0 \text{ и } y_{ij} > 0, \dots, \\ 0, & \text{если } x_i = 0 \text{ или } y_{ij} = 0, \dots \end{cases} \quad (3.43)$$

Ниже приводится постановка задачи для трех ступенчато взаимосвязанных переменных различной степени детализации (X , Y и Z), однако приводимые соображения справедливы и для большего числа переменных (конкретные постановки задач приведены, например, в [3, 37]).

Задача обычно формулируется следующим образом:

$$\text{extr} \mathfrak{M}(x, y, z) = f(x) + F(x, y) + \Phi(x, y, z), \quad (3.44)$$

$$\mathfrak{M}(x, y, z) \leq \mathfrak{M}. \quad (3.45)$$

Ограничение $\mathfrak{M}(x, y, z)$ также задается некоторой совокупностью взаимосвязанных условий $G_1(x)$, $G_2(x, y)$, $G_3(x, y, z)$. В простейшем линейном случае условие (3.44) запишется, например, в виде

$$\mathfrak{M}(x, y, z) = \sum_i a_i x_i + \sum_{i,j} b_{ij} y_{ij} + \sum_{ijk} c_{ijk} z_{ijk}, \quad (3.46)$$

а общая взаимосвязанная часть ограничений (3.45) — аналогично в виде

$$\mathfrak{M}(x, y, z) = \sum_i d_i x_i + \sum_{ij} d_{ij} y_{ij} + \sum_{ijk} d_{ijk} z_{ijk} \leq \mathfrak{M}. \quad (3.47)$$

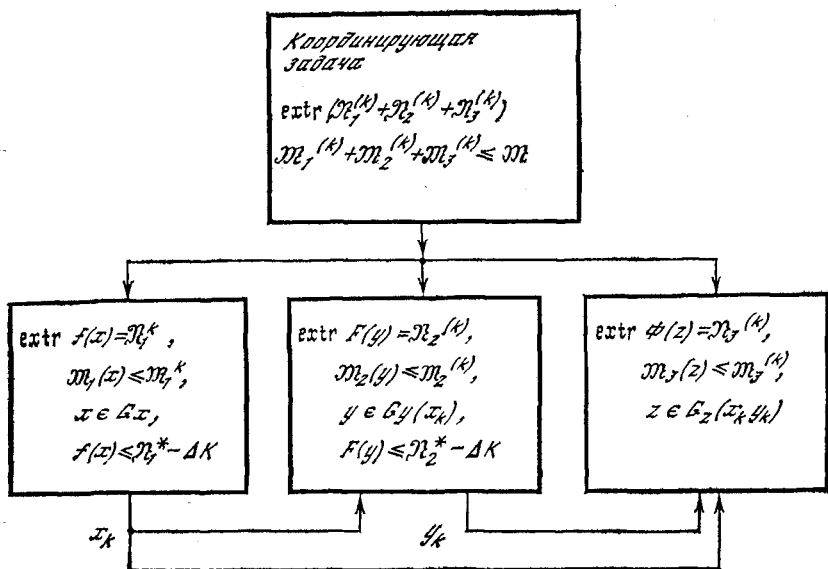


Рис. 3.10

Заметим, что в общем случае выполнимость некоторых из ограничений может быть проверена лишь алгоритмически в процессе имитации системы (глава 5).

Для получения оптимального решения задач синтеза структуры сложных систем со ступенчато взаимосвязанными переменными может быть использована их декомпозиция на последовательность взаимосвязанных задач меньшей размерности. Пусть постановка задачи синтеза структуры формализована в виде

$$\begin{aligned} &\text{extr } (f(x) + F(y) + \Phi(z)), \\ &\mathcal{M}_1(x) + \mathcal{M}_2(y) + \mathcal{M}_3(z) \leq \mathcal{M}; \\ &x \in G_x; y \in G_y; z \in G_z; \end{aligned} \quad (3.48)$$

где переменные $x, y, z = \{1, 0\}$; $y_{ij} = y_{ij}$, если $x_i > 0$, $y_{ij} = 0$, если $x_i = 0$; $z_{ijk} = z_{ijk}$, если $y_{ij} > 0$, $z_{ijk} = 0$, если $y_{ij} = 0$. Итеративная схема решения задач синтеза структуры сложных систем со ступенчато взаимосвязанными переменными различной степени детализации для рассматриваемого случая приведена на рис. 3.10.

Координирующий блок обеспечивает выполнение совместных ограничений задачи и поиск (с использованием известных методов поисковой оптимизации), глобального оптимума всей задачи, управления ограничениями и в простейшем случае линейных ограничений (3.48) разбивает общие ресурсы по взаимосвязанным подзадачам, здесь k — индекс итерации. Аналогично с учетом специфики задачи могут быть сформулированы итеративные схемы и для решения других задач оптимизации структуры сложных систем со ступенчато взаимосвязанными переменными.

УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ СТРУКТУР СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

§ 4.1. Введение

В данной главе рассматривается формализация задач планирования очередности и этапности создания сложных систем, модели и методы, позволяющие определить моменты начала и окончания разработки взаимосвязанных объектов (задач), распределение ресурсов между ними [2, 4, 14, 39, 73]. Разработанный подход, модели и методы использовались при создании ОАСУ «Металл», а также для решения задач инвестиционного планирования создания крупномасштабных систем, в частности для оптимизации развития региональных энергетических и производственно-транспортных комплексов, а также сетей ВЦ.

Как отмечалось в гл. 1, в статической задаче синтеза структуры сложных систем состав и взаимосвязи элементов системы определяются для некоторого заданного перспективного периода времени. Однако если система создается в течение достаточно длительного времени, то важной становится задача выбора наилучшей в некотором смысле траектории развития системы. После решения статической задачи синтеза структуры системы решается задача синтеза оптимального плана реализации системы.

Возможна совместная постановка задач синтеза структуры и выбора плана развития системы. В зависимости от того, в какое состояние должна перейти система и как это может происходить, возможны различные постановки задач развития оптимальной структуры системы (см. § 1.2).

Рассмотрим постановки задач планирования развития структур на примерах таких систем, как производственно-транспортные системы и сети ВЦ. Во многом аналогично они могут быть сформулированы и для других уровней детализированного представления описания систем (см. рис. 1.3).

Особенность рассматриваемого класса задач состоит в том, что при планировании развития крупномасштабных производственно-транспортных систем необходимо учитывать динамику инвестиций для каждого отдельного элемента, так как время создания элемента может быть достаточно велико (5—10 лет). Поэтому в рассматриваемых моделях существенное внимание уделяется выбору способа формализации процесса развития элементов системы. При формализации следует описать зависимость величин инвестиций и уровней производства продукта в данном элементе от времени, прошедшего с момента начала инвестиций.

§ 4.2. Формализация задач планирования развития систем

Рассматриваемые системы включают совокупность элементов (производственных и транспортных), взаимосвязанных между собой. На рис. 4.1 и 4.2 показаны основные элементы модели планирования развития на примерах таких крупномасштабных систем, как электроэнергетические системы и системы газоснабжения страны, сети ВЦ.

В первом случае производственные элементы представляют собой объединенные энергетические системы (ОЭС), включающие совокупность действующих, строящихся и проектируемых электростанций и сети потребителей электроэнергии, транспортными элементами являются магистральные линии электропередач (ЛЭП), соединяющие ОЭС между собой.

Во втором случае рассматриваются производственные элементы двух типов: газодобывающие районы, включающие совокупность разрабатываемых газовых месторождений, и потребители газа (крупные города, регионы), а связывающая их сеть газопроводов (Единая газоснабжающая сеть страны (ЕГС)) является совокупностью транспортных элементов системы.

В третьем случае производственными элементами являются региональные и кустовые ВЦ, которые могут быть реализованы одной из ряда заданных категорий, а транспортными элементами является сеть связи (см. § 4.3).

Для элементов системы задаются возможные варианты развития и динамика потребления продукта (для производственных элементов). Развитие элемента состоит в создании новых и реконструкции существующих предприятий данного элемента, предназначенных для производства или транспортировки продукта.

Данную зависимость и ее графическое изображение назовем программой развития элемента. В зависимости от способа формализации будем различать жесткие и управляемые программы. В первом случае программа развития элемента устанавливается до решения задачи планирования, а ее вид в основном определяется технологией создания элемента. Во втором случае программа развития определяется в процессе решения задачи планирования, исходя из внешних по отношению к данному элементу ограничений. При этом программа развития элемента обычно ищется в некотором классе вектор-функций (непрерывных, кусочно-постоянных, δ -функций и т. д.) Опыт использования различных схем формализации показывает, что применение второго способа формализации на практике связано с рядом трудностей. Дело в том, что получаемые в процессе решения задачи программы часто не «технологичны», что затрудняет использование полученных планов. С другой стороны, попытка учесть все технологические ограничения на возможный вид программы приводит к существенному усложнению постановки и решения задачи планирования развития.

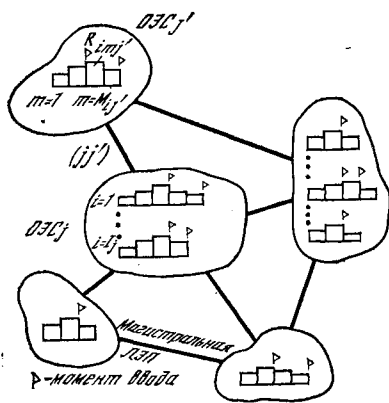


Рис. 4.1

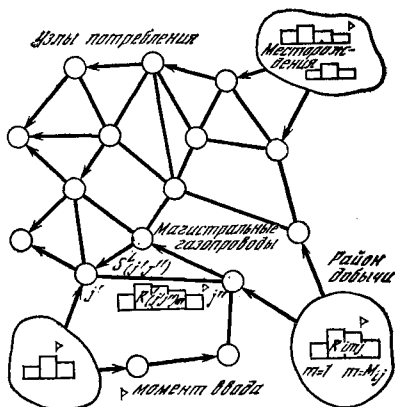


Рис. 4.2

Задача оптимизации планирования развития структуры крупномасштабных производственно-транспортных систем состоит в определении вариантов развития производственных и транспортных элементов системы (распределение инвестиций, определение очередности создания новых предприятий и транспортных элементов), определении моментов ввода мощностей с учетом динамики изменения потребления продукта в элементах системы, возможностей строительных организаций, ограничений на технологию строительства. Кроме того, требуется определить транспортные потоки в системе и их изменение во времени.

Большой класс крупномасштабных систем, включающий перечисленные, может быть описан с помощью динамической модели однопродуктовой производственно-транспортной системы [2, 4]. Предлагаемый способ формализации позволяет описывать также многопродуктовые системы.

Модель развития производственных элементов. Рассмотрим формализацию переменных и ограничений задачи, относящихся к совокупности производственных элементов системы j ($j = \overline{1, J}$). Для каждого элемента j задается множество производственных объектов i ($i = \overline{1, I}$), которые могут быть построены за заданный интервал времени k ($k = \overline{1, K}$).

Каждый производственный объект характеризуется объемом ресурсов, требующимся для его развития, и уровнем производства продукта, который достигается после завершения развития объекта. Объект может состоять из нескольких блоков (очереди, этапов, пусковых комплексов), после завершения развития которых достигается прирост уровня производства (например, получение электроэнергии после пуска одного из энергоблоков электростанции). Условия строительства объектов в различных элементах системы зависят от климатической зоны, удаленности от сырьевой базы, обеспеченности трудовыми ресурсами и т. д.

Обозначим через R_{imj} ($i = \overline{1, I_j}; j = \overline{1, J}, m = \overline{1, M_{ij}}$) затраты ресурса на развитие объекта i в m -й период строительства в j -м элементе, а соответствующий уровень производства — через P_{imj} ($i = \overline{1, I_j}; j = \overline{1, J}; m = \overline{1, K}$). Введем переменные

$$z_{ikj} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й объект } j\text{-го элемента начинает строиться} \\ & \text{в } k\text{-й период планирования,} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда суммарный уровень производства продукта по всей совокупности развивающихся объектов j -го элемента в k -й период планирования составит

$$P_{kj} = \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{m=1}^k P_{imj} z_{i, k-m+1, j}, \quad j = \overline{1, J}; k = \overline{1, K}. \quad (4.1)$$

Затраты на достижение уровня производства P_{kj} в j -м элементе в k -й период равны

$$R_{kj} = \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{m=1}^{L_{ikj}} R_{imj} z_{i, k-m+1, j}, \quad j = \overline{1, J}; k = \overline{1, K}, \quad (4.2)$$

где $L_{ikj} = \min \{k, M_{ij}\}$.

Суммарный уровень производства продукта по всем развиваемым элементам системы должен быть не ниже суммарного прироста уровня потребления этого продукта по отношению к уровню потребления в начальный период планирования

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{m=1}^k P_{imj} z_{i, k-m+1, j} \geq \sum_{j=1}^J \mathcal{P}_{jk}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (4.3)$$

где \mathcal{P}_{jk} — заданный прирост уровня потребления продукта в j -м элементе в k -й период планирования.

Заметим, что возможны две стратегии планирования развития системы. Первая состоит в том, что потребность в элементах покрывается в основном за счет прироста производства в каждом элементе. При этом транспортная сеть не развивается. Вторая стратегия предусматривает устранение дефицита в элементах за счет перетока продукта из других элементов системы и связанное с этим развитие транспортной сети. Отметим, что глобальный оптимум может быть достигнут лишь с использованием второй стратегии планирования.

Логические ограничения на очередность строительства объектов учитываются с помощью равенств

$$\sum_{k=1}^K k (z_{ikj} - z_{tkj}) = n_t - n_i - 1, \quad j = \overline{1, J}, (t, i) \in A, \quad (4.4)$$

означающих, что n_t -й период строительства t -го объекта следует сразу после окончания n_i периода строительства i -го объекта.

Ограничения на директивы вводов (начать развивать i -й объект не позднее k' -го периода) записываются следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{K} z_{ikj} = 1, \quad i = \overline{1, I_i}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (4.5)$$

В процессе решения задачи планирования может выбираться технология строительства объектов. Для этого каждому объекту ставится в соответствие конечный набор допустимых технологий строительства $l = \overline{\alpha_i, \beta_i}$, а переменная z_{ikj} заменяется на z_{ljk} , где l пробегает значения α_i, β_i для всех $i = \overline{1, I_j}$ и $j = \overline{1, J}$. Условие выбора не более чем одной технологии строительства объекта i записывается следующим образом:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=\alpha_i}^{\beta_i} z_{ljk} \leq 1, \quad i = \overline{1, I_j}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (4.6)$$

Модель развития транспортных элементов. Характер и темпы развития производственных элементов системы существенным образом зависят от развития ее транспортной сети и динамики изменения транспортных потоков. Это влияние в основном осуществляется через общие ресурсные ограничения на развитие всей системы.

Пусть D_{jk} — разность между уровнем потребления и уровнем производства (дефицит) продукта в j -м элементе в k -й период планирования:

$$D_{jk} = D_{jk}^0 + \mathcal{P}_{jk} - P_{jk}, \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K},$$

где D_{jk}^0 — дефицит продукта в j -м элементе в начальный период планирования.

Введем переменные $x_{(jj')k}$ — поток продукта по транспортному элементу (jj') (из j -го производственного элемента в j' -й) в k -й период планирования; $z_{(jj')k}^l = 1$, если между элементами j и j' в k -й период планирования начато строительство транспортного элемента l -го типа, и $z_{(jj')k}^l = 0$ в противном случае ($l = \overline{1, L_{(jj')}}$, $k = \overline{1, K}$, $(jj') \in \Theta$). При формализации транспортной части системы в целях уменьшения размерности задачи целесообразно провести предварительно качественный анализ сети и выделить (если это возможно) множество дуг $\hat{\theta}$, для которых направление потока задано (например, это могут быть дуги, находящиеся в сфере влияния данного газодобывающего района или района экспорта), и множество дуг $\bar{\theta}$, для которых направление потоков неизвестно и определяется в процессе решения задачи ($\hat{\theta} \cup \bar{\theta} = \Theta$).

В силу (4.3) в каждый период планирования k для всех вершин сети выполняется неравенство

$$\sum_{j=1}^J D_{jk} \leq 0, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.7)$$

Это означает, что объем производства продукта в каждый период планирования равен величине потребности продукта или превышает его (условие отсутствия дефицита).

С использованием введенных переменных условие удовлетворения потребности в j -м узле в k -й период планирования (балансные соотношения) запишется в виде

$$\sum_{(j') \in \theta'_j} x_{(jj')k} - \sum_{(j'') \in \theta''_j} x_{(jj'')k} = D_{jk}, \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K}, \quad (4.8)$$

где θ'_j — подмножество θ , для всех элементов которого вторым индексом в паре $(j'j)$ является индекс j ; θ''_j — подмножество θ , для всех элементов которого первым индексом в паре (jj') является индекс j .

Обозначим через $s^l_{(jj')}$ пропускную способность транспортного элемента (jj') l -го типа. Тогда ограничение на величину потока продукта между двумя производственными элементами (jj') в каждый период планирования имеет вид

$$\sum_{l=1}^{L(jj')k-M^l_{jj'}} \sum_{m=1} s^l_{(jj')} z^l_{(jj')m} \geq x_{(jj')k} + x_{(j'j)k}, \quad k = \overline{1, K}, (jj') \in \theta. \quad (4.9)$$

Обозначим R_k — суммарные ресурсы, выделенные на развитие сети транспортных элементов в k -й период планирования; $R^l_{(jj')m}$ — затраты ресурсов на строительство участка сети l -го типа между узлами j и j' в m -й период строительства; $M^l_{(jj')}$ — продолжительность строительства l -го типа транспортного элемента между элементами j и j' . Ограничение на потребление ресурсов в k -й период планирования записывается так:

$$\sum_{(jj') \in \theta} \sum_{l=1}^{L(jj')} \sum_{m=1}^{L^l_{(jj')k}} R^l_{(jj')m} z^l_{(jj')k-m+1} \leq R_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad (4.10)$$

где $L^l_{(jj')k} = \min \{M^l_{(jj')}, k\}$.

Если заданы общие затраты на развитие всей системы R_k , то в левую часть (4.10) следует добавить $\sum_{j=1}^J R_{kj}$, где R_{kj} определяются в (4.2).

Ограничения на директивы вводов записываются аналогично выражению (4.6) для производственной части

$$\sum_{k=A-M^l_{(jj')}}^{B-M^l_{(jj')}} z^l_{(jj')k} = 1, \quad l = \overline{1, L(jj)}; (jj') \in \theta. \quad (4.11)$$

Это означает, что требуется ввести в эксплуатацию транспортный элемент l -го типа между элементами j и j' на отрезке времени (A, B) .

В качестве критерия оптимальности в задаче используются полные приведенные капитальные и эксплуатационные затраты на развитие и функционирование системы. Пусть $Q_{(jj')k}$ — удельные эксплуатационные затраты с учетом дисконтирования на транспортировку продукта между элементами j и j' , в k -й период планирования, $K_{(jj')k}^l$ — капитальные затраты на создание транспортного элемента l -го типа между элементами j и j' , K_{ijk} — капитальные затраты на создание i -го производственного объекта в j -м узле. Величины $K_{(jj')k}^l$ и K_{ijk} вычисляются при условии, что строительство соответствующего элемента системы начато в k -й период планирования, что позволяет учесть разновременность капитальных вложений на развитие системы.

Задача оптимального планирования развития производственно-транспортной системы заключается в том, чтобы найти значения переменных z_{ikj} , $x_{(jj')k}$ и $z_{(jj')k}^l$, доставляющие минимум целевой функции

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} \sum_{k=1}^K K_{ikj} z_{ikj} + \sum_{k=1}^K \left(\sum_{(jj') \in \Theta} Q_{(jj')k} x_{(jj')k} + \sum_{(jj') \in \Theta} \sum_{l=1}^{L(jj')} \times \right. \\ \left. \times K_{(jj')k}^l z_{(jj')k}^l \right) \rightarrow \min \quad (4.12)$$

при выполнении ограничений (4.2) — (4.11).

Выбор критерия определяется спецификой рассматриваемой системы. Так, если динамика уровня производства в системе задана (определяется заданным уровнем потребления), в качестве критерия оптимальности используется выражение (4.12), если же существует определенная свобода в выборе уровней производства, то может быть применен критерий типа максимизации прироста уровня производства за рассматриваемый период планирования (см. (4.25)); могут быть использованы и другие критерии оптимальности (например, рассмотренные в [2]). Отметим, что решаются две взаимосвязанные задачи (оптимальное планирование развития производственных элементов и оптимальное планирование развития транспортной сети), каждая из которых представляет самостоятельный практический интерес.

§ 4.3. Модель развития структуры сети вычислительных центров

В связи с проектированием и созданием во многих отраслях сетей ВЦ коллективного пользования все большее значение приобретает решение проблемы синтеза и планирования развития их структуры. Рассмотрим задачу планирования развития структуры отраслевой сети ВЦ (ОСВЦ) с учетом изменения потребностей абонентов в информационно-вычислительных работах (ИВР), технических характеристик каналов связи (КС) и вычислительных средств.

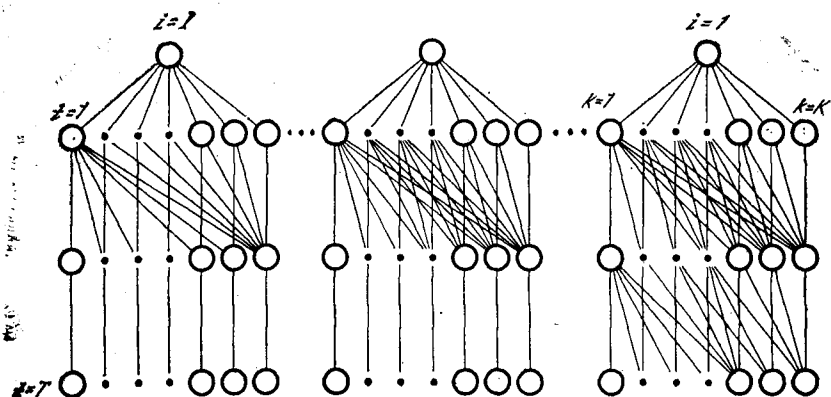


Рис. 4.3

Рассматриваемые отраслевые сети ВЦ включают совокупность ВЦ и абонентских пунктов (АП), связанных между собой КС. Каждый ВЦ характеризуется величинами потребностей своих абонентов в ИВР и категорией в каждый период планирования. Категория ВЦ характеризует состав комплекса используемых технических средств. В ОСВЦ выделены два уровня иерархии ВЦ и задана связь между ВЦ различного уровня.

В случае, если потребность сети абонентских пунктов ВЦ в ИВР не может быть удовлетворена за счет мощности собственных вычислительных средств, возможен переток мощности между ВЦ различного уровня по КС.

Процесс развития ОСВЦ представляется в виде набора путей на многодольном альтернативном графе (рис. 4.3), множество вершин которого отображает набор возможных категорий каждого ВЦ в заданные периоды, а множество дуг — возможные переходы из одной категории в другую.

Задача планирования развития структуры ОСВЦ состоит в поиске оптимального плана развития ОСВЦ, который определит моменты ввода ВЦ, структуру сети в каждый период планирования и потоки мощностей между ВЦ 1-го и 2-го уровней иерархии с учетом динамики изменения потребностей абонентов в ИВР и капитальных затрат на ее развитие.

В работе рассматривается динамическая модель планирования развития ОСВЦ. Задача ставится как линейная задача математического программирования с непрерывными и булевыми переменными [45].

Для формализации поставленной задачи введем следующие переменные величины: $x_{ikt} = 1$, если i -й ВЦ имеет k -ю категорию в t -й период планирования, $x_{ikt} = 0$ в противном случае; y_{it} — величина потока мощности к i -му ВЦ 2-го уровня от соответствующего ВЦ 1-го уровня иерархии в t -й период планирования.

Обозначим через $q_{ikt} = Q_{it} - Q_k$ разность между мощностью, необходимой для удовлетворения потребностей в ИВР абонентов i -го ВЦ в t -й период, и мощностью ВЦ k -й категории. Пусть $\bar{q}_{ikt} = q_{ikt}$, если $q_{ikt} > 0$, $\bar{q}_{ikt} = 0$ в противном случае; $\bar{q}_{ikt} = -q_{ikt}$, если $q_{ikt} < 0$, $\bar{q}_{ikt} = 0$ в противном случае; тогда выражение, характеризующее степень удовлетворения ОСВЦ потребностей в ИВР своих абонентов, имеет вид

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{I_R} \sum_{k=1}^K (\bar{q}_{jkt} x_{jkt} + \sum_{i \in I_j} (\bar{q}_{ikt} x_{ikt} - y_{it})), \quad (4.13)$$

где I_R — количество ВЦ 1-го уровня; I_j — множество ВЦ 2-го уровня, имеющих каналы связи с j -м ВЦ 1-го уровня.

Условие выбора для каждого ВЦ одной категории из допустимого множества формализуется в виде

$$\sum_{k=1}^K x_{ikt} = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (4.14)$$

где I — общее количество ВЦ. Ограничения на потоки мощности между ВЦ 1-го и 2-го уровня имеют вид

$$0 \leq \sum_{i \in I_j} y_{it} \leq \sum_{k=1}^K \bar{q}_{jkt} x_{jkt}, \quad j = \overline{1, I_R}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (4.15)$$

Это ограничение показывает, что суммарный поток мощности от ВЦ 1-го уровня к соответствующим ВЦ 2-го уровня не должен превышать избытка мощности j -го ВЦ 1-го уровня.

Условие того, что приток мощности к i -му ВЦ 2-го уровня не превышает дефицита мощности i -го ВЦ, имеет вид

$$0 \leq y_{it} \leq \sum_{k=1}^K q_{ikt} x_{ikt}, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (4.16)$$

Обозначим через c_{it} пропускную способность канала связи i -го ВЦ в t -й период, тогда ограничение на поток данных по этому каналу имеет вид

$$c_{it} \geq d_{it} y_{it}, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (4.17)$$

где d_{it} — коэффициент, равный среднему объему передаваемой информации на единицу потока мощности. Величина d_{it} может быть рассчитана исходя из структуры задач, решаемых ВЦ в t -й период. В случае отсутствия такой информации определяются коэффициенты d_{it} .

Условие, ограничивающее набор возможных категорий i -го ВЦ в каждый t -й период, запишется в виде

$$\sum_{k=1}^K k x_{ikt} \leq K_{it}^*, \quad i = \overline{1, I}, \quad t = \overline{1, T}, \quad (4.18)$$

где K_{it}^* — минимальная категория i -го ВЦ, полностью удовлетворяющая потребность i -го ВЦ в ИВР в t -й период. Условие на минимально необходимое количество ВЦ в системе в t -й период задается в виде

$$\sum_{i=1}^I x_{i1t} \leq M_t, \quad t = \overline{1, T}, \quad (4.19)$$

где M_t — максимально допустимое количество ВЦ, не вводимых в эксплуатацию в t -й период.

Обозначим: R_k — капитальные затраты на строительство ВЦ k -й категории; R_i — доля участия i -го ВЦ в капитальных затратах на создание КС; μ_i — коэффициент, учитывающий увеличение капитальных затрат на строительство ВЦ в особых районах (северных, сейсмичных и т. д.). Тогда капитальные затраты на создание ОСВЦ формализуются в виде

$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{I_R} \left(\mu_j \sum_{k=1}^K R_k x_{jkt} - R_k x_{jk(t-1)} \right) + \sum_{i \in I_j} \mu_i \left(\sum_{k=1}^K (R_k x_{ikt} - R_k x_{ik(t-1)}) \right). \quad (4.20)$$

В зависимости от конкретных особенностей задачи в качестве критерия оптимальности плана развития ОСВЦ используются выражения (4.13) или (4.20). При использовании в качестве критерия выражение (4.13) целесообразно ввести коэффициенты, учитывающие важность вычислительных работ, выполняемых i -м ВЦ. Она зависит от приоритетности предприятий, обслуживаемых им. При этом накладываются ограничения на затраты на создание ОСВЦ, задаваемые выражением (4.20). При использовании в качестве критерия выражения (4.20) накладываются ограничения на степень удовлетворения потребностей абонентов в ИВР по периодам планирования.

Рассмотренная модель позволяет проводить оптимизацию и анализ вариантов развития ОСВЦ. Возможность применения стандартного математического обеспечения ограничена сравнительно небольшими размерностями задачи, поэтому целесообразно использовать специализированные алгоритмы.

Для решения рассмотренной задачи разработан алгоритм, применяющий графовую формализацию развития ОСВЦ. Алгоритм основан на процедуре просмотра вариантов решения, которая использует схему «ветвей и границ» (см. также гл. 3).

Граф возможных вариантов развития ОСВЦ приведен на рис. 4.3. Алгоритм основан на процедуре просмотра вариантов решения, который использует схему «ветвей и границ». Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4.4. Рассмотрим основные шаги алгоритма.

1. Ветвление. Для очередного i -го ВЦ просматривается множество возможных вариантов его развития. Для каждого вновь полученного варианта проводится расчет оценки критерия оптимальности (блок 4), и каждое вновь полученное решение помеща-

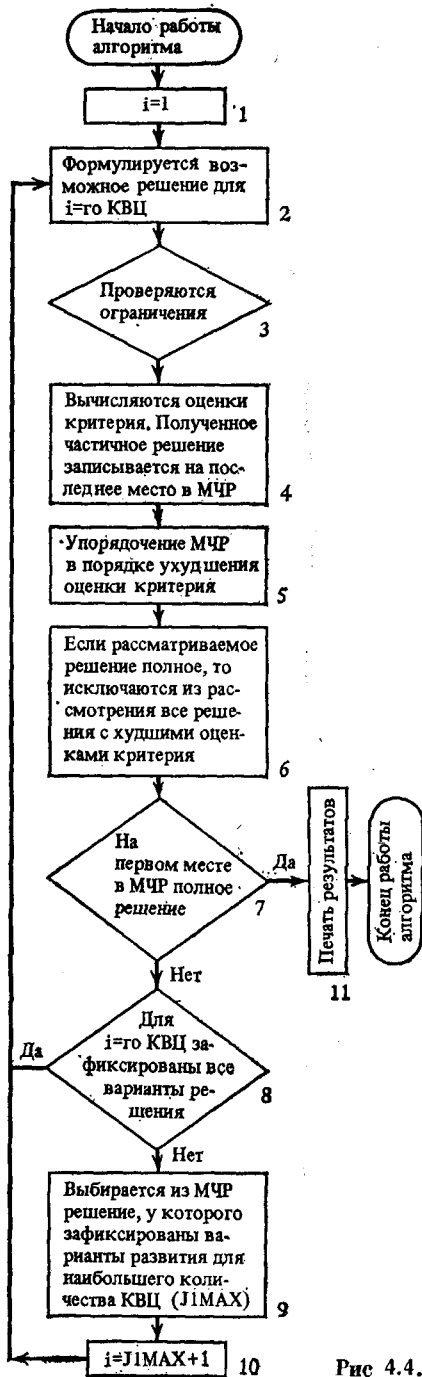


Рис 4.4.

ется в массив частичных решений (МЧР), который упорядочивается по значению оценки критерия оптимальности (блок 5).

Ветвление осуществляется из решения, у которого зафиксированы варианты развития для наибольшего количества ВЦ; если таких вариантов несколько, то ветвление осуществляется из решения с наилучшей оценкой критерия. Очередной индекс ВЦ выбирается из следующего соотношения $i = J1 \cdot MAX + 1$, где $J1MAX$ — число ВЦ, для которых зафиксированы варианты развития в выбранном частичном решении (блоки 9, 10).

2. Исключение неперспективных решений. Если на определенном шаге ветвления будет получено решение, в котором зафиксированы варианты развития для всех ВЦ, то из рассмотрения исключаются все частичные решения, имеющие худшие, чем у данного, оценки критерия оптимальности (т. е. исключаются все решения, следующие за данным в массиве частичных решений) (блок 6).

3. Вычисление оценки. Для произвольной вершины j -го уровня с зафиксированными вариантами развития для j -го ВЦ, оценка вычисляется следующим образом:

$$F_{it} = F_{it}(x_{ikt}) + F_{it}^*(x_{ikt}), \quad (4.21)$$

где первое слагаемое есть значение критерия для зафиксированной части, второе — оценка критерия для незафиксированной части ОСВЦ. Для вычисления $F_{it}^*(x_{ikt})$ выполняются следующие процедуры:

а) вычисляется значение оставшейся части ресурсов $R^{j+1} = R_t - R(x_{ikt})$, $i \leq j$;

б) полагается $i = j + 1$; для всех ВЦ, вариант развития которых не зафиксирован, назначается высшая допустимая категория, формируется массив категорий КМАС (i, t), рассчитываются капитальные затраты на создание такой сети RQ_i^t и проверяется ограничение

$$R_t^{j+1} \geq RQ_i^t. \quad (4.22)$$

Если ограничение выполнено, то $F_{it} = F_{it}(x_{ikt})$, если ограничение не выполнено, то для каждого i -го ВЦ ($i > j$) вычисляется значение вносимой им добавки к критерию $D(i, t)$ при уменьшении его категории на единицу, и сформированный таким образом массив MEM (n, t) упорядочивается в порядке увеличения добавок к критерию оптимальности;

в) выбирается ВЦ, дающий наименьшую добавку к критерию оптимальности при уменьшении его категории $i1 = \text{MEM}(n, t)$, $\text{КМАС}(i1, t) = \text{КМАС}(i1, t) - 1$, вычисляется величина $RQ_i^t = RQ_i^t = (R_{\text{КМАС}(i1, t+1)} - R_{\text{КМАС}(i1, t)})$ и проверяется ограничение (4.22);

г) если ограничение (4.22) не осуществлено, то выполняется пункт в. В противном случае на основе сформированного массива $\text{КМАС}(i1, t)$ вычисляется $F_{it}^*(x_{ikt}) = F_{it}(x_{i, (\text{КМАС}(i1, t), t)})$; $F_i = \sum_{t=1}^T F_{it}$.

4. Условие получения оптимального решения. Если на первом месте в массиве частичных решений оказывается решение, в котором зафиксированы варианты развития для всех ВЦ, то получено оптимальное решение, а алгоритм работу заканчивает (блок 7).

Рассмотренные модели и алгоритм использовались для оптимизации плана развития структуры конкретной ОСВЦ на период 15 лет с разбивкой по пятилеткам.

Исходя из конкретных требований отрасли, предполагается в течение первого и второго периодов планирования развивать всю сеть ВЦ, в третий период планирования — только ВЦ 1-го уровня, причем удовлетворение потребности в ИВР абонентов ВЦ 2-го уровня проводится за счет включения каналов связи между ВЦ 2-го уровня и соответствующими ВЦ 1-го уровня. R_i приняты равными нулю. Всего к концу планового периода должно быть создано 6 ВЦ 1-го уровня, 35 ВЦ 2-го уровня, ВЦ должны иметь сеть абонентских пунктов (АП). АП может находиться в одной из 6 категорий. Относительно сети АП вводятся следующие предположения: 1) затраты на создание локальной сети с АП IV—VI категорий включаются целиком в затраты соответствующего ВЦ в момент ввода его в строй; 2) затраты на ввод в строй АП I и II категории включаются в затраты соответствующего ВЦ пропорционально удовлетворению потребности данного ВЦ и ИВР.

Задача планирования развития структуры ОСВЦ при данных условиях имеет вид:

Найти минимум выражения

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{I_R} \left(\delta_j \sum_{k=1}^K \bar{q}_{jkt} x_{jkt} + \sum_{i \in I_j} \delta_i \bar{q}_{ikt} x_{ikt} \right), \quad (4.23)$$

где $q_{ikt} = \alpha Q_{it} - Q_k - L_{ikt}$, а $\bar{q}_{ikt} = q_{ikt}$, если $q_{ikt} > 0$, $q_{ikt} = 0$ в противном случае; $L_{ikt} = Q_k Q_i / \alpha Q_{it}$ — дополнительные мощности i -го ВЦ k -й категории в t -й период времени за счет вычислительных средств АП 1-й категории; Q_i — производительность всех АП 1-й категории i -го КВЦ; α — коэффициент пересчета объема ИВР в производительность ЦВМ, определяемый временем отладки, коэффициентом готовности и т. д.; δ_j — коэффициент, учитывающий важность j -го КВЦ.

При ограничениях на общие капитальные затраты, связанные с развитием сети в t -й период

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \mu_i ((R_k + M_{ikt}) x_{ikt} - (R_k - M_{ik(t-1)}) x_{ikt} + \varepsilon_i x_{i1(t-1)}) \leq R_t, \quad t = \overline{1, T}, \quad (4.24)$$

где $M_{ikt} = Q_k \bar{R}_i / \alpha Q_{it}$ — добавка к стоимости i -го КВЦ k -й категории в t -й период, вносимая введением в строй АП 1-й и 2-й категорий. Здесь \bar{R}_i — общие капитальные затраты на АП 1-й и 2-й категории i -го КВЦ; ε_i — стоимость локальной сети i -го КВЦ с АП IV—VI категорий и при ограничениях типа (4.14)—(4.16).

Оптимальный план развития данной ОСВЦ с использованием разработанных модели и алгоритма был получен за 10 мин на ЦВМ ICL 4-70. В результате решения задачи были определены общие затраты на развитие ОСВЦ, процент удовлетворения потребностей отрасли в ИВР, общая мощность ОСВЦ, динамика развития ОСВЦ по периодам планирования.

§ 4.4. Комплекс инвестиционных моделей развития структуры крупномасштабных систем и его использование

Для решения задач оптимального планирования развития крупномасштабных производственно-транспортных систем разработан комплекс моделей, в основу которого положена инвестиционная модель, рассмотренная в § 4.2. Комплекс состоит из библиотеки стандартных элементов модели, включающей более 30 типов различных ограничений и критериев, что позволяет решать достаточно широкий класс задач планирования [73].

Программное обеспечение для комплекса моделей позволяет сформировать расчетную модель оптимизации с использованием специализированного языка, на котором задается требуемый тип критерия и типы ограничений из библиотеки, а также пределы изменения индексов переменных и значения правых частей ограничений. В качестве расчетного блока применяется стандартное ма-

тематическое обеспечение решения задач смешанного целочисленного линейного программирования, параметры которого (точность вычисления оценок, величина отсечки, глубина просмотра и др.) задаются в зависимости от характера решаемой задачи и ее размерности. Разработан также комплекс сервисных программ, которые обеспечивают ввод и вывод информации в удобном для пользователя виде. Блок-схема программ комплекса показана на рис. 4.5. Библиотека некоторых из включенных в модель критериев и ограничений приведена в табл. 4.1.

В качестве примеров использования разработанных моделей рассмотрим задачи оптимизации очередности строительства и ввода мощностей комплекса атомных электростанций (АЭС) в европейской части СССР, а также оптимизации развития северной части ЕГС (связанной с комплексом Тюменских месторождений).

Программа строительства комплекса АЭС, намеченная на годы ближайших пятилеток (1976—1990 гг.) включает десятки АЭС (с энергоблоками различной мощности). В дальнейшем в европейской части СССР планируется увеличить выработку электроэнергии в основном за счет строительства АЭС [13].

Цель решения задачи — определение оптимального плана развития комплекса АЭС до 1990 г., включая

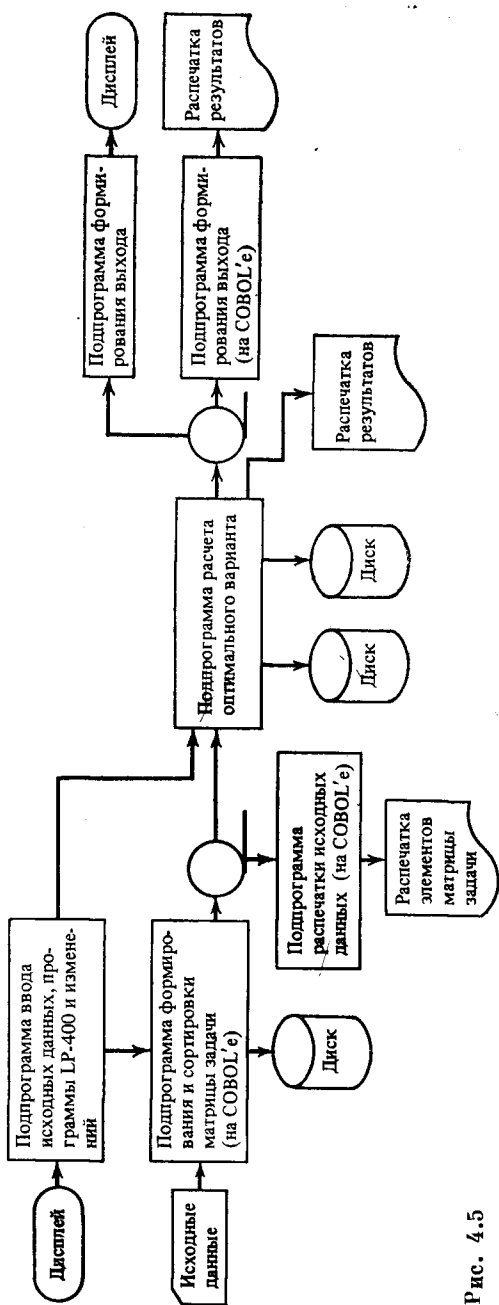


Рис. 4.5

Таблица 4.1

| Тип элемента модели | Формула | Формат ввода |
|--------------------------|--|--|
| Директивные сроки ввода | $\sum_{i=C}^D y_{it} \cong 1, i = \overline{A, B}$ | 06CDAB \cong |
| Технология | $\sum_{t=C}^{t_D} (y_{it} - y_{gt}) \cong 0$ $R_g(1 - \varepsilon) \geq R_g(y_{it} - y_{i, t-1}) - x_{g, t+1}, t = \overline{C, D}$ $R_g y_{it} - x_{gt+1} \geq 0; x_{gt} = 0, t = \overline{C, D}$ | 07igCD \cong 32igCD \leq 34igCD \geq |
| Строительная организация | $\sum_{i=A}^B x_{it} \leq R_t, t = \overline{C, D}$ $x_{it} \leq \beta_i R_i, i = \overline{A, B}, t = \overline{C, D}$ $\alpha_i \sum_{\tau=1}^{\tau < t} x_{i\tau} - \alpha_i R_i y_{it} + (\alpha_i - 1) x_{it} \leq 0$ | 09ABCD $\leq R_t$ 35ABCD $\leq \beta_i$ 36ABCD $\leq \alpha_i$ |
| Мощность | $P_{tH} \leq \sum_{i=A}^B P_i y_{it} \leq P_{tB}, t = \overline{C, D}$ | 37ABCD |
| Оборудование | $\sum_{(i, P_i = P_i^*) \in A, B} (y_{i, t+1} - y_{it}) \leq N_t^*, t = \overline{C, D}$ | 38ABCDN _t *P* |
| Директивы | $\sum_{t=C}^D z_{it} = 1; i = \overline{AB}$ | 41ABCD \cong |

Таблица 4.1 (продолжение)

| Тип элемента модели | Формула | Формат ввода |
|-----------------------------|--|---|
| Мощность | $P_{тн} \leq \sum_{i=A}^B P_i (y_{i,D} - y_{i,C-1}) + \sum_{i^*=AJ}^{AJ+NJ-1} \sum_{t=t_{нач}}^D z_{it} +$ $+ \sum_{m=m_{нач}}^{m_{кон}} P_{im} \leq P_{тB}; \quad t_{нач} = \max(1, C - L + 1);$ $m_{нач} = \max(1, C - t + 1); \quad m_{кон} = \min(L_i, D - t + 1)$ | $\left\{ \begin{array}{l} 44ABCD AJNJ \\ 44P_{тн} P_{тB} \end{array} \right.$ |
| Типы оборудования на год | $\sum_{i=AJ}^{AJ+NJ-1} \sum_{m: (T_{Pm}=\text{зад})}^{L_{it}} P_{i^*m} Z_{i^*, t-m+1} \leq N_{kt} P_t$ $L_{it} = \min(L_i, t); \quad t = \overline{C, D}$ | $45AJAJ + NJ - 1,$ $CD \leq TN_{kt}$ |
| Выбор типа эспуры | $\sum_{t=A}^B \sum_{t=C}^D z_{it} = 1$ | $46ABCD$ |
| Поток | $\sum_{t=C}^D t \left(\sum_{i^*=A_i}^{B_i} z_{it} - \sum_{j^*=A_j}^{B_j} z_{it} \right) \leq n_j - n_i - 1$ | $47A_i B_i CD \leq n_i n_j,$ $47A_j B_j$ |
| Типы оборудования на период | $\sum_{i=AJ}^{AJ+NJ-1} \sum_{t=t_{нач}}^D z_{it} \sum_{m: (T_{Pm}=\text{зад})}^{m_{кон}} P_{im} \leq N_{kt} P_t$ $t_{нач} = \max(1, C - L + 1),$ $m_{нач} = \max(1, C - t + 1),$ $m_{кон} = \min(L_i, D - t + 1)$ | $48AJAJ + NJ - 1$ $CD \leq TN_{kt}$ |

Таблица 4.1 (окончание)

| Тип элемента модели | Формула | Формат ввода |
|----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Зависимость СМР — ввод мощностей | $-R_i + \xi_i \leq R_i y_{it} - \sum_{\tau \leq t} x_{i\tau} \leq 0, \quad i = \overline{A, B}, \quad t = \overline{C, D}$ | 31 ABCD |
| Ресурсы | $\sum_{t=C}^D x_{it} \leq R_i, \quad i = \overline{A, B}$ | 08 CDAB ≤ |
| Критерии | $\max \sum_{i=A}^B \sum_{t=C}^D P_i y_{it}$ | 01 ABCD |
| | $\min \sum_{i=A}^B \sum_{t=C}^D x_{it}$ | 02 ABCD |
| | $\max \sum_{i=A}^B \sum_{t=C}^D \frac{x_{it}}{R_i} P_i$ | 03 ABCD |
| | $\max \sum_{i=A}^B \sum_{t=C}^D P_i y_{it} + \sum_{i=AJ}^{AJ+NJ-1} \sum_{t=C}^D z_{it} \times$ $\times \sum_{m=1}^L P_{im} (T - t - m + 2),$ $L = \min \{L_i, T - t + 1\}$ | 40 ABCDAJNJ |
| СМР | $\sum_{i=A}^B x_{it} + \sum_{i=AJ}^{AJ+NJ-1} \sum_{m=1}^{L_{it}} R_{im} z_{i, t-m+1} \leq R_t$ $t = \overline{C, D}; L_{it} = \min \{L_i, t\}$ | 43 ABCDAJNJ, 43 ≤ R _t |

выбор оптимальных продолжительностей строительства и последовательностей вводов энергоблоков на отдельных станциях.

Расчеты проводились с учетом ограничений на поставки основного оборудования, объемы строительно-монтажных работ для каждой АЭС, директивные задания и контрольные цифры по X пятилетке и до 1990 г., сроки и темпы вводов отдельных АЭС и т. п. Исходные данные к расчетам плана технологически обоснованы разработками по организации строительства на отдельных станциях-представителях. Исходные данные для решения задачи включают наименования АЭС, тип используемого реактора, проектную мощность, сметную стоимость, строительный задел на начальный период планирования, вариант эпюры развития станции.

Для рассматриваемой задачи общая постановка (4.1)–(4.7) детализируется следующим образом.

Пусть переменная $z_{ik} = 1$, если строительство i -й АЭС начинается в k -й период планирования, и $z_{ik} = 0$ в противном случае; P_{im} — ввод электрических мощностей в m -й период строительства i -й АЭС; R_{im} — объемы инвестиций в m -й период строительства i -й АЭС.

При оптимизации очередности строительства и ввода комплекса электростанций используется критерий максимизации прироста суммарной электрической мощности системы за заданный интервал времени (C, D):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=C}^D z_{ik} \sum_{m=1}^L P_{im} (K - k - m + 2) \rightarrow \max, \quad (4.25)$$

где $L = \min(L_i, K - k + 1)$, L_i — длительность строительства i -й станции; $K = D - C + 1$ — период планирования.

Ограничения в задаче таковы:

а) прирост мощности за период от C до D (например, за пятилетку) должен находиться в заданных пределах

$$P^A \leq \sum_{i=1}^I \sum_{k=k'}^D z_{ik} \sum_{m=m'}^{mH} P_{im} \leq P^B, \quad (4.26)$$

где $k' = \max\{1, C - L_i + 1\}$; $m' = \max\{1, C - k + 1\}$, $m'' = \min\{L_i, D - k + 1\}$;

б) число реакторов заданного типа по периодам планирования не должно превышать заданных величин

$$\sum_{i \in I_T} \sum_{m=1}^{L_{ik}} P_{im} z_{i, k-m+1} \leq N_{kT} P_T, \quad k = \overline{1, K}, \quad T = \overline{1, T}, \quad (4.27)$$

где N_{im} — допустимое число реакторов заданного типа, вводимых в период k , P_T — мощность реактора T -го типа; I_T — множество АЭС с реакторами T -го типа;

в) ограничения на последовательность строительства отдельных АЭС

$$\sum_{k=1}^K k (z_{ik} - z_{jk}) = n_i - n_j - 1 \quad (4.28)$$

(период n_j строительства j -й станции следует сразу после окончания периода n_i строительства i -й станции);

г) ограничения на директивные сроки ввода станций (строительство станций с номерами от $A1$ до $B1$ может быть начато в период от $C1$ до $D1$)

$$\sum_{k=C1}^{D1} z_{ik} = 1, \quad i = \overline{A1, B1}; \quad (4.29)$$

д) инвестиции, выделяемые на строительство, в k -й период планирования, не должны превосходить заданных величин

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{L_{ik}} R_{im} z_{i, k-m+1} \leq R_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad (4.30)$$

где $L_{ik} = \min \{L_i, k\}$.

Результаты решения задачи для одного из вариантов приведены в [4]. Такая задача имела 775 булевых переменных и 420 ограничений. Оптимальное решение было получено за 3 ч 10 мин на ЭВМ ICL 4-70.

Расчеты, проведенные с помощью инвестиционной модели, позволили получить оптимальный план ввода мощностей по всем АЭС на период планирования до 1990 г., обосновать ускорение темпов ввода мощностей и сократить число одновременно строящихся станций. Это позволило получить значительный экономический эффект.

В качестве другого примера применения инвестиционной модели рассмотрим задачу оптимизации развития единой газоснабжающей сети (ЕГС) страны и, в частности, интенсивно развиваемой в настоящее время северной части ЕГС, связанной с комплексом Тюменских месторождений. При этом рассматриваются производственные элементы двух типов (рис. 4.2): потребляющие газ (крупные города, узлы экспорта), для которых задан уровень потребления газа по периодам планирования P_{jk} ($J = \overline{1, J}; k = \overline{1, K}$), и газодобывающие элементы (месторождения, системы месторождений), характеризующиеся уровнем добычи P_{jk} ($j = \overline{1, J}; k = \overline{1, K}$). Элементы обоих типов связаны между собой сетью магистральных газопроводов, для которых заданы возможные варианты развития, с соответствующими пропускными способностями.

Задача состоит в определении динамики изменения уровня добычи газодобывающих элементов, величин и направлений газовых потоков по элементам транспортной сети и их развития (строительство новых газопроводов, расширение существующих) с учетом заданных уровней потребления в элементах системы и ресурсов, выделенных на развитие системы.

Для простоты изложения будем считать заданным уровень добычи и потребления в элементах системы.

Переменные и ограничения модели (4.7)–(4.12) в условиях рассматриваемой задачи интерпретируются следующим образом:

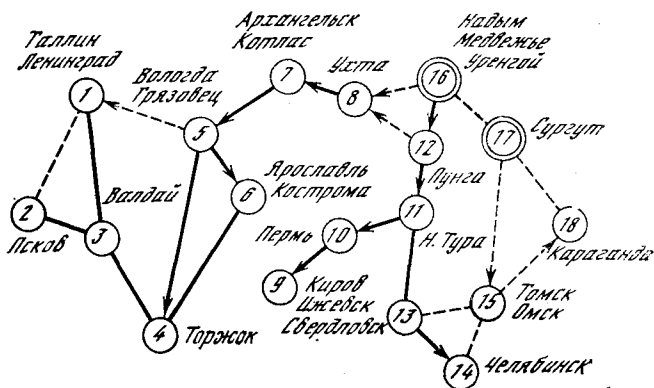


Рис. 4.6

$x_{(jj')k}$ — поток по газопроводу (jj') в k -й период планирования, $x_{(jj')k} \geq 0$; $z_{(jj')k}^l = 1$, если газопровод l -го типа начал строиться между элементами j и j' в k -й период планирования, и $z_{(jj')k}^l = 0$ — в противном случае. Различные типы газопроводов $l = 1, L$ могут отличаться количеством ниток и типоразмером труб, рабочим давлением, количеством и типом компрессорных станций, схемой соединения газоперекачивающих агрегатов и т. п. Отметим, что определение рациональных параметров газопровода для заданной пропускной способности является самостоятельной задачей и решается на основе методики, разработанной в ВНИИЭГАЗПРОМ [15].

Оптимизация плана развития ЕГС проводилась с учетом следующих обстоятельств. Потребность в газе в j -м элементе в k -й период планирования удовлетворяется (выражение (4.8)); общий поток газа по газопроводу между элементами j и j' не должен превышать пропускную способность газопровода (выражение (4.9)); инвестиции на развитие системы в k -й период планирования ограничены (выражение (4.10)); заданы директивные сроки вводов газопроводов между узлами j и j' (выражение (4.11)).

При решении задачи использовался критерий минимизации полных приведенных капитальных и эксплуатационных затрат на строительство и функционирование сети газопроводов за время K

$$\min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{(jj') \in \Theta} (Q_{(jj')k} x_{(jj')k}) + \sum_{l=1}^L P_{(jj')k}^l z_{(jj')k}^l \right\}, \quad (4.34)$$

где $Q_{(jj')k}$ — удельные эксплуатационные затраты на передачу газа между пунктами j и j' в k -й период планирования; $P_{(jj')k}^l$ — капитальные затраты на строительство газопровода l -го типа между пунктами j и j' при условии, что строительство его начато в k -й период планирования. Величины $Q_{(jj')k}$ и $P_{(jj')k}^l$ вычисляются с учетом дисконтирования разновременных затрат.

Оптимизация проводилась для части ЕГС, представленной на рис. 4.6. Здесь пунктиром показаны вновь строящиеся участки

газопровода, для ряда участков направление потока не было задано (ненаправленные дуги графа). Рассматриваемая задача имела 72 непрерывные переменные, 150 булевых переменных и 157 ограничений. Оптимальное решение было получено за 1 ч 15 мин на ЦВМ ICL 4—70. В результате решения задачи были определены оптимальные сроки строительства и варианты (диаметр труб, типы агрегатов и др.) газопроводов, а также динамика газовых потоков по годам планируемого периода.

Рассмотренный комплекс моделей позволяет проводить оптимизацию и анализ вариантов инвестиционных программ развития крупномасштабных производственно-транспортных систем при различных исходных данных и при различных критериях оптимальности. С его помощью была проведена также серия расчетов долгосрочных программ строительства тепловых электростанций для Северо-Западной ОЭС, Экибастузского энергетического комплекса, развития электроэнергетики Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК). Решавшиеся оптимизационные задачи имели от 225 переменных и 140 ограничений до 1600 переменных и 625 ограничений (из них не менее 40% переменных были булевы). Время решения на ЦВМ ICL 4—70 существенно зависело от состава учитываемых ограничений и значений исходных данных и колебалось от 40 мин до 5—6 ч. Для задач существенно большей размерности целесообразно использовать специализированные алгоритмы, основанные, например, на подходе, развиваемом в [58].

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ И СИНТЕЗЕ СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

§ 5.1. Введение

Учет динамики функционирования систем на этапах анализа и синтеза их структуры приводит к необходимости совместного использования оптимизационных и имитационных моделей. Это объясняется тем, что для формализации динамики функционирования элементов систем и их совокупностей для большинства практических задач могут быть применены лишь имитационные модели.

Исследования в данных направлениях только начинают развиваться, и на этом пути несомненно будут получены новые интересные результаты. С математической точки зрения рассматриваемые задачи относятся к классу задач математического программирования, в которых ряд ограничений задан не в явном виде, а алгоритмически с помощью имитационной модели.

Использование оптимизационных и имитационных моделей для синтеза структуры сложных систем может осуществляться различными способами, что во многом определяется спецификой рассматриваемых задач, степенью их формализованности, размерностью задач и другими факторами. При этом возникает проблема рационального сочетания оптимизационных и имитационных моделей для синтеза структуры сложных систем, что приводит к специфическим итеративным процедурам поиска рациональных вариантов структуры системы.

Важными вопросами при организации комплекса моделей и программ для оптимизации структурного построения сложных систем с использованием оптимизационных и имитационных моделей являются: разработка языков постановки задач и стандартизация описания элементов систем, их взаимосвязей и правил функционирования (различные подходы к решению данной проблемы рассмотрены в гл. 1); организация взаимодействия пользователя с оптимизационными и имитационными блоками; анализ результатов решения, в том числе на их устойчивость, а также по заданным технико-экономическим характеристикам и др.

Ниже обсуждаются методологические вопросы имитационного моделирования, основные этапы разработки и использование имитационной модели и рассматриваются возможные схемы совместного использования имитационных и оптимизационных моделей при синтезе структуры систем. Использование имитационной модели позволяет учесть на этапе синтеза структуры не только ста-

тические взаимосвязи между элементами структуры, включенные в оптимизационную модель, но и динамические аспекты функционирования системы.

Анализируются различные подходы к совместному использованию оптимизационных и имитационных моделей при синтезе структуры систем. Рассматривается итеративная процедура синтеза структуры, включающая оптимизационную и имитационную модели.

Для построения имитационных моделей широко используются различные языки моделирования, а в последнее время все большее значение приобретают системы имитационного моделирования. Одним из основных требований к имитационным системам является их унификация, ориентация на распространенные ЭВМ и операционные системы. При создании и использовании таких систем важными, но мало разработанными остаются вопросы чувствительности, устойчивости и точности результатов моделирования. Для работы с моделью необходимо иметь не только традиционные средства моделирования, но и программы, обеспечивающие решение задач идентификации параметров и структуры модели, планирования машинных экспериментов, решающие задачи оптимизации, композиции и декомпозиции. Современные имитационные системы отличает активное участие человека в процессе моделирования. Это налагает на средства диалога повышенные требования.

Приводятся примеры исследования систем с использованием оптимизационных и имитационных моделей.

§ 5.2. Методы выбора вариантов построения сложных систем с использованием имитационных и оптимизационных моделей

Использование имитационного моделирования при проектировании сложных систем вызвано необходимостью учета динамических характеристик функционирования проектируемых систем, который затруднен или невозможен в традиционных оптимизационных моделях синтеза структур систем. При синтезе оптимальной структуры сложных систем выполнение ряда ограничений может быть проверено лишь алгоритмически, что приводит к необходимости поиска оптимального решения с использованием оптимизационных и имитационных моделей.

В то же время применение методов имитационного моделирования позволяет проанализировать только незначительное количество вариантов изучаемой системы и выбрать среди них в определенном смысле более приемлемый. Простым перебором вариантов такая задача эффективно не может быть решена, особенно в тех случаях, когда число возможных вариантов неограниченно, так как не определены механизм порождения вариантов и правило окончания перебора. Возникает задача направленного перебора или

направленного моделирования, при котором процесс перебора вариантов приводит к оптимальному.

Возможны различные процедуры поиска оптимального варианта структуры системы. Обычно эти процедуры содержат следующие шаги: анализ исходных данных; формулировка задачи синтеза структуры; формирование множества перспективных для анализа вариантов структуры, полученных в результате решения оптимизационной модели (в это множество входят оптимальный и субоптимальные варианты); имитация функционирования системы с каждым из перспективных вариантов структуры для получения оценок качества функционирования системы; проверка выполнения требований к качеству функционирования системы, если требования выполняются, то вариант заносится в множество рациональных вариантов; выбор лучшего из множества рациональных вариантов. При невыполнении требований к качеству функционирования всеми перспективными вариантами результаты имитации используются для коррекции оптимизационной модели.

Другой схемой совместного использования оптимизационных и имитационных моделей является включение имитационного блока в алгоритм типа «ветвей и границ» для решения оптимизационной модели при нахождении оценок задачи и при оценке полных решений.

В приведенных выше схемах имитационные модели используются для анализа решений, полученных на оптимизационных моделях, на основе статистических оценок динамических характеристик функционирования системы. Имитационные модели также используются самостоятельно для анализа структур исследуемой системы. Целями анализа могут быть: определение структурных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на эффективность функционирования системы, установление характера взаимосвязей между компонентами системы и т. д.

Как отмечалось выше, при оптимизации структуры сложных систем возникающие задачи синтеза структуры с учетом динамики функционирования элементов системы только в простейших случаях могут быть решены аналитическими методами. Для получения требуемой точности при использовании имитационного моделирования для оптимизации структуры при вычислении каждого значения целевой функции при неизменных значениях параметров приходится моделировать поведение системы на протяжении интервала времени, достигающего обычно нескольких сотен или даже тысяч единиц условного времени. В зависимости от сложности моделируемой системы время моделирования одного элементарного цикла при применении ЦВМ среднего быстродействия занимает от 0,1 до 10 с. Тогда при получении одного значения целевой функции требуется время от 1 до 15 мин машинного времени. Так как при решении оптимизационной задачи приходится испытывать множество значений каждого параметра и различные сочетания значений изменяемых параметров, на решение задачи требуется несколько часов машинного времени.

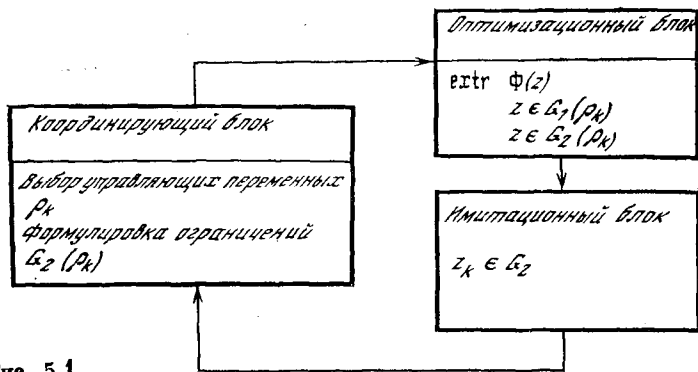


Рис. 5.1

Если решение задачи должно осуществляться однократно или оптимизация выполняется для небольшого числа вариантов, то такое исполнение моделирования оказывается приемлемым. Если же оптимизации подлежит большое число вариантов, то решение задач оказывается неосуществимым из-за большого расхода машинного времени.

В [29] предлагается заменить моделирование оптимизируемой системы моделированием типовой схемы с целью выявления приближенных закономерностей зависимости целевой функции от изменяемых параметров. Для получения конкретных результатов, касающихся оптимизации самой системы, применяются не данные непосредственного моделирования, а эмпирические зависимости, полученные в процессе моделирования типовой схемы.

Пусть исходная задача оптимизации имеет следующий вид:

$$\text{extr } \Phi(z), \quad z \in G_z, \quad (5.1)$$

и пусть множество G_z задано ограничениями двух типов

$$G_1(z) \leq \mathfrak{M}, \quad z \in G_1, \quad (5.2)$$

заданном в явном виде и

$$P(z) \leq P_0, \quad z \in G_2, \quad (5.3)$$

заданном алгоритмически.

Для решения данной задачи обычно используется итеративная схема (рис. 5.1). Оптимизационный блок такой схемы на k -м шаге решает редуцированную задачу $\text{extr } \Phi(z)/z \in G_1(\rho); z \in G_2(\rho)$, здесь ρ — вектор управляемых переменных, изменяемых при переходе от итерации к итерации; $G_2(\rho)$ — множество ограничений, задаваемых на основе анализа результатов имитации. Имитационный блок осуществляет проверку ограничений, заданных алгоритмически, для найденного оптимизационным блоком решения. Заметим, что имитационный блок, в свою очередь, может содержать оптимизационные блоки, осуществляющие поиск оптималь-

ных параметров функционирования системы, управляя доступными параметрами ω (т. е. в общем случае $P(z, \omega) \leq P_0$).

Наряду с этой схемой для решения задачи (5.1)—(5.3) может быть использована схема «ветвей и границ». Использование для решения задачи синтеза оптимальной структуры системы схемы «ветвей и границ» позволяет в процессе ветвления учитывать ограничения, заданные алгоритмически. Критерий (5.1) и ограничения (5.2) учитываются в процессе ветвления, а ограничения (5.3) проверяются с помощью имитации при достаточном числе зафиксированных переменных (для незафиксированных переменных при этом используются «наиболее» или соответственно «наименее» благоприятные условия (характеристики при имитации)). При этом в соответствии с требованиями схемы «ветвей и границ» должно выполняться условие $z \subset \bar{G}_z$ по G_z .

Рассмотрим взаимосвязь между итеративной процедурой и схемой «ветвей и границ». Как отмечалось выше, при использовании итеративной процедуры возможны следующие условия:

1. Оптимальное решение редуцированной задачи проверяется на допустимость по ограничениям, заданным алгоритмически; если оно допустимо, то полученное решение оптимально для исходной задачи.

2. Если решение редуцированной задачи не удовлетворяет ограничениям, заданным алгоритмически, то в соответствии с итеративной схемой (рис. 5.1) генерируется множество задач, для которых определяется новое решение.

3. Если список анализируемых задач на некотором шаге пуст, то найдено рациональное (оптимальное) решение.

Очевидно, что в зависимости от того, как осуществляется генерация множества вариантов, анализируемых на следующих шагах итеративной схемы, получаемое решение может быть глобально или локально оптимальным.

Если при генерировании множества задач для них могут быть найдены соответствующие оценки, то итеративная процедура эквивалентна решению задач по схеме «ветвей и границ».

Если определить оценки без решения соответствующих оптимизационных и имитационных задач затруднительно, то итеративная схема может быть эквивалентна некоторой схеме «ветвей и границ» с проверкой алгоритмически заданных ограничений лишь на последнем уровне ветвления, когда полностью зафиксированы переменные для некоторого решения.

С вычислительной точки зрения интересно провести сравнение поиска глобального решения исходной задачи с помощью итеративной схемы (включающей последовательное решение оптимизационных и имитационных задач) и процедуры, использующей схему «ветвей и границ», в которой выполнение алгоритмически заданных ограничений проверяется с помощью специального имитационного блока (на промежуточных этапах и для полного решения) при оценке допустимости рассматриваемых решений.

Пусть в обоих случаях необходимо проанализировать одно и то же число вершин нижнего уровня (α % от их суммарного числа). Предположим также, что дерево ветвления имеет M уровней $(1, \dots, m, \dots, M)$ и коэффициент ветвления на каждом уровне равен k . Пусть $t^{\text{опт}}$ — среднее время решения оптимизационной задачи, $t^{\text{им}}$ — среднее время имитации для известного решения оптимизационной задачи, предполагается, что среднее время имитации не зависит от уровня ветвления.

Среднее время поиска оптимального решения для процедуры, использующей для решения задачи синтеза оптимальной структуры схему «ветвей и границ» с включением имитационного блока, равно $t^{\text{опт}} + \alpha S_M t^{\text{им}}$, где S_M — число вершин, просмотренных в процессе ветвления. Величина $S_M \simeq (1 - k^M)/(1 - k)$.

Среднее время поиска оптимального решения в случае итеративной процедуры равно $\alpha K^M (t^{\text{опт}} + t^{\text{им}})$. Легко видеть, что при сделанных предположениях, если $t^{\text{опт}} \sim t^{\text{им}}$, то стратегия, использующая схему «ветвей и границ», оказывается более экономичной по расходу суммарного процессорного времени ЦВМ. В приведенных рассуждениях не учитывалась ограниченность памяти ЦВМ, а также то, что размерность имитационной модели может изменяться с уровнем ветвления.

Представляет практический интерес также сравнение этих процедур с точки зрения затрат машинного времени при поиске рациональных вариантов с заданным уровнем приближения к оптимальному.

Развитие обоснованных, направленных процедур поиска оптимального решения в задачах моделирования может быть выполнено с использованием так называемых прямых методов стохастического программирования [21]. Если с каждым вариантом x системы, характеризуемым набором параметров x_1, \dots, x_n , связаны числовые параметры $f^i(x, \omega)$, $i = 0, 1, \dots, m$, зависящие также от случайных параметров, то в процессе моделирования наблюдаются при каждом x случайные значения $f^i(x, \omega)$, $i = 0, 1, \dots, m$, зависящие от реализации ω . При этом при оценке параметров функционирования системы часто возникает необходимость найти такое x , при котором среднее значение параметра $f^0(x, \omega)$ принимает наименьшее значение при определенных ограничениях на средние значения остальных параметров $f^i(x, \omega)$, $i = 1, 2, \dots, m$. Таким образом, возникает задача минимизации функции

$$F^0(x) = Mf^0(x, \omega)$$

при ограничениях

$$F^i(x) = Mf^i(x, \omega) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad x \in X,$$

где X — множество возможных вариантов системы.

Приведенная задача является задачей стохастического программирования, однако здесь при каждом x отсутствует возможность вычислить точные значения функций $F^i(x)$, $i = 0, 1, \dots, m$. Вместо значений $F^i(x)$ в процессе моделирования наблюдаются

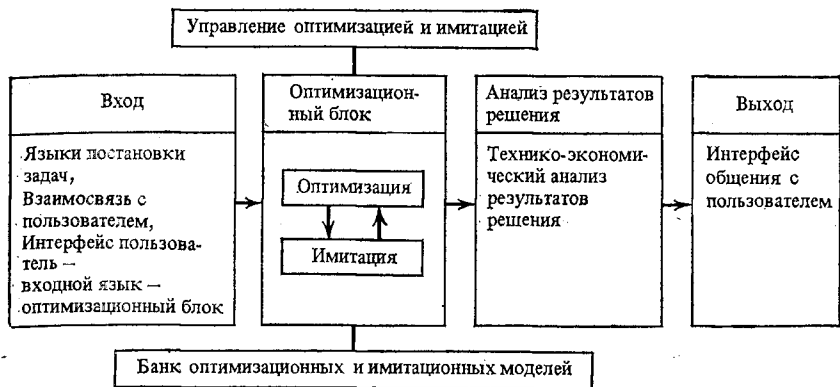


Рис. 5.2

отдельные случайные реализации величин $f^i(x, \omega)$, $i = 0, 1, \dots, m$.

Метод стохастической аппроксимации [21] позволяет минимизировать функцию $Mf^0(x, \omega)$ по наблюдениям величин $f^0(x, \omega)$ без ограничений на величины $f^i(x, \omega)$, $i = \overline{1, m}$. Состоит он в том, что при минимизации функции $Mf^0(x, \omega)$ пользуются антиградиентом функции $f^0(x, \omega)$, т. е. для поиска оптимального x строят итеративный процесс

$$x^{s+1} = x^s - \rho_s \text{grad } f^0(x^s, \omega^s), \quad s = 0, 1, \dots,$$

где x^0 — произвольное начальное приближение; x^s — приближение после s -й итерации; ρ_s — величина шага; ω^s — s -я реализация модели.

Показано, что последовательность точек x^s , $s = 0, 1, \dots$, стремится к точке экстремума функции $Mf^0(x, \omega)$. Эта сходимость обеспечивается, если функция $Mf^0(x, \omega)$ имеет ограниченные вторые производные. Однако в большинстве практически важных случаев функции $Mf^0(x, \omega)$ не являются непрерывно дифференцируемыми, более того, их аналитический вид неизвестен. Здесь оказываются полезными методы стохастических квазиградиентов, при которых направление перебора вариантов определяется итерационным процессом [21]

$$x^{s+1} = x^s - \rho_s \xi^s, \quad s = 0, 1, \dots,$$

где x^0 и ρ_s — по-прежнему начальное приближение и величина шага спуска, а ξ^s — некоторый случайный вектор, математическое ожидание которого почти совпадает с градиентом или квазиградиентом функции $Mf^0(x, \omega)$.

Таким образом, методы стохастической оптимизации предполагают наличие удобных средств моделирования систем и в то же время являются инструментом направленного поиска оптимальных решений.

Основные компоненты комплекса моделей и программ для оптимизации структурного построения сложных систем с использованием оптимизационных и имитационных моделей приведены на рис. 5.2.

§ 5.3. Оптимизация структуры автоматизированных информационно-управляющих систем для задач оперативного типа

В данном параграфе рассматриваются модели синтеза структуры систем, в которых для оценки качества выбираемого варианта структуры существенна динамика функционирования элементов системы. Основные задачи, возникающие при выборе структуры и исследовании динамики функционирования системы управления, рассматриваются на примере автоматизированной системы оперативного управления нефтеперерабатывающего завода [70].

Задача синтеза структуры системы оперативного управления состоит в определении оптимального числа уровней иерархии, оптимальном распределении множества решаемых задач по уровням и узлам системы управления и выборе технических средств из заданного множества, наилучшим образом удовлетворяющих заданному критерию, т. е. имеющих необходимое быстродействие, надежность и т. д. При этом на систему могут быть наложены дополнительные ограничения по общей стоимости реализации системы, числу узлов управления и т. п. Рассматриваемые системы оперативного управления имеют иерархическую структуру и должны быть построены так, чтобы оперативно управлять технологическим процессом, а это, в свою очередь, зависит от таких характеристик диспетчерских пунктов, как быстродействие, надежность и т. д. Поэтому необходимо обеспечить такое функционирование системы, при котором минимизируются потери, включающие в себя, с одной стороны, потери, вызванные отказами аппаратуры, недостаточным быстродействием и т. п., а с другой стороны — затратами на реализацию и эксплуатацию системы.

На узлы первого уровня рассматриваемой системы поступают потоки требований с объектов в некоторые случайные моменты времени в соответствии с заданными законами распределения. Потоки могут быть либо неограниченными, либо состоять из конечного числа требований. Обслуживание требования длится случайный промежуток времени с заданной функцией распределения. К моменту окончания обслуживания приурочено управляющее воздействие на объект и передача требований на следующий уровень. Выходящий поток образуется из последовательности обслуженных требований различных входящих потоков и из требований, покидающих систему или очередь до окончания обслуживания.

Связи между различными потоками узлов формализуются в виде альтернативного графа G_0 следующим образом (рис. 5.3): обслуженные требования некоторого типа i -го узла вызывают

появление требований на нескольких узлах j либо на одном из нескольких возможных узлов в соответствии с заданными вероятностями.

Анализ системы позволяет по характеру взаимосвязей между задачами на различных уровнях и по загрузке различных уровней оперативными задачами выделить следующие модели (рис. 5.4.): 1) иерархические системы сбора и первичной обработки информации.

В этой модели задается поток требований с объекта, подлежащий обслуживанию. В каждом из узлов системы происходит сбор и обработка информации, при этом на следующий уровень поступает лишь некоторая часть обслуженных требований. Подобная модель соответствует системам, в которых управление не оказывает существенного влияния на загрузку низших уровней; 2) системы, в которых поток управляющих воздействий с высших уровней оказывает существенное влияние на загрузку низших, а этап сбора и обработки информации не оказывает влияния на загрузку системы; 3) системы, в которых существенны как сбор и обработка информации на каждом из уровней, так и управляющие воздействия с высших уровней на низшие. Заметим, что этап сбора и обработки информации и обслуживание выявленных требований может выполняться различными средствами.

Для формализации задачи выбора структуры многоступенчатых систем оперативного управления и определения быстродействия узлов системы разработаны модели и методы с использованием аналитических методов теории массового обслуживания и имитационного моделирования. Для оптимизации распределения выполняемых системой задач по уровням и узлам системы в данном параграфе используется отображение \mathfrak{M} типа B (см. § 2.4).

В общем случае рассматриваемые системы исследуются путем имитации с использованием методов статистического моделирования. Однако при некоторых предположениях для оптимизации структурных параметров систем возможно применение методов теории массового обслуживания.

В различные узлы системы поступают разреженные потоки требований от нескольких узлов предыдущего уровня, образующий суммарный поток во многих случаях можно считать простейшим, что позволяет исследовать работу данного узла независимо от работы узлов предыдущего уровня. Потоки требований от многочисленных объектов на узлы первого уровня также дают основание считать их простейшими.

В качестве критерия работы i -го узла системы в установившемся режиме используются средние потери в единицу времени

$$W_i = \alpha_i q_i + \beta_i, \quad (5.4)$$

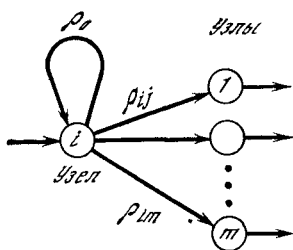


Рис. 5.3

здесь q_i — среднее число требований в узле *. Эта величина зависит от быстродействия и надежности технических устройств узла, порядка выбора требований на обслуживание и т. д. Коэффициент α_i есть среднее значение потерь производства в единицу времени из-за пребывания требования в системе обслуживания данного узла. Таким образом, первое слагаемое (5.4) представляет суммарные потери производства в единицу времени из-за задержек в передаче управляющих воздействий от данного узла к нижестоящим. Второе слагаемое (5.4) представляет собой расходы в единицу времени на эксплуатацию данного узла системы управления.

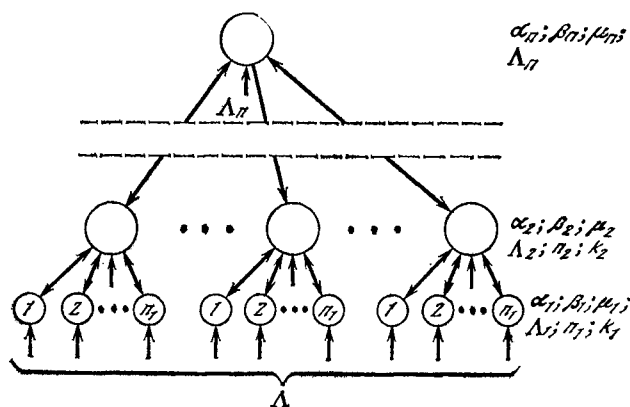


Рис. 5.4

Общие издержки производства определяются суммированием потерь (5.4) по всем узлам. Подсчет величины общего критерия функционирования системы упрощается, если иерархическая структура однородна, т. е. характеристики узлов одного уровня одинаковы, и к каждому узлу подключено одинаковое для данного уровня число узлов предыдущей. Тогда

$$W(m) = x_{m-1} W(m-1) + W_m, \quad (5.5)$$

где $W(m)$ — величина критерия для m -уровневой системы; $W(m-1)$ — соответствующие потери для составляющих ее подсистем $(m-1)$ -го порядка, всего таких подсистем x_{m-1} ; W_m — потери в узле высшего уровня.

* В системах с неограниченной во времени памятью и пуассоновским потоком требований с интенсивностью λ средние удельные потери равны

$$W = \lambda \int_0^{\infty} c(v) dB(v), \text{ где } B(v) \text{ — функция распределения длительности пребы-}$$

вания требований в системе; $c(v)$ — функция потерь. В общем случае зависимость $c(v)$ — нелинейная, но часто считают, что $c(v) = cv$, тогда $W = c\lambda\bar{v}$. В случае пуассоновского потока $q = \lambda\bar{v}$, поэтому $W = cq$. Эта формула верна и для систем с непуассоновским ограниченным потоком требований.

Из рекуррентного соотношения (5.5) следует

$$W(m) = \sum_{i=1}^m W_i \prod_{j=1}^m x_j, \quad (5.6)$$

где x_j — число узлов j -го уровня, подключаемых к одному узлу $(j+1)$ -го уровня.

Если все потоки простейшие, длительности обслуживания распределены по показательным законам, перед узлами допускаются неограниченные очереди, узлы надежны и каждое требование независимо от других с равной вероятностью может быть передано на следующий уровень, то это позволяет получить оценки значений критерия (5.6) для различных вариантов построения системы управления и провести предварительный отбор наиболее перспективных вариантов.

В рассматриваемой показательной стохастической сети среднее число требований в системе обслуживания i -го узла равно $q_i = \rho_i (1 - \rho_i)^{-1}$, $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$, где λ_i и μ_i — интенсивности потока требований и обслуживания. Если сеть однородна (рис. 5.4), то интенсивность входящего простейшего потока требований на любой узел i -го уровня равна

$$\lambda_i = \Lambda / \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=1}^m x_j, \quad (5.7)$$

где Λ — общая интенсивность потока требований от всего комплекса объектов; k_j — степень разрежения выходящего потока требований с узла j -го уровня (с вероятностью $1/k_j$ обслуженное на j -м уровне требование передается на $(j+1)$ -й уровень). Тогда в силу (5.6) имеем

$$W(m) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \Lambda \left(\left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=1}^m x_j - \Lambda \right)^{-1} + \beta_i \right) \prod_{j=1}^m x_j. \quad (5.8)$$

Если задаться числом уровней и характеристиками узлов уровня (α_i , β_i , μ_i , k_i), то на основании (5.8) можно определить оптимальные параметры структуры системы, т. е. найти такие значения x_i^* ($i = \overline{1, m-1}$), $x_m = 1$, при которых $W(m)$ минимально. Из (5.8) получаем систему уравнений относительно оптимальных значений x_i^* :

$$\alpha_i \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=1}^m x_j^* - \Lambda \right)^{-1} = \beta_i, \quad i = \overline{1, m-1}. \quad (5.9)$$

Ее решением является рекуррентное соотношение

$$x_i^* = \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=i+1}^m x_j^* \right)^{-1} (1 + \sqrt{\alpha_i / \beta_i}), \quad (5.10)$$

позволяющее последовательно вычислить значения x_i^* от x_{m-1}^* до x_1^* . Полученные значения x_i^* округляются до ближайших целых чисел, а возможная неоднозначность решения устраняется непосредственным расчетом по формуле (5.8).

Если стоимость эксплуатации узлов i -го уровня пропорциональна его интенсивности обслуживания требований, т. е.

$$\beta_i = \gamma_i \mu_i + \delta_i, \quad (5.11)$$

то оптимальное значение интенсивностей обслуживания (аналогично исследуется случай нелинейной зависимости затрат на создание системы от ее быстродействия) равно

$$\mu_i^* = \Lambda \left(\prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=1}^m x_j \right)^{-1} + \sqrt{\alpha_i \Lambda \left(\gamma_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=1}^m x_j \right)^{-1}}. \quad (5.12)$$

В неоднородной линейной стохастической сети оптимальная интенсивность обслуживания i -го узла определяется, как и (5.12), по формуле $\mu_i^* = \lambda_i + \sqrt{\lambda_i \alpha_i / \gamma_i}$.

Рассмотрим оптимизацию структуры системы с характеристиками, близкими к тем, которые встретились при проектировании системы управления нефтеперерабатывающего завода [70]. Требуется построить двухуровневую систему управления с одним центральным диспетчерским пунктом (ЦДП) и несколькими ДП для комплекса объектов, суммарная интенсивность потока требований с которых $\Lambda = 36$ треб./ч. Число ДП и быстродействие аппаратуры ЦДП следует найти из расчета. Предполагается, что для ЦДП справедливо соотношение (5.11). Заданы следующие характеристики: $\alpha_1 = 70$ руб./ч, $\beta_1 = 10$ руб./ч, $\mu_1 = 35$ 1/ч, $k_1 = 25$, $\alpha_2 = 200$ руб./ч, $\gamma_2 = 30$ руб. По (5.10) находим $x_1^* = 4$, а по (5.12) — $\mu_2^* = 4,54$. Зависимость функционала потерь (5.8) для данной системы от значений x_1 и μ_2 показана на рис. 5.5. Заметим, во-первых, что быстродействие аппаратуры ЦДП определяется из того факта, что требования на втором уровне должны в среднем обслуживаться за время $1/\mu_2^*$, во-вторых, на i -м узле сети загрузка ЦВМ обработкой оперативной информацией составляет долю времени $\rho_i < 1$; остальное время ЦВМ может быть загружена расчетами, непосредственно не связанными с оперативным управлением производством. Это значит, что требования на обработку оперативной информации обладают абсолютным приоритетом в обслуживании перед любыми другими требованиями. Подробней вопрос загрузки реальных систем управления рассмотрен ниже. На рис. 5.6 показан график, иллюстрирующий зависимость средних удельных потерь в двухуровневой системе в зависимости от числа узлов первого уровня при различном быстродействии вычислительных средств первого уровня (0,5 μ , 0,75 μ , μ и 2 μ) для случая, когда затраты β_i пропорциональны быстродействию (5.11).

Рассмотрим модель системы, в которой этап сбора и первичной обработки информации не оказывает существенного влияния

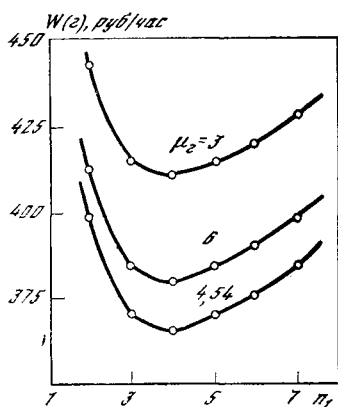


Рис. 5.5

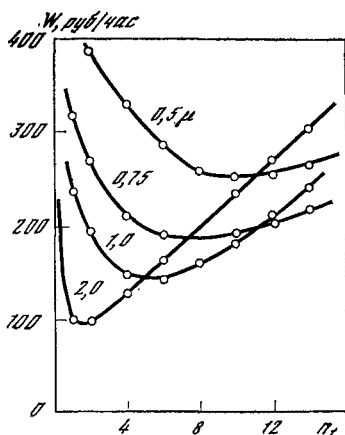


Рис. 5.6

на работу системы и заканчивается выявлением требований на обслуживание. Будем считать, что на каждый из уровней иерархии поступает суммарный поток требований Λ_i ($i = \overline{1, m}$). Обслуживание требований в i -м узле j -го уровня заканчивается выдачей управляющих воздействий на нижние уровни и вызывает появление требований на обслуживание в узлах более низкого уровня, подчиненных данному. Каждое обслуженное требование на некотором уровне может вызвать необходимость в обслуживании на более низких уровнях.

Используя обозначения рис. 5.4, найдем, что поток требований на обслуживание, поступающий на любой узел i -го уровня, равен $\lambda_i = \sum_{j=1}^m \Lambda_j / \prod_{j=i}^{m-1} x_j$, $i = \overline{1, m}$, где x_j — число узлов более низкого уровня, управляемых с одного узла более высокого уровня; m — общее число уровней.

Общие издержки в данной системе в единицу времени равны

$$W(m) = \sum_{j=1}^m \left[\left(\alpha_j \sum_{j=1}^m \Lambda_j \right) / \left(\left(\mu_i \prod_{j=1}^{m-1} x_j - \sum_{j=1}^m \Lambda_j \right) + \beta_i \right) \right] \prod_{j=1}^m x_j. \quad (5.13)$$

Если задаться числом уровней и характеристиками узлов (α_i , β_i , μ_i , Λ_i), то можно определить оптимальные параметры структуры системы x_i^* , $i = \overline{1, m-1}$, $x_m = 1$, при которых $W(m)$ минимально.

Отсюда получаем систему уравнений

$$\alpha_i \sum_{j=1}^m \Lambda_j / \left(\mu_i \prod_{j=i}^m x_j^* - \sum_{j=i}^m \Lambda_j \right) = \beta_i, \quad i = \overline{1, m-1}. \quad (5.14)$$

Ее решением является рекуррентное соотношение

$$x_i = \left(\sum_{j=1}^m \Lambda_j \right) (1 + \sqrt{\alpha_i / \beta_i}) \left(\mu_i \prod_{j=i+1}^m x_j^* \right)^{-1}, \quad i = \overline{1, m-1}, \quad (5.15)$$

что аналогично результату, полученному выше, если заменить $\Lambda \left(\sum_{j=1}^{i-1} k_j \right)^{-1}$ на $\sum_{j=i}^m \Lambda_j$. Заметим, что данная замена справедлива и для формул по выбору других оптимальных параметров системы, например, если $\beta_i = \gamma_i \mu_i + \delta_i$, то оптимальное значение интенсивности обслуживания на приборах i -го уровня

$$\mu_i^* = \left(\sum_{j=i}^m \Lambda_j \right) / \left(\prod_{j=i}^m x_j \right) + \sqrt{\left(\alpha_i \sum_{j=1}^m \Lambda_j \right) / \left(\gamma_i \prod_{j=1}^m x_j^* \right)}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (5.16)$$

Рассмотрим решение задачи с учетом различных ограничений.

Пусть, во-первых, число узлов в системе не должно превышать заданного значения N , т. е.

$$\sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^m x_j \leq N, \quad n_m = 1. \quad (5.17)$$

Если набор x_i^* , полученный, например, из (5.10), не удовлетворяет этому соотношению, то определяется новый набор $\{\bar{x}_i\}$, обеспечивающий минимум $W(m)$ при условии выполнения (5.17). Используя метод множителей Лагранжа, полагая, что x_i ($i = \overline{1, m-1}$, $m \geq 3$) — непрерывные переменные, получим, что функция Лагранжа для данной задачи принимает вид

$$F(x_1, \dots, x_{m-1}, f) = W(m) + fg, \quad (5.18)$$

где $g = \sum_{i=1}^m \prod_{j=i}^m x_j - N$, а f — множитель Лагранжа. Искомые величины равны

$$\bar{x}_i = \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=i+1}^m \bar{x}_j \right)^{-1} (1 + \sqrt{\alpha_i (\beta_i + f)^{-1}}), \quad i = \overline{1, m-1}, \quad (5.19)$$

причем f находим из уравнения

$$\sum_{i=1}^{m-1} \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} x_j \right)^{-1} (1 + \sqrt{\alpha_i (\beta_i + f)^{-1}}) = N - 1. \quad (5.20)$$

Пусть расходы на эксплуатацию системы, приведенные к выбранной единице времени, не должны превышать некоторой ве-

личины c , т. е.

$$g = \sum_{i=1}^m \beta_i \prod_{j=i}^m x_j - c = 0, \quad n_m = 1. \quad (5.21)$$

При таком ограничении искомые параметры оптимальной структуры системы определяются соотношениями

$$\bar{x}_i = \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=i+1}^m x_j \right)^{-1} (1 + \sqrt{\alpha_i / \beta_i (1 + f)}), \quad (5.22)$$

$$\sum_{i=1}^m \beta_i \Lambda (1 + \sqrt{\alpha_i / \beta_i (1 + f)}) \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \right)^{-1} = c - \beta_m. \quad (5.23)$$

Если одновременно учитываются ограничения (5.17) и (5.21),

$$\text{т. е. } F(x_1, \dots, x_{m-1}, f_1, f_2) = w(m) + f_1 g_1 + f_2 g_2, \quad (5.24)$$

$$\text{где } g_1 = \sum_{i=1}^m \beta_i \prod_{j=1}^m x_j - c, \quad g_2 = \sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^m x_j - N,$$

то искомое число узлов на каждом уровне, управляемое одним узлом следующего уровня, равно

$$\bar{x}_i = \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \prod_{j=i+1}^m x_j \right)^{-1} (1 + \sqrt{\alpha_i (\beta_i (1 + f_1) + f_2)^{-1}}), \quad i = \overline{1, m-1}, \\ m \geq 4, \quad (5.25)$$

причем f_1 и f_2 находятся из системы уравнений

$$\sum_{i=1}^{m-1} \beta_i \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \right)^{-1} (1 + \sqrt{\alpha_i (\beta_i (1 + f_1) + f_2)^{-1}}) = c - \beta_m, \quad (5.26)$$

$$\sum_{i=1}^{m-1} \Lambda \left(\mu_i \prod_{j=1}^{i-1} k_j \right)^{-1} (1 + \sqrt{\alpha_i (\beta_i (1 + f_1) + f_2)^{-1}}) = N - 1.$$

Если $m = 3$ и $\beta_1 \neq \beta_2$, то условия (5.17) и (5.21) позволяют определить параметры системы. Находим: $x_3 = 1$, $x_2 = [c - \beta_3 - \beta_1(N-1)] / (\beta_2 - \beta_1)$, $x_1 = [c - \beta_3 - \beta_2(N-1)] / [c - \beta_3 - \beta_1(N-1)]$.

Если задано число узлов некоторого j -го уровня, т. е.

$\prod_{i=j}^m x_i = N_j, j = \overline{1, m}, x_m = 1$. В этом случае используется описанная выше процедура вычисления оптимальных коэффициентов x_i с индексами от $m-1$ до $j+1$. Затем определяется коэффициент $\bar{x}_j = N_j / \prod_{i=j-1}^m x_i$, и далее, если $j > 1$, расчеты продолжаются по-прежнему.

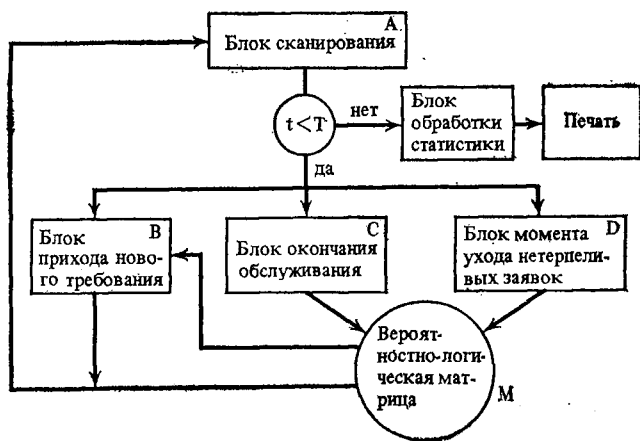


Рис. 5.7

Многие системы отличаются от рассмотренных большим числом потоков требований на каждом уровне, более сложными взаимосвязями между различными узлами управления. Число требований каждого типа часто бывает ограничено, потоки не являются простейшими. Между требованиями может быть задана сложная система приоритетов, и требования являются «нетерпеливыми». Аналитически исследовать подобные системы не представляется возможным, однако такие системы могут быть исследованы путем моделирования на ЦВМ.

При моделировании учитывается «нетерпеливость» требований. Если время пребывания некоторого нетерпеливого требования в системе превышает заданную величину, то оно «уходит» из системы обслуживания, что воспроизводит реальную ситуацию передачи управления от автомата к оператору.

Укрупненная блок-схема алгоритма моделирования многоступенчатых систем оперативного управления показана на рис. 5.7. В рассматриваемой системе возможны три различных типа качественных изменений состояний системы: момент прихода нового требования на обслуживание или поломки прибора, момент окончания обслуживания требований на приборе или момент восстановления прибора, момент ухода нетерпеливых требований.

Блок А (сканирования) (рис. 5.7) определяет ближайший момент качественного изменения состояний системы. Затем блок А передает управление одному из блоков В, С или D, что соответствует моменту прихода нового требования или поломки прибора (блок В), моменту окончания обслуживания требования и восстановления прибора (блок С) и моменту ухода нетерпеливых требований (блок D). После очередного обращения к блоку А проверяется условие, что текущий момент t меньше заданного времени длительности моделирования T , и затем либо происходит

передача управления одному из блоков B , C и D , либо моделирование заканчивается и проводится статистическая обработка накопленного материала (блок обработки статистики).

В момент окончания обслуживания (блок C) или в момент ухода нетерпеливых заявок (блок D) управление передается на вероятностно-логическую матрицу связей (блок M), где проверяется дальнейшая судьба требования. При выполнении соответствующих условий, определяемых матрицей M , управление передается блоку A (данное требование не оказывает влияния на систему), либо момент обращения к матрице определяет приход требования на один или несколько узлов в соответствии с условиями вероятностно-логической матрицы, и при этом управление передается блоку B .

Данный метод моделирования обладает рядом существенных положительных качеств: простой и физической наглядностью, возможностью компоновать программу из отдельных подпрограмм, возможностью моделирования систем с различной структурой и числом узлов с использованием стандартной программы.

Результаты исследования многоступенчатых систем оперативного управления. Ниже приводятся результаты исследования вариантов системы оперативного управления нефтеперерабатывающим заводом (НПЗ) [27, 73].

На ДП НПЗ должна быть установлена ЦВМ, работающая в режиме советчика. Ориентировочно выбран тип машины, определен перечень решаемых ею задач, характер потоков требований на них, а также правила прерывания и выбора программ в ЦВМ. Между потоками установлены отношения приоритетов, и они пронумерованы в порядке убывания важности. Первые несколько потоков могут иметь абсолютный приоритет по отношению к последующим. Это значит, что требование из потока с номером j , обладающего абсолютным приоритетом, заменяет на обслуживании требования из потока с номером i , если $j < i$. Однако требование с прерванным обслуживанием в соответствующий момент возвращается и дообслуживается. Второй группе потоков присвоены относительные приоритеты. Требования этих потоков не прерывают обслуживания и располагаются в очереди в порядке своих номеров. Распределение всех N потоков системы по двум указанным группам произвольное.

В табл. 5.1 дано описание по приведенной выше схеме работы ЦВМ на ДП НПЗ. Здесь $1/\lambda_i$ — среднее время между поступлениями требований и $1/\mu_i$ — среднее время обслуживания требований, M и D — законы поступления требований и обслуживания (M — показательный, D — детерминированный). В табл. 5.1 в порядке убывания приоритетов перечислены решаемые ЦВМ задачи. Под обслуживанием требования некоторого потока понимается ввод исходной информации, расчеты по алгоритму, выдача результатов и, если нужно, управляющих воздействий. В случае прерываний сюда же входят операции по обмену программ между внешней и оперативной памятью. Номера и характер при-

Таблица 5.1

| № п/п | Характер решаемых задач | Приоритет | Число станков | Входящий поток | | Обслуживание | |
|-------|-------------------------------------|-----------|---------------|----------------|-------|--------------|-------|
| | | | | $1/\lambda_i$ | Закон | $1/\mu_i$ | Закон |
| 1 | Поломки и восстановление | Абс. | 1 | 150 М | | 6 М | |
| 2 | Аварийные требования | » | ∞ | 3 М | | 0,1 М | |
| 3 | Пуск и отключение маршрута | » | 10 | 2,5 М | | 0,0167 М | |
| 4 | Управление перекачкой | » | ∞ | 0,5 М | | 0,083 D | |
| 5 | Компаундирование | Отн. | 3 | 4 М | | 0,5 М | |
| 6 | Распределение резервуаров | » | 4 | 1,833 М | | 0,167 D | |
| 7 | Материальный баланс | » | 1 | 3 D | | 0,25 D | |
| 8 | Прогноз состояний производства | » | 1 | 1 D | | 0,1 D | |
| 9 | Выполнение товарно-учетных операций | » | 1 | 3 М | | 0,167 D | |
| 10 | Планирование | » | 1 | 144 М | | 5 М | |

оритетов решаемых задач определяют общий алгоритм работы ЦВМ. Варьируя этими характеристиками, можно перераспределить возможные задержки в выполнении операций и среднее число связанных с этим прерываний.

При моделировании определялись следующие величины: средняя длина каждой очереди, среднее время ожидания в каждой очереди, среднее число прерываний обслуживания требований каждой очереди, коэффициент загрузки прибора, коэффициент загрузки прибора по каждой очереди [70]. Программы моделирования запрограммированы на АЛГОЛе, это позволяет исследовать систему с 50 входящими потоками. Моделирование системы с данными из табл. 5.1 за время $T = 10\,000$ ч работы реальной системы занимает около 45 мин машинного времени.

В результате моделирования системы с данными табл. 5.1 оказалось, что загрузка ЦВМ равна 0,97 (рис. 5.8). На рис. 5.8 нанесены результаты приближенной оценки коэффициента за-

грузки прибора по формуле $\rho = \sum_{i=1}^N (1/\mu_i) n_i / (1/\lambda_i)$. При такой загрузке средние значения длительностей ожидания обслуживания требований достигают больших величин. На рис. 5.8 и 5.9 приведены результаты моделирования работы ДП в зависимости от быстродействия ЦВМ.

На рис. 5.8 показана зависимость среднего числа требований, принятых к обслуживанию без ожидания в час (1), и среднего числа прерываний в час в системе (2). Если средние длительности обслуживания сократить вдвое, то вектор интенсивностей будет равен 2μ.

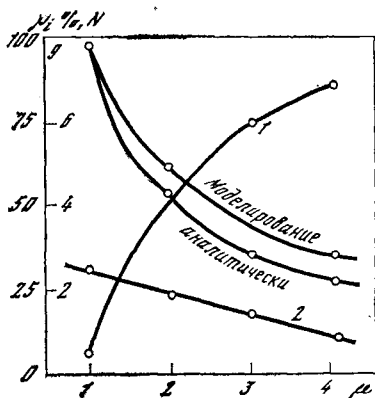


Рис. 5.8

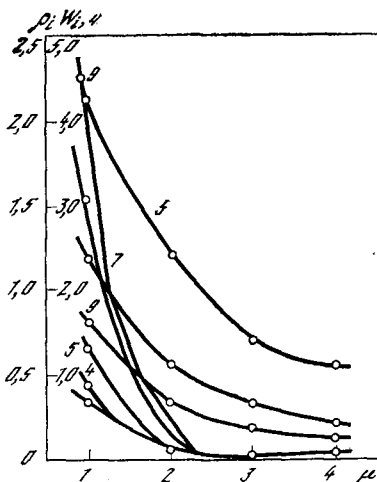


Рис. 5.9

На рис. 5.9 соответственно показаны зависимости среднего времени ожидания требований и среднего числа прерываний на одно обслуженное требование для требований 4, 5, 7 и 9-го типов (табл. 5.1) при различных значениях вектора μ . Так, например, средняя задержка в управлении перекачкой достигает 1 ч, а выполнения товарно-учетных операций приходится ждать в среднем 5 ч.

Сопоставление этих данных позволило сделать следующий вывод: чтобы возможные задержки в управлении удовлетворяли требованиям технологии, необходимо, чтобы оценка коэффициента загрузки ЦВМ оперативными задачами ρ была в пределах 30—40%. Необходимо либо подобрать ЦВМ с большим быстродействием, либо перейти к системе из нескольких ДП, связанных в иерархическую сеть.

Результаты исследования двухуровневой системы. Поскольку одноуровневая система не удовлетворяла заданным характеристикам качества, то была исследована система, состоящая из ЦДП и двух диспетчерских пунктов (ДП), в ней ДП-I контролирует промежуточные резервуарные парки и управляет ими, а ДП-II — товарным резервуарным парком завода.

Проведено распределение решаемых задач между узлами системы, формализованы и определены потоки требований различных задач на каждый узел (табл. 5.2), а также взаимосвязи между задачами на различных узлах (рис. 5.10).

Обозначения и содержание приведенных в табл. 5.2 данных аналогичны тем же величинам табл. 5.1. Помимо этого, в табл. 5.2 для различных задач указан номер приоритетов, так как номер потока и номер приоритетов могут не совпадать и несколько потоков требований могут иметь одинаковые приоритеты. В этом случае требования выбираются на обслуживание в порядке поступления в систему. Если имеется несколько прерванных тре-

Таблица 5.2

| № п/п | Характер решаемых задач | Число стан-ков | Приоритет | | Входящий поток | Обслужи-вание | Допусти-мое вре-мя пре-бывания |
|----------|-----------------------------|----------------|-----------|---|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| | | | Тип | № | 1/λ _i Закон | 1/μ _i Закон | |
| На ЦДП | | | | | | | |
| 0 | Поломки и восста-новление | 1 | Абс. | 1 | 150 М | 2 М | — |
| 1 | Аварийные сигнала | | » | 2 | 3 М | 0,1 М | 0,167 |
| 2 | Сбор и обработка информации | | » | 3 | М | 0,1м М | 0,5 |
| 3 | Прогнозирование состояний | 1 | Отн. | 4 | 1 Д | 0,1 Д | 0,5 |
| 4 | Компаундирова-ние | 3 | » | 5 | 24 М | 0,5 М | 2 |
| 5 | Материальный ба-ланс | 1 | » | 6 | 6 Д | 0,25 Д | 2 |
| 6 | Планирование | 1 | » | 7 | 120 М | 6 М | 12 |
| На ДП-I | | | | | | | |
| 0 | Поломки и восста-новление | 1 | Абс. | 1 | 150 М | 2 М | — |
| 1 | Аварийные сигнала | | » | 2 | 3 М | 0,1 М | 0,167 |
| 2 | Сбор и обработка данных | | » | 3 | 0,167 М | 0,1м М | 0,5 |
| 3 | Распределение ре-зервуаров | 3 | Отн. | 4 | 5,5 М | 0,167 Д | 0,5 |
| 4 | Прогнозирование состояний | 1 | » | 5 | 1 Д | 0,1 Д | 0,5 |
| 5 | Товарно-учетные операции | | » | 6 | 3 М | 0,167 Д | 1 |
| 6 | Материальный ба-ланс | 1 | » | 7 | 3 Д | 0,25 Д | 1 |
| На ДП-II | | | | | | | |
| 0 | Поломки и восста-новление | 1 | Абс. | 1 | 150 М | 2 М | — |
| 1 | Аварийные сигнала | | » | 2 | 3 М | 0,1 М | 0,167 |
| 2 | Сбор и обработка информации | | » | 3 | 0,167 М | 0,1м М | 0,5 |
| 3 | Управление | | » | 4 | 0,4 М | 0,033 М | 0,167 |
| 4 | Распределение ре-зервуаров | 3 | Отн. | 5 | 5,5 М | 0,167 Д | 0,5 |
| 5 | Прогнозирование состояний | 1 | » | 6 | 1 Д | 0,1 Д | 0,5 |
| 6 | Товарно-учетные операции | | » | 7 | 3 М | 0,167 Д | 1 |

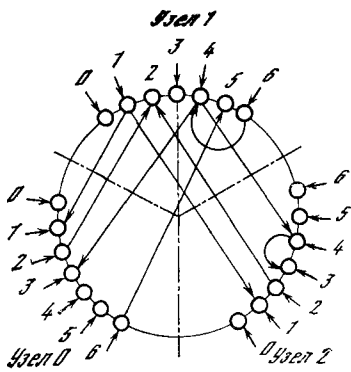


Рис. 5.10

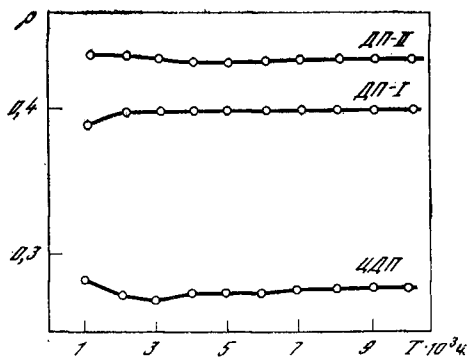


Рис. 5.11

бований с одинаковыми приоритетами, то на обслуживание принимается требование, у которого оставшееся время дообслуживания минимально.

Точность моделирования находится в пределах 2%. Для определения условий выхода исследуемой системы на стационарный режим результаты моделирования выводились на печать через каждую 1000 ч из заданного времени моделирования $T = 10\ 000$. Оказалось, что быстрее всего устанавливается загрузка различных узлов (рис. 5.11).

На рис. 5.12 показана зависимость среднего времени ожидания на одно поступившее требование w , среднего числа требований в системе L , а также среднего числа прерываний на одно поступившее требование β от времени моделирования t для одного из наиболее редких потоков ($1/\lambda_i = 144$ ч), имеющего относительный приоритет (поток 6 на ЦДП). Для остальных потоков стационарный режим устанавливается значительно быстрее.

Проведено исследование влияния длительности сбора исходной информации на характеристики функционирования системы, когда время, затрачиваемое на сбор исходных данных, увеличивалось в 10, 20 и 30 раз. На рис. 5.13 показана зависимость среднего времени

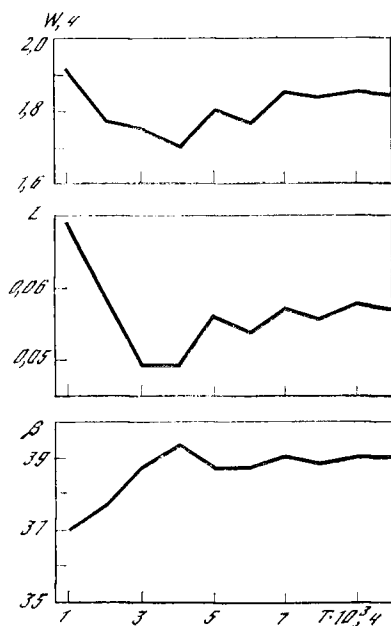


Рис. 5.12

ожидания требований 6-го типа w и среднего числа требований в системе L на первом узле в зависимости от времени сбора информации при исходных параметрах и увеличенных в 10, 20 и 30 раз.

На рис. 5.14 показана зависимость среднего времени ожидания и числа прерываний на одно требование для 6-го потока 2-го узла

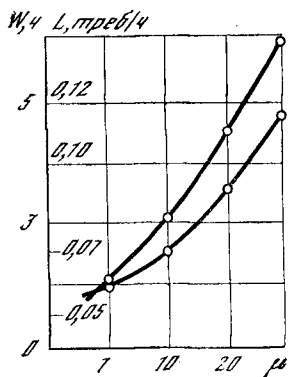


Рис. 5.13

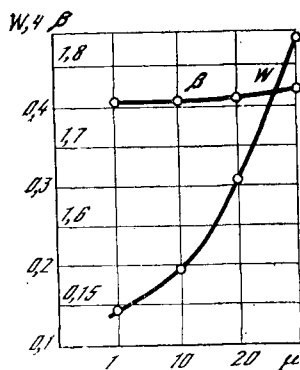


Рис. 5.14

в зависимости от времени сбора информации. Число прерываний на одно поступившее требование изменяется незначительно.

Рассмотренный подход, алгоритмы и программы использовались для обоснования структурного построения систем оперативного управления ряда нефтеперерабатывающих заводов и других систем.

§ 5.4. Имитационная модель функционирования распределенной системы управления заданной топологической структуры

Рассмотрим вопросы использования имитационных моделей при анализе структур распределенных систем управления, представляющих собой рассредоточенные в пространстве совокупности пунктов управления движущимися объектами различных классов. Такие системы часто встречаются на автомобильном и железнодорожном транспорте, в авиации, при исследовании космического пространства [65, 66].

При проектировании распределенных систем управления, представляющих собой рассредоточенные в пространстве пункты управления движущимися объектами различных классов, возникает необходимость в оценке качества функционирования системы для различных вариантов ее структуры. Вследствие трудности учета динамики функционирования проектируемой системы в оптимизационных моделях синтеза структур получение таких оценок возможно с помощью имитационных моделей.

Имитационная модель разрабатывается для получения оценок качества функционирования распределенных систем управления заданной топологической структуры, определяющей пространственное расположение пунктов управления и их взаимодействия с объектами управления [66]. С помощью оптимизационных моделей из определенного набора вариантов построения элементов системы устанавливается оптимальный вариант структуры в соответствии с принятым критерием эффективности, в том числе топологическая структура системы, определяющая пространственное расположение пунктов управления и их взаимодействия с объектами управления (см. § 3.2).

Для имитации функционирования систем управления, представляющих собой распределенные в пространстве совокупности пунктов управления различными классами движущихся объектов управления, разработана имитационная модель «ИМФУС-1». Модель «ИМФУС-1» представляет собой событийно-дискретную стохастическую имитационную модель. Компонентами имитационной модели являются пункты управления и объекты управления, между которыми имитируются управляющие взаимодействия нескольких типов. Топологическая структура имитируемой системы задается через массивы, содержащие параметры, которые определяют времена входа, выхода и продолжительность нахождения объекта управления в пределах доступности управляющим воздействием со стороны каждого пункта управления. Стохастическими переменными в имитационной модели являются времена вхождения объектов управления в зону доступности системы управления и длительности управляющих взаимодействий между пунктами управления и объектами управления. Имитационная модель содержит ряд модельных и обеспечивающих подпрограмм, имитирующих процесс функционирования системы управления и выполняющих функции обеспечения проведения имитационного эксперимента. В качестве обеспечивающих подпрограмм использован пакет программ обеспечения имитации GASP IV [80]. Модельные и обеспечивающие подпрограммы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН IV.

Схема взаимосвязей модельных и обеспечивающих подпрограмм представлена на рис. 5.15. Идентификаторы подпрограмм и выполняемые ими функции приведены в табл. 5.3

Элементом системы и взаимодействиями между ними соответствуют компоненты модели: движущиеся объекты управления различных классов, стационарные пункты управления, а также управляющие взаимодействия между объектами и пунктами различных типов. Статическая структура модели задается путем присвоения в подпрограмме INTLC определенных начальных значений параметрам модели: NCONP — количество классов объектов управления; NCLAS — классов объектов управления; NCLAC(i) — количество объектов i -го класса; CLACC(M, I) — состав i -й подсистемы управления; TPC(M, I) — время нахождения объекта i -го класса в зонах пунктов управления,

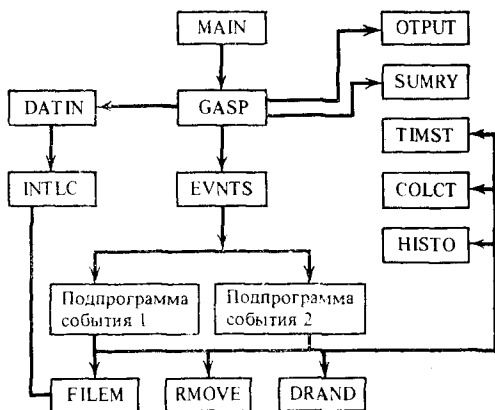


Рис. 5.15

i -й подсистемы управления в течение очередного прохождения через систему определяется элементами массива $CLACC(M, I)$, $M = 1, MCONP, I = 1, NCLAS$. Этот массив задает для каждого класса объектов последовательность пунктов, с которыми объект i -го класса может осуществить управляющее взаимодействие при прохождении через систему. Последний элемент этой последовательности равен нулю, что означает выход объекта из системы. Каждому элементу массива $CLACC(M, I)$ соответствуют элементы массивов $TPC(M, I)$ и $TBP(M, I)$.

Пункт управления может находиться в одном из двух состояний: «занят» и «свободен». Момент перехода j -го пункта управления из состояния «занят» в состояние «свободен» фиксируется элементом массива $TEND(J)$.

Каждому объекту управления в модели соответствует компонент — совокупность элементов данных — называемый записью. Запись обрабатывается в ходе имитационного прогона модели как единое целое. Каждый элемент записи $ATRIB(\cdot)$ отражает одну из следующих характеристик подвижного компонента модели: $ATRIB(1)$ — время свершения события; $ATRIB(2)$ — код события; $ATRIB(3)$ — код класса объекта; $ATRIB(4)$ — код пункта, в зону доступности которого должен войти объект, $ATRIB(4)$ последовательно принимает значения, равные значениям элементов i -го столбца массива $CLACC(M, I)$; $ATRIB(5)$ — продолжительность планируемого управляющего взаимодействия между объектом и пунктом управления; $ATRIB(6)$ — приоритет планируемого управляющего взаимодействия; $ATRIB(7)$ — код очередного входа объекта в зону пункта i -й подсистемы в течение одного прохода объекта через систему; $ATRIB(8)$ — время вхождения объекта в систему, используемое для расчета времени выхода объекта из системы; $ATRIB(9)$ — код текущего прохода объекта через систему.

Все записи помещаются в файл событий и ранжируются по

входящих в i -ю подсистему; $TBP(M, I)$ — время недоступности объекта i -го класса при переходе из зоны предыдущего в зону последующего пункта; $TWT(I)$ — время нахождения объекта i -го класса в пределах системы управления; $TRO(I)$ — интервал времени между последовательными прохождениями через систему объекта i -го класса.

Порядок прохода объекта i -го класса через зоны доступности пунктов

Таблица 5.3

| Тип под-программы | Идентификатор подпрограммы | Функция |
|-------------------|--|---|
| Модельная | MAIN | Инициализирует модельные переменные, которые остаются неизменными в течение всех имитационных прогонов. Вызывает подпрограмму GASP |
| | INTLC | Инициализирует модельные переменные, которые изменяются от прогона к прогону. Устанавливает начальные события |
| | EVNTS | Осуществляет выбор соответствующей подпрограммы события |
| | IN | Воспроизводит процесс вхождения объекта i -го класса в зону доступности j -го пункта управления, осуществление управляющего взаимодействия n -го типа, постановку и выход объекта из очереди к j -му пункту |
| | OUT | Воспроизводит процесс выхода объекта i -го класса из системы управления. Планирует следующий проход объекта через систему |
| | OTPUT | Выдает специальные данные о результатах имитационного прогона |
| Обеспечивающая | GASP | Управляет ходом имитационного прогона. Продвигает имитационное время |
| | DATIN | Инициализирует переменные обеспечивающих подпрограмм |
| | FILEM | Вносит и упорядочивает записи в файлах |
| | RMOVE | Извлекает записи из файлов |
| | TIMST | Собирает значения наблюдаемых переменных, вычисляет и выдает в стандартной форме статистические оценки |
| | COLCT | Собирает значения стохастических наблюдаемых переменных, вычисляет и выдает в стандартной форме статистические оценки |
| | HISTO | Собирает значения наблюдаемых переменных, вычисляет статистические оценки и вычерчивает гистограммы |
| DRAND | Генерирует потоки псевдослучайных чисел | |
| SUMRY | Печатает результирующие данные об имитационном прогоне | |

характеристике ATRIB (1) в соответствии с правилом «меньшее значение — первым» для того, чтобы не допустить ситуации, когда событие с большим значением времени свершения наступает раньше события с меньшим значением времени свершения. Записи в файле могут быть также вторично ранжированы по любой другой характеристике по одному из следующих правил: «меньшее значение — первым»; «большее значение — первым», «первым вышел — первым вышел». Упорядочивание записей в файле обеспечивает временное и логическое соответствие возникновения событий в модели и моделируемой системе.

Управляющие взаимодействия между объектами и пунктами управления разделяются на типы, характеризующиеся периодичностью, продолжительностью и приоритетом. При планировании очередного прохода объекта через систему периодичность взаимодействия определяется из массива $NPER(N, I)$, где N — тип управляющего взаимодействия, I — код класса объекта, а элемент массива равен периодичности управляющего взаимодействия. Продолжительность и приоритет управляющего взаимодействия n -го типа определяется соответственно значениями массивов $TCON(N)$ и $NPR(N)$.

Моделирующий алгоритм, реализующий динамическое подобие между изменениями состояния моделируемой системы и изменениями состояния модели, отражает последовательность элементарных операций процесса функционирования системы, сохраняя при этом их логическую взаимосвязь и последовательность во времени. Алгоритм состоит из двух подпрограмм событий: «Вхождение объекта i -го класса в зону доступности j -го пункта управления» и «Выход объекта i -го класса из системы управления».

Вероятностное подобие между стохастическими процессами в системе и модели достигается с помощью генераторов случайных чисел. Генераторы случайных чисел дают возможность задавать последовательности случайных чисел с любым из следующих законов распределения: нормального, равномерного, треугольного, Эрланга, Пуассона.

Блок-схема подпрограммы события 1 («SUBROUTINE IN») представлена на рис. 5.16. Обработка записи, извлеченной из файла событий и имеющей характеристику $ATRIВ(2)$, равную 1, начинается с присвоения программным переменным I , M и J значений характеристик $ATRIВ(3)$, $ATRIВ(4)$ и $ATRIВ(7)$. Тем самым устанавливается класс объекта управления, вошедшего в систему, код пункта управления, с которым объекту необходимо осуществить управляющее взаимодействие, и порядковый номер вхождения объекта в зону доступности j -го пункта в течение текущего прохода через систему. Затем по значению переменной J определяется, проводится ли управляющее взаимодействие в течение данного прохода через систему или нет ($J = 0$, если в течение данного прохода управляющее взаимодействие не проводится, и $J > 0$ — в противном случае).

Если управляющее взаимодействие не проводится, то планируется событие 2 ($ATRIВ(2) = 2$ и $ATRIВ(1) = ATRIВ(1) + TWT(1)$). При необходимости осуществления управляющего взаимодействия проверяется состояние j -го пункта управления путем тестирования времени его освобождения $TEND(J)$; пункт свободен, если $TEND(J) \leq ATRIВ(1)$, в противном случае — занят. Если j -й пункт свободен, осуществляется проверка: не мешает ли окончанию управляющего взаимодействия данного объекта с j -м пунктом какой-либо другой объект, нуждающийся в управляющем взаимодействии более высокого приоритета. Если объекту не удается закончить управляющее взаимодействие с данным пунктом, то уп-

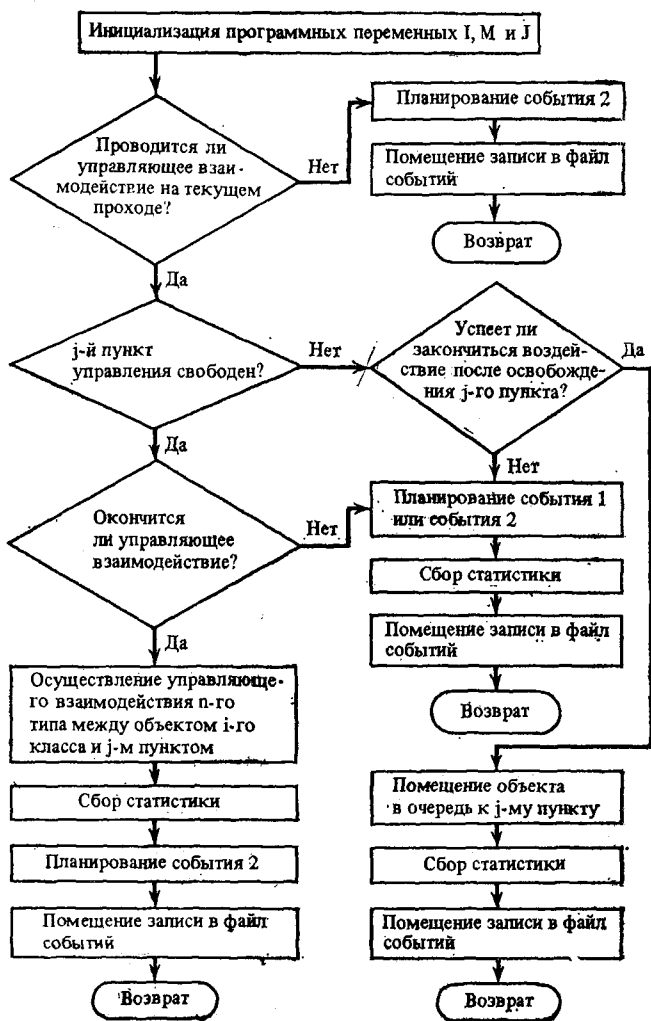


Рис. 5.16

равляющее взаимодействие считается невыполненным, собирается статистика по невыполненным управляющим взаимодействиям и планируется вхождение объекта в зону следующего пункта или выхода из системы управления (событие 1 или событие 2 соответственно). В том случае, если объект сможет окончить управляющее взаимодействие, собирается статистика по выполненным управляющим взаимодействиям и по загрузке данного пункта и планируется событие 2.

Если j -й пункт управления занят до момента времени $TEND(J)$, проводится проверка: успеет ли объект осуществить управляющее взаимодействие после освобождения пункта. Для этого вычисляется время допустимого начала управляющего взаимодействия

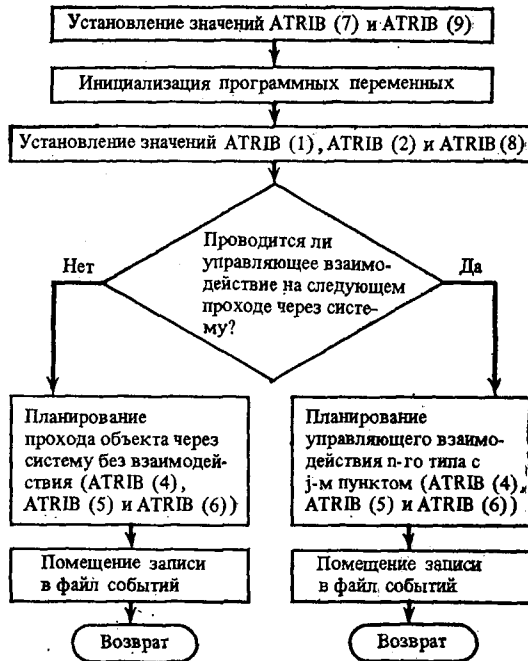


Рис. 5.17

$(TMAX = ATRIB(1) + TPC(M, I) - ATRIB(5))$ и сравнивается со временем освобождения j -го пункта $TEND(J)$. Если $TEND(J) > TMAX$, то планируется событие 1 или событие 2 в зависимости от того, является ли данный пункт последним на трассе прохождения объекта через систему или нет, и собирается статистика по неосуществленным управляющим воздействиям. В случае $TEND(J) \leq TMAX$ собирается статистика по очереди к j -му пункту. После обработки подпрограммой события 1 запись помещается в файл событий.

Блок-схема подпрограммы события 2 (SUBROUTINE OUT) представлена на рис. 5.17. Подпрограмма события 2, обрабатывая очередную запись, планирует следующий проход объекта через систему. Сначала устанавливается порядковый номер первого входа объекта в зону j -го пункта в течение следующего прохода через систему, т. е. $ATRIB(7) = 1$, и код следующего прохода увеличивается на единицу. Затем инициализируются программные переменные, определяемые характеристиками обрабатываемой записи ($I = ATRIB(3)$ и $M = ATRIB(7)$). Код события принимает значение, равное 1. Время свершения события 1 устанавливается равным времени предыдущего вхождения объекта в систему ($ATRIB(8)$) плюс время между последовательными вхождениями объекта i -го класса в систему $TRO(1)$. Для сохранения времени планируемого вхождения объекта в систему характеристика $ATRIB(8)$ устанавливается равной $ATRIB(1)$.

Для планирования очередного управляющего взаимодействия тестируется характеристика ATRIB (9), по значению которой определяется, проводится ли управляющее взаимодействие в течение планируемого прохода, и если проводится, то какого типа. Затем проводится планирование либо «пустого» прохода через систему (ATРIB(4) = 0, ATRIB(5) и ATRIB(6) = 0), либо устанавливаются значения приоритета (ATРIB(6)) и продолжительности

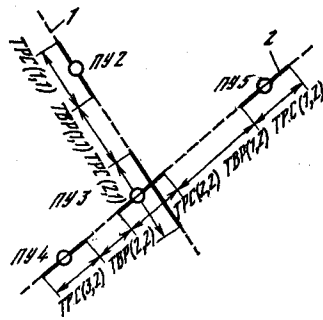


Рис. 5.18

управляющего взаимодействия (ATРIB(5)) n -го типа, равные соответственно значениям элементов массивов NPR(N) и TCON(N).

Продолжительность управляющего взаимодействия каждого типа может быть либо детерминированной и равной значению соответствующего элемента массива TCON(N), либо стохастической величиной. В случае стохастической величины продолжительности взаимодействия n -го типа соответствующий элемент массива TCON(N) равен нулю, а в подпрограмме содержится оператор вида ATRIB(5) = <идентификатор генераторов случайных чисел> <параметры распределения>. Например, оператор ATRIB (5) = UNFRM (2.0, 7.0,3) означает, что продолжительность взаимодействия полагается равной значению из равномерного распределения в интервале от 2 до 7 единиц имитационного времени и что при определении значений из этого распределения используется третий поток случайных чисел. Количество подобных операторов, включаемых в подпрограмму, определяется пользователем модели в соответствии с количеством типов управляющих воздействий, продолжительность которых носит стохастический характер.

Таблица 5.4

| Тип управляющего взаимодействия | Характеристика | | |
|---------------------------------|--|---|-----------|
| | Периодичность | Продолжительность | Приоритет |
| 1 | При каждом 11-м прохождении ЛА через систему | Нормально распределена с математическим ожиданием 5 мин, стандартным отклонением 1 мин, максимальным значением 7 мин, минимальным значением 2 мин | 2 |
| 2 | При каждом 15-м прохождении ЛА через систему | 5 мин | 1 |
| 3 | При каждом 4-м прохождении ЛА через систему | Нормально распределена с математическим ожиданием 3 мин, стандартным отклонением 1 мин, максимальным значением 5 мин, минимальным значением 1 мин | 2 |

Код пункта управления, с которым объект должен осуществить управляющее воздействие, устанавливается оператором $ATTRIB(4) = CLACC(M, I)$.

После обработки подпрограммой запись помещается в файл событий.

ИМФУС-1, помимо сравнений альтернативных вариантов структур системы или процессов в рамках этих структур, может быть использована для определения значимости влияния различных переменных модели на эффективность ее функционирования и поиска оптимальных значений набора переменных модели. Процесс применения модели состоит из ряда этапов. На первом этапе формулируются исследуемая проблема и цели имитации. Определяется соответствие исследуемой проблемы назначению модели, т. е. соответствие исследуемой системы классу систем, имитируемых ИМФУС-1. Вследствие блочного построения модель легко может быть расширена путем включения дополнительных подпрограмм событий, отображающих необходимые аспекты функционирования исследуемой системы. На следующем этапе осуществляется сбор данных, необходимых для определения начальных значений переменных и параметров модели, и подготовка их для ввода в модель. На этапе планирования имитационного эксперимента определяются продолжительность имитируемого периода, количество имитационных прогонов, уровни значений переменных модели.

В качестве примера использования модели приводится имитация функционирования автоматизированной системы управления летательными аппаратами (АСУ ЛА). Вариант структуры системы получен с помощью оптимизационной модели синтеза топологической структуры АСУ ЛА [37]. Система состоит из двух подсистем, каждая из которых осуществляет функции управления летательными аппаратами одного из двух классов (20 ЛА 1-го класса и 25 ЛА 2-го класса). Первая подсистема управления (ПУ 2 и ПУ 3) взаимодействует с ЛА 1-го класса и вторая подсистема (ПУ 3, ПУ 4 и ПУ 5) — с ЛА 2-го класса (рис. 5.18, где 1 — траектория ЛА 1-го класса, 2 — траектория ЛА 2-го класса). Между ПУ и ЛА осуществляются управляющие взаимодействия трех типов (табл. 5.4). ЛА 1-го класса осуществляют с ПУ управляющие взаимодействия первого и второго типов, а ЛА 2-го класса — второго и третьего типов.

ЛА доступны управляющему воздействию со стороны ПУ только в течение времени, ограниченного условием прямой видимости между ними при прохождении объекта вблизи пункта. Доступность ЛА i -го класса воздействию j -го ПУ определяется параметрами траектории движения и координатами места расположения пункта. Последовательность прохождения ЛА i -го класса, продолжительность доступности и недоступности ЛА при прохождении через АСУ приведены в табл. 5.5. В качестве начальных условий имитационного прогона было принято, что время первого вхождения каждого ЛА в систему равномерно распределено в интервале $[0, 144]$, что в момент имитационного времени,

Таблица 5.5

| Класс ЛА | Последовательность прохождения ЛА через систему (код ПУ) | Время доступности ЛА, мин | Время недоступности ЛА при переходе к следующему ПУ, мин |
|----------|--|---------------------------|--|
| 1 | 2 | 10 | 6 |
| | 3 | 12 | 116 |
| 2 | 5 | 8 | 2 |
| | 3 | 10 | 3 |
| | 4 | 8 | 165 |

равного нулю, все ПУ свободны и нет ни одного ЛА в очередях к ПУ. Функционирование АСУ ЛА имитировалось в течение одного месяца.

В результате имитационного эксперимента получены следующие данные: количество осуществленных запланированных управляющих взаимодействий ЛА i -го класса с j -м ПУ и с АСУ ЛА в целом (NCLA (J, I) и NCCLA (I)) в течение имитируемого периода (табл.5.6); количество неосуществленных запланированных управ-

Таблица 5.6

| | ПУ 2 | ПУ 3 | ПУ 4 | ПУ 5 | Всего в системе |
|--|------|------|------|------|-----------------|
| Количество осуществленных запланированных управляющих взаимодействий | | | | | |
| ЛА 1-го класса | 816 | 96 | — | — | 912 |
| ЛА 2-го класса | — | 147 | 0 | 1503 | 1650 |
| Количество неосуществленных запланированных управляющих взаимодействий | | | | | |
| ЛА 1-го класса | 101 | 5 | — | — | 106 |
| ЛА 2-го класса | — | 0 | 0 | 147 | 147 |

ляющих взаимодействий ЛА i -го класса с j -м ПУ и с АСУ ЛА в целом (NNCLA (J, I) и NCNLA (I)) (табл.5.6); загрузка j -го ПУ (UNLCP (J)) за имитируемый период, время ожидания ЛА в очереди к j -му ПУ (WAIT (J)) за имитируемый период; продолжительность управляющих взаимодействий первого и третьего типов (ТС1 и ТС3). Для переменных ТС1, ТС3, WAIT (2), WAIT (3), WAIT (4) и WAIT (5) получены гистограммы. Гистограммы для переменных ТС3 и WAIT (5) приведены в табл. 5.7 и 5.8 (здесь 1 — число наблюдений, 2 — относительная и 3 — накопленные частоты наблюдений, 4 — интервал).

Таблица 5.7

| 1. | 2. | 3. | 4. |
|-----|-------|-------|-------|
| 369 | 0,096 | 0,096 | 1,000 |
| 259 | 0,067 | 0,164 | 1,500 |
| 384 | 0,100 | 0,264 | 2,000 |
| 461 | 0,120 | 0,384 | 2,500 |
| 461 | 0,120 | 0,504 | 3,000 |
| 490 | 0,128 | 0,631 | 3,500 |
| 461 | 0,120 | 0,751 | 4,000 |
| 338 | 0,088 | 0,839 | 4,500 |
| 252 | 0,066 | 0,905 | 5,000 |
| 182 | 0,047 | 0,952 | 5,500 |
| 97 | 0,025 | 0,978 | 6,000 |
| 86 | 0,022 | 1,000 | |

3840

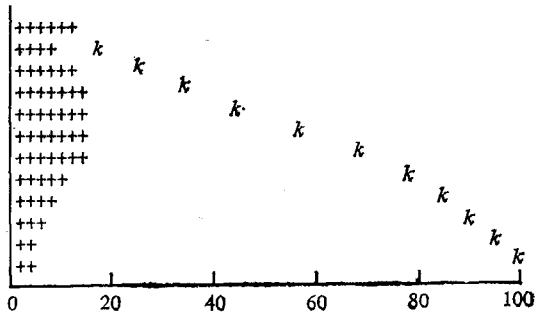
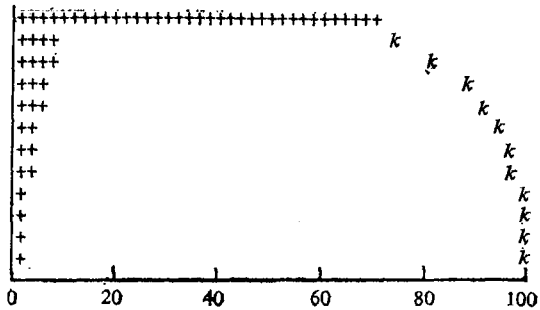


Таблица 5.3

| 1. | 2. | 3. | 4. |
|------|-------|-------|-------|
| 1548 | 0,724 | 0,724 | 0,000 |
| 123 | 0,058 | 0,782 | 0,500 |
| 130 | 0,061 | 0,843 | 1,000 |
| 96 | 0,045 | 0,888 | 1,500 |
| 96 | 0,045 | 0,933 | 2,000 |
| 44 | 0,021 | 0,953 | 2,500 |
| 43 | 0,020 | 0,973 | 3,000 |
| 23 | 0,011 | 0,984 | 3,500 |
| 15 | 0,007 | 0,991 | 4,000 |
| 7 | 0,003 | 0,994 | 4,500 |
| 7 | 0,003 | 0,998 | 5,000 |
| 5 | 0,002 | 1,000 | |

2137



При имитации функционирования АСУ ЛА с данным вариантом структуры потребовалось 105 кбайт оперативной памяти и менее 200 с машинного времени ЦВМ «ICL Система 4—70». Увеличение числа объектов и пунктов управления в модели приводит к незначительному увеличению требуемой оперативной памяти. Так, увеличение числа ЛА с 45 до 70 и числа пунктов с 4 до 10 приведет к увеличению требуемой памяти соответственно на 275 и 100 байт.

Универсальные имитационные системы позволяют исследовать модели, содержащие дискретные и непрерывные переменные.

Наиболее богатой по своим возможностям комбинированной имитационной системой является *GASP-IV* [80]. Так, по сравнению с широко распространенным дискретным имитационным языком *GPSS*, *GASP-IV* обладает следующими преимуществами: может использоваться для моделирования дискретных, непрерывных и комбинированных систем; написан на универсальном алгоритмическом языке ФОРТРАН IV, что позволяет использовать его на ЦВМ, имеющих транслятор с ФОРТРАНА; имеет блочную структуру, что позволяет легко расширять возможности системы путем введения новых блоков; помимо развитых стандартных средств сбора, вычисления и выдачи в виде таблиц,

гистограмм и графиков статистических данных о поведении наблюдаемых переменных имитационной модели, дает возможность выдавать специфические данные в форме, определяемой пользователем; отсутствие специального транслятора и блочная структура позволяют использовать *GASP-IV* в оптимизационно-имитационных процедурах синтеза сложных систем вследствие достаточно простого перехода от программ оптимизационной модели к программам имитационной модели.

Язык *GASP-IV* реализует несколько процедур продвижения имитационного времени (пошаговую, от события к событию и их комбинации), и имитационное время в модели может изменяться непрерывно, дискретно и непрерывно с наложенными скачками. Переменные модели могут описываться разностными и дифференциальными уравнениями.

В Институте проблем управления разработана Универсальная система моделирования дискретных и непрерывных систем (*УСМ*), которая создавалась на базе пакета программ *GASP-IV*. Этот пакет был адаптирован, дополнен новыми программами и усовершенствован. В *УСМ* включено 20 модулей, содержащих 40 подпрограмм (в *GASP-IV* — 33 подпрограммы). *УСМ* содержит около 3,5 тыс. операторов и требует 150 кбайт оперативной памяти. Блочная структура *УСМ* позволяет включать в конкретную имитационную модель только ту часть модулей, которые необходимы для данной имитации (минимальный объем ~ 60 кбайт). Вновь разработанные модули (*MFIND*, *FILES* и *NDECCD*) расширяют функциональные возможности *УСМ* [65, 66]. Модуль *MFIND* проводит поиск записи в массивах по определенным значениям трех характеристик; *FILES* помещает записи в массив, при этом упорядочивает их по трем характеристикам; *NDECCD* декодирует сложные коды, используемые в качестве идентификаторов компонентов имитационной модели.

В *УСМ* включены оптимизационные блоки, что позволяет реализовать процедуры, содержащие оптимизационные и имитационные модели. *УСМ* содержит модули: *BOLOPT* — оптимизационные модели булевого программирования; *INOPT* — оптимизационные модели целочисленного программирования; *SEOPT* — модели нелинейного программирования, решаемые поисковыми алгоритмами; *SOBOPT* — процедуры для выделения множества оптимальных и субоптимальных решений.

УСМ позволяет проводить эксперименты с имитационными моделями, включающими до: 100 непрерывных переменных — состояний; 50 условий возникновения событий; 50 видов случайных переменных. Возможно использование временных событий, происходящих в определенные моменты времени, и событий — состояний, возникновение которых обуславливается определенным состоянием модели. Пакет имеет средства диагностики ошибок при вводе начальных данных и в имитационной модели. Позволяет проводить эксперименты по глобальному моделированию (модели, написанные на языке *DYNAMO*, могут быть реализованы на *УСМ*).

При проведении имитационных прогонов УСМ обеспечивает автоматически сбор, вычисление и выдачу статистических данных в виде таблиц, гистограмм и графиков о 50 стохастических и 50 детерминированных наблюдаемых переменных.

Сравнение различных языков моделирования может быть выполнено по различным факторам: по характеру исследуемых переменных (дискретные или непрерывные); по методам формализации отдельных элементов моделирования и их взаимосвязи, по трудоемкости разработки комплекса программ, по затратам процессорного времени и объема памяти ЦВМ, удобству пользования и другим факторам.

Если провести сравнение языков имитационного моделирования с точки зрения возможности их объединения с оптимизационными моделями, по способу выработки в них управляющих переменных, в зависимости от состояния модели, возможности задания критериев и областей управления, то лишь немногие языки позволяют успешно решать эти задачи, к их числу относятся и язык *GASP-IV*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акинфиев В. К., Цвиркун А. Д. Постановка и решение некоторых задач определения рациональной структуры АСУ.— *АиТ*, 1972, № 1.
2. Акинфиев В. К., Мамиконов А. Г., Соловьев М. М., Цвиркун А. Д. Постановка и решение задач планирования инвестиционных программ.— *АиТ*, 1976, № 1.
3. Акинфиев В. К., Мамиконов А. Г., Новиков В. Н., Цвиркун А. Д. О рациональном распределении функций в автоматизированной иерархической системе управления летательными аппаратами.— *АиТ*, 1978, № 5.
4. Акинфиев В. К., Карибский А. В., Цвиркун А. Д. Инвестиционные модели планирования развития крупномасштабных систем.— *АиТ*, 1980, № 3.
5. Берг К. Теория графов и ее применение. М.: ИЛ, 1962.
6. Багриновский К. А., Бусыгин В. П. Математика плановых решений. М.: Наука, 1980.
7. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977.
8. Бурков В. Н., Кондратьев В. В., Молчанова В. А., Щепкин А. В. Модели и механизмы функционирования иерархических систем. Обзор.— *АиТ*, 1977, № 11.
9. Бурков В. Н., Горгидзе А. Я., Горгидзе И. А. и др. Проблемы построения автоматизированных систем организационного управления. Тбилиси: Мецниереба, 1973.
10. Бусленко Н. П., Калашников В. В., Коваленко И. Н. Лекции по теории сложных систем. М.: Сов. радио, 1973.
11. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978.
12. Воронов А. А., Чистяков Ю. В. Использование частотных характеристик в решении задач выбора технических средств для автоматизированных систем управления материально-техническим снабжением.— *АиТ*, 1971, № 5.
13. Воронин Л. М. Развитие атомной энергетики в десятой пятилетке.— *Энергетическое строительство*, 1976, № 11.
14. Всесоюзный семинар по методам синтеза и планирования развития структур сложных систем: Тез. докл. Звенигород, 1979. М.: Ин-т проблем управления, 1979.
15. Гарляускас А. И., Фейгин В. И. Динамические экономико-математические модели оптимизации единой газоснабжающей системы.— В кн.: Экономика, организация и управление в газовой промышленности. М.: ВНИИЭГАЗПРОМ, 1975.
16. Гвишиани Д. М. Организация и управление. М.: Наука, 1970.
17. Гермейер Ю. Б., Моисеев Н. Н. О некоторых задачах теории иерархических систем управления.— В кн.: Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1971.
18. Гермейер Ю. Б. Игры с противоположными интересами. М.: Наука, 1976.
19. Гольштейн Е. Г., Юдин Д. Б. Новые направления в линейном программировании. М.: Сов. радио, 1966.
20. Гольштейн Е. Г., Юдин Д. Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. М.: Наука, 1969.
21. Гусев В. В., Марьянович Т. П., Сахнюк М. А. Сравнительный анализ средств программного моделирования сложных систем.— *Управляющие системы и машины*, 1973, № 1.

22. *Дюкалов А. Н., Иванов Ю. Н., Токарев В. В.* Теория управления и экономические системы: Проблема описания.— *АиТ*, 1974, № 4.
23. *Жожикашвили В. А.* Определение структуры и порядка ввода многомашинных телеавтоматических систем массового обслуживания.— В кн.: У Всесоюз. совещание по проблемам управления: Реф. докл. М.: Наука, 1974, ч. 1.
24. *Жук К. Д., Тимченко А. А., Доленко Т. И.* Исследование структур и моделирование логико-динамических систем. Киев: Наук. думка, 1975.
25. *Емельянов С. В.* и др. Подготовка и принятие решений в организационных системах управления.— В кн.: Итоги науки и техники. Техническая кибернетика, 1969. М.: Наука, 1971.
26. *Емельянов С. В., Дудин Б. Б., Малевич А. А.* Проблемы управления процессами развития производства, науки и техники и современные методы их исследования.— В кн.: Итоги науки и техники. Техническая кибернетика, 1968. М.: Наука, 1970.
27. *Кляков Ю. И.* Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974.
28. *Костина Н. И.* Эмпирическое моделирование сложных систем.— В кн.: Всесоюз. конференции по теме: «Теория и методы математического моделирования»: Тез. докл. Куйбышев, 1978. М.: Наука, 1978.
29. *Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю.* Дискретное программирование. М.: Наука, 1969.
30. *Куликовский Р.* Агрегация, оптимизация и управление организационной структурой больших систем.— *Экономика и математические методы*, 1968, вып. 1.
31. *Кульба В. В., Цевиркун А. Д.* О формализованном распределении множества решаемых задач между различными узлами системы управления.— *АиТ*, 1970, № 9.
32. *Кульба В. В., Цевиркун А. Д.* Вопросы обеспечения достоверности при обработке первичной информации в автоматизированных системах управления (АСУ).— В кн.: Большие системы, массовое обслуживание, надежность: (Докл. II Всесоюз. совещания по статистическим методам теории управления). М.: Наука, 1970.
33. *Кульба В. В., Цевиркун А. Д.* О распределении множества решаемых задач между различными узлами автоматизированных систем управления АСУ.— В кн.: Автоматизированные системы управления. М.: Наука, 1972.
34. *Кульба В. В., Цевиркун А. Д.* Модели и методы проектирования АСУ (из опыта разработки АСУ «Металл»).— *Приборы и системы управления*, 1973, № 3.
35. *Кузнецко А. И.* Основные задачи теории управления сложными системами.— В кн.: Труды семинара «Сложные системы управления». Киев: Ин-т кибернетики, 1968, вып. 1.
36. *Лэсдон Дж.* Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975.
37. *Мамиконов А. Г., Цевиркун А. Д., Новиков В. Н., Акинфиев В. К.* Математическая модель и алгоритм выбора оптимальной структуры типового контура управления ЛА.— В кн.: Сб. трудов ИПУ. М.: ИПУ, 1975, вып. 6.
38. *Мамиконов А. Г., Пискунов А. Н., Цевиркун А. Д.* Модели и методы проектирования информационного обеспечения АСУ. М.: Статистика, 1978.
39. *Мамиконов А. Г., Кульба В. В., Цевиркун А. Д., Косаченко С. А.* Проектирование подсистем и звеньев АСУ. М.: Высшая школа, 1975.
40. *Мамиконов А. Г., Цевиркун А. Д., Кульба В. В.* Автоматизация проектирования АСУ. М.: Энергия, 1981.
41. *Мамиконов А. Г., Пискунов А. Н., Цевиркун А. Д.* Проектирование процедур преобразования информации в ИСС.— *Программирование*, 1976, № 4.
42. *Мамиконов А. Г., Пискунов А. Н., Цевиркун А. Д.* Модели и методы проектирования ИСС в АСУ.— В кн.: Тр. Всесоюз. школы-семинара по управлению большими системами. Тбилиси, 1972. Тбилиси: Мидвнерба, 1973.

43. *Месарович М., Такагара Я.* Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978.
44. *Месарович М., Мако Д., Такагара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
45. *Методы синтеза и планирования развития структур сложных систем.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1980.
46. *Мильтнер Б. Э.* Проблемы системного подхода к организации управления объединениями.— Экономика и математические методы, 1975, т. XI, вып. 6.
47. *Моисеев Н. Н.* Информационная теория иерархических систем.— В кн.: Гр. Всесоюз. школы-семинара по управлению большими системами. Тбилиси, 1972. Тбилиси: Мецниереба, 1973.
48. *Модин А. А.* Матричное моделирование организационных структур управления.— В кн.: Оптимальное планирование и совершенствование управления народным хозяйством/Под ред. Н. П. Федоренко. М.: Наука, 1969.
49. *Нечипоренко В. И.* Структурный анализ систем. М.: Сов. радио, 1977.
50. *Овсиевич Б. Л.* Модели формирования организационных структур. Л.: Наука, 1979.
51. *Первозванский А. А., Гайцгори В. Г.* Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. М.: Наука, 1980.
52. *Пискунов А. Н., Циркун А. Д.* Модели и методы определения главных массивов ИСС.— В кн.: Вопросы создания и проектирования АСУ. М.: ИПУ, 1975.
53. *Плискин Л. Г., Поликарпова А. А., Сагайдак Н. А.* Синтез иерархической структуры производственного комплекса по критерию трудоемкости алгоритма управления.— В кн.: Междунар. симпози. по проблемам организационного управления и иерархическим системам: Реф. докл. М.: ИПУ, 1972, ч. 1.
54. *Полов Г. Х.* Проблемы теории управления. М.: Экономика, 1970.
55. *Поспелов Д. А.* Введение в теорию вычислительных систем. М.: Сов. радио, 1972.
56. *Поспелов Г. С., Ириков В. А.* Программно-целевое планирование и управление. М.: Сов. радио, 1976.
57. *Рейдман Р. М.* О модификации метода «ветвей и границ» с ветвлением по обобщенным характеристикам.— Кибернетика, 1968, № 5.
58. *Серов С. С., Уздемир А. П.* Динамическая задача размещения предприятий отрасли и численный метод ее решения.— АИТ, 1976, № 4.
59. *Скуригин В. И., Малышев Н. Г., Гончаренко Г. И.* Метод конструирования автоматной нормативной алгоритмической модели производственной организации.— Управляющие машины и системы, 1975, № 2.
60. *Страшак А.* Методы синтеза структуры управления большими системами.— В кн.: Методы оптимизации управления в больших системах. София: Болгарская академия наук, 1968.
61. *Сьроежин И. М.* Очерки теории производственных организаций. М.: Экономика, 1970.
62. *Трапезников В. А.* Вопросы управления экономическими системами.— АИТ, 1969, № 1.
63. *Трапезников В. А.* Человек в системе управления.— АИТ, 1972, № 2.
64. *Ушаков И. А.* Надежность сложных информационно-управляющих систем. М.: Сов. радио, 1975.
65. *Филиппов В. А., Циркун А. Д.* Имитационные модели анализа и синтеза структуры крупномасштабных распределенных систем.— В кн.: Методы синтеза и планирования развития структур сложных систем. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1980.
66. *Филиппов В. А.* Имитационная модель функционирования распределенной системы управления заданной топологической структуры.— В кн.: Сб. трудов ИПУ «Построение автоматизированных систем обработки данных». М.: ИПУ, 1973.
67. *Флейшман Б. С.* Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. М.: Сов. радио, 1971.

68. Черняк Ю. И. Закономерности целеобразования в экономических системах.— В кн.: Информация и модели структур управления. М.: Наука, 1971.
69. Шор Н. В. Метод обобщенных градиентов в задачах блочного программирования.— Кибернетика, 1967, № 3.
70. Цвиркун А. Д. Структура сложных систем. М.: Сов. радио, 1975.
71. Цвиркун А. Д. Проблемы синтеза и управления развитием структур крупномасштабных систем.— В кн.: Материалы Всесоюз. семинара по методам синтеза и планирования развития структур сложных систем. М.: ИПУ, 1979.
72. Цвиркун А. Д., Медведев В. Н., Акинфиев В. К., Гладков И. А. Выбор топологической и функциональной структур иерархической автоматизированной системы управления.— В кн.: Сб. трудов ИПУ «Построение автоматизированных систем обработки данных». М.: ИПУ, 1978, вып. 16.
73. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К. и др. Инвестиционные модели планирования развития сложных систем (на примере энергетического строительства).— В кн.: Сб. трудов ИПУ «Построение автоматизированных систем обработки данных». М.: ИПУ, 1978, вып. 16.
74. Pearson J. D. Decomposition, coordination and multilevel systems.— IEEE Trans. Syst. Sci. Cybernet, 1966, vol. 2.
75. IFAC/IFORS/IIASA Workshop on systems analysis applications to complex programs. Bielsko Biala, Poland, June 1—6, 1977.
76. Rispoli L. Hierarchical computer control system. Putr. System Organization.— Instrum. and Contr. Syst., 1970, N 10.
77. Balachandran V. An integer generalized transportation model for optimal job assignment in computer networks.— Oper. Res., 1976, vol. 24, N 4.
78. Stamper R. Legol-2: A Language for specifying formal organisations.— LSE. The Legol Project, 1978.
79. Ansoff H. D., Brandenburg R. G. A language for organization design. Pt. I, II.— Manag. Sci., 1971, vol. 17, N 12.
80. Pritsker A. The GASP IV Simulation Language. New York: J. Wiley and Son, 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| Предисловие | 3 |
| Введение | 5 |
| Глава первая | |
| Проблемы анализа и синтеза структуры сложных систем | 7 |
| 1.1. Введение | 7 |
| 1.2. Проблемы анализа и синтеза структуры сложных систем | 8 |
| 1.3. Методы формализованного описания элементов систем и их взаимосвязей | 21 |
| 1.4. Основные характеристики структуры систем | 26 |
| 1.5. Классификация моделей и методов анализа и синтеза структуры сложных систем | 37 |
| Глава вторая | |
| Синтез структуры автоматизированных информационно-управляющих систем | 50 |
| 2.1. Введение | 50 |
| 2.2. Постановка общей задачи синтеза структуры | 52 |
| 2.3. Основные этапы и задачи синтеза структуры информационной системы | 57 |
| 2.4. Формализация задач выбора оптимального варианта структуры системы | 62 |
| 2.5. Формализованные методы распределения задач по узлам системы управления | 69 |
| 2.6. Методы синтеза структуры систем для независимых задач управления | 75 |
| 2.7. Методы решения задач синтеза структуры систем с учетом взаимосвязей по передаче информации между узлами | 83 |
| 2.8. Оптимизация структуры информационных систем | 92 |
| 2.9. Оптимизация структуры организационных систем | 103 |
| Глава третья | |
| Выбор топологической и функциональной структур иерархических систем управления | 114 |
| 3.1. Введение | 114 |
| 3.2. Задачи выбора вариантов построения узлов и их размещения | 116 |
| 3.3. Оптимизация распределения задач для совокупности взаимосвязанных подсистем | 120 |
| 3.4. Синтез структуры типовой подсистемы управления | 126 |
| Глава четвертая | |
| Управление развитием структур сложных систем | 140 |
| 4.1. Введение | 140 |
| 4.2. Формализация задач планирования развития систем | 141 |
| | 199 |

| | |
|--|------------|
| 4.3. Модель развития структуры сети вычислительных центров | 146 |
| 4.4. Комплекс инвестиционных моделей развития структуры крупномасштабных систем и его использование | 152 |
| Глава пятая | |
| Имитационное моделирование при анализе и синтезе структуры сложных систем | 161 |
| 5.1. Введение | 161 |
| 5.2. Методы выбора вариантов построения сложных систем с использованием имитационных и оптимизационных моделей | 162 |
| 5.3. Оптимизация структуры автоматизированных информационно-управляющих систем для задач оперативного типа | 168 |
| 5.4. Имитационная модель функционирования распределенной системы управления заданной топологической структуры | 182 |
| Литература | 195 |

Анатолий Данилович Цвиркун

ОСНОВЫ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Утверждено к печати Ордена Ленина Институтом проблем управления

Редактор издательства М. М. Гальперин. Художник Д. Богаров
Художественный редактор Н. Н. Власик. Технический редактор О. Г. Ульянова
Корректоры Л. В. Лукичева, В. Г. Петрова

ИБ № 24549

Сдано в набор 09.11.81. Подписано к печати 09.03.82. Т-00539. Формат 60×90¹/₄.
Бумага офсетная № 2. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 12,5.
Усл. кр. отт. 12,5. Уч.-изд. л. 13,5. Тираж 3700 экз. Тип. зак. 1133. Цена 1 р. 40 к.
Издательство «Наука» 117834 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука» 121093, Москва, Г-93, Шубинский пер., 10