

Министерство образования и науки Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники

**М.П. Силич, В.А. Силич**

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

**Учебное пособие**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению подготовки бакалавриата  
231000 «Программная инженерия»*

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2013

УДК 681.51.012(075.8)

ББК 32.817я73

С 36

**Рецензенты:**

**О.И. Пятковский**, д-р техн. наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационных систем в экономике  
Алтайского государственного технического университета, г. Барнаул

**С.П. Сущенко**, д-р техн. наук, профессор,  
заведующий кафедрой прикладной информатики  
Томского государственного университета

**Силич, Мария Петровна.**

С 36 Основы теории систем и системного анализа: учеб. пособие /  
М.П. Силич, В.А. Силич. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем  
управления и радиоэлектроники, 2013. – 340 с.

ISBN 978-5-86889-663-7

Посвящено рассмотрению основ теории систем и системного анализа. Даны основные понятия системного подхода, закономерности строения и функционирования систем, классификация систем. Описаны базовые модели систем, методы измерения и оценивания систем, методы декомпозиции и композиции, модели иерархических многоуровневых систем. Рассмотрена базовая методология системного анализа, а также прикладные методологии структурного и логического анализа. Описаны технологии проведения системного анализа. Приведены примеры применения аппарата теории систем и системного анализа для решения сложных задач в таких областях, как экономический анализ, проектирование и развитие систем организационного управления, анализ информационных ресурсов.

Предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения по направлению «Программная инженерия», а также аспирантов и специалистов, занимающихся проектированием сложных информационных систем и программно-технических комплексов, принятием решений при управлении организационно-технологическими, социально-экономическими, человеко-машинными системами.

УДК 681.51.012(075.8)

ББК 32.817я73

ISBN 978-5-86889-663-7

© Силич М.П., Силич В.А., 2013

© Томск. гос. ун-т систем управления  
и радиоэлектроники, 2013

## Введение

Организуя свое бытиё, человек упорядочивает пространство вокруг себя, систематизирует окружение путем порождения новых систем. Не будет преувеличением сказать, что человека окружает **мир систем**, бесконечное множество разнообразных систем со сложными связями и отношениями.

Мы часто употребляем в обыденной речи слово «система» в сочетании со словами «производственная», «нервная», «отопительная», «общественно-политическая», «уравнений», «взглядов» и т. д. При этом мы имеем в виду нечто сложное, состоящее из отдельных частей, и одновременно воспринимаемое как нечто целое, организующее взаимодействие частей для достижения единой цели.

Потребность в использовании понятия «система» возникла для объектов различной физической природы с древних времён: ещё Аристотель обратил внимание на то, что целое несводимо к сумме частей, его образующих. Термин «система» и связанные с ним понятия комплексного, системного подхода исследовались и подвергались осмыслению философами, биологами, психологами, кибернетиками, физиками, инженерами различных специальностей. Интерес к системным представлениям проявлялся не только как к удобному обобщающему понятию, но и как к средству постановки задач с большой неопределённостью [1].

История развития системных представлений первоначально шла по нескольким отдельным направлениям. Большой вклад в осознание системности материи и человеческого познания внесла **философия** — «наука наук», выполняющая роль интеграции, организации взаимосвязей и взаимодействия между различными научными направлениями. Результаты философии относятся к множеству всех существующих и мыслимых систем, носят всеобщий характер.

Однако системность являлась объектом исследования и других наук, прежде всего **кибернетики** — науки об общих законах управления. Первым в явной форме вопрос о научном подходе к управлению сложными системами поставил

М.-А. Ампер. На основе анализа опыта философских наук и классификации человеческих знаний в 1834 г. он выделил специальную науку об управлении государством и назвал ее кибернетикой. Далее к кибернетическому подходу обратился польский философ Б. Трентовский. В своей книге «Отношение философии к кибернетике как к искусству управления народами» он сделал попытку построения научных основ практической деятельности руководителя. С позиций диалектики Трентовский понимал, что общество, коллектив — это система, единство противоречий, разрешение которых и есть развитие. И все же общество середины XIX века оказалось не готовым воспринять идеи кибернетики, и она была забыта практически на столетие [2].

Важный вклад в познание закономерностей строения, организации и развития систем внес академик Е.С. Федоров. В 1891 г. им было сделано одно из величайших открытий в области минералогии и кристаллографии — существует только 230 типов структур кристаллических решеток и из них сформировано все разнообразие реального мира. Важным было осознать, что все невообразимое разнообразие природных тел реализуется из ограниченного и небольшого числа исходных форм [2]. Эта идея типизации базовых структур обнаружилась и в языкознании и в музыке.

Следующая ступень системных исследований связана с именем А.А. Богданова. В своем трехтомном труде «Всеобщая организационная наука (тектология)» (1911–1925 гг.) [3] он исследовал общие закономерности развития организации. Основная идея **тектологии** Богданова состоит в том, что все существующие объекты и процессы (физические, биологические, общественные) имеют определенную степень, уровень организованности. Все явления рассматриваются как непрерывные процессы организации и дезорганизации. К сожалению, в силу исторических причин тектология в то время не нашла распространения и практического применения.

В 30-е годы XX века австрийский биолог Л. фон Берталанфи выдвинул идею построения теории, приложимой к системам любой природы, названной им **общей теорией систем** [4]. Самым важным достижением Берталанфи является

введение понятия «открытой» системы. В отличие от замкнутых систем, которые достигают состояния равновесия, характеризуемого максимальной энтропией (хаосом) и минимальным использованием свободной энергии, открытые системы достигают устойчивого состояния, которое может быть направлено в сторону усложнения организации благодаря непрерывному потоку вещества, энергии и информации между системой и окружающей средой. Бергаланфи и его последователи стремились разработать формальный логико-математический аппарат теории систем. Однако задача до сих пор полностью не решена.

Массовое усвоение системных понятий началось в 1948 г., когда американский математик Норберт Винер опубликовал книгу «Кибернетика» [5]. Н. Винер крупно продвинулся в формализации процессов управления в больших технических системах, созданных на принципах поведения живых организмов. Впоследствии многие подходы и методы кибернетики были перенесены на управление организационными системами. Благодаря кибернетике в системном анализе сформировались следующие подходы: типизация моделей систем; формализация процессов управления; информационное моделирование и вычислительные эксперименты; оптимизация процессов и систем.

Как одно из направлений общей теории систем и кибернетики можно рассматривать **синергетику**, наибольший вклад в создание которой внесли И. Пригожин и Г. Хакен. Это новая междисциплинарная теория, в центре внимания которой находятся явления самоорганизации в живой и неживой природе, механизмы самопроизвольного усложнения формы материи или появления из хаоса упорядоченных структур [6, 7].

Идеи теории систем и кибернетики, связанные с общенаучными основами системных исследований, не всегда легко приложимы к практической деятельности. Поэтому потребности практики привели к возникновению направлений, носящих прикладной характер, таких как исследование операций, системотехника, системология и системный анализ. На рис. 1 основные направления «науки о системах» представлены в виде центрической системы, ядро которой составляют научные дисциплины теоретической направленности, а на орбите расположены прикладные дисциплины.

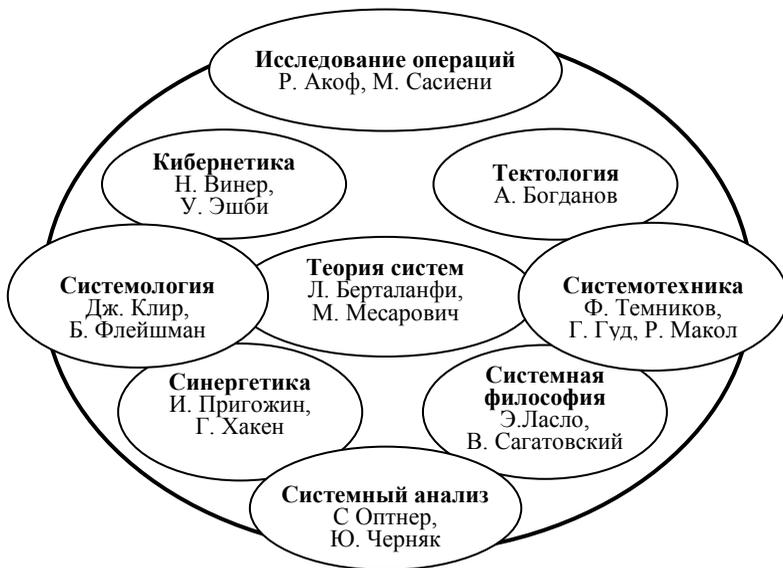


Рис. 1. Основные направления системных исследований

**Исследование операций** возникло в связи с задачами военного характера, однако в дальнейшем получило широкое распространение в экономических задачах, при решении проблем организации производства и управления предприятиями. Это направление широко использует математический аппарат, в частности, методы оптимизации, математического программирования и математической статистики. Наиболее хорошо разработаны модели и алгоритмы для следующих классов задач исследования операций: управление запасами, массовое обслуживание, выбор маршрута, упорядочение и координация, принятие решений в условиях противодействия [8].

Термин **системотехника** появился как эквивалент английского System Engineering при переводе книги Г. Гуда и Р. Макола [9]. Развитию этого направления в нашей стране активно способствовал Темников Ф.Е., организовавший в 1969 г. кафедру системотехники в Московском энергетическом институте. Объектом системотехники являются сложные технические комплексы, называемые также системами

«человек – машина», интегрированными системами, большими системами, системотехническими комплексами. Целью исследований являются методы создания, совершенствования и использования сложных технических комплексов [10].

**Системология** (термин предложен в 1965 г. И.Б. Новиком) создавалась как одно из направлений теории систем, ориентированное на применение системного подхода в разных сферах человеческой деятельности. Некоторые исследователи используют термин «системология» как аналог «системного анализа», однако фактически сложилось так, что большинство работ по системологии рассматривают онтологические, семиотические и лингвистические аспекты системного подхода (например, работы Мельникова [11], Дж. Клира [12]).

Наиболее конструктивным из направлений системных исследований в настоящее время считается **системный анализ**. В центре внимания этой научной дисциплины находятся методы ликвидации сложных проблем в условиях неполноты информации, ограниченности ресурсов, дефицита времени [2]. Имея в качестве цели ликвидацию проблемы или, как минимум, выяснение причин её возникновения, системный анализ привлекает для этого широкий спектр средств различных наук, а также эвристические методы решения слабо структурированных и не полностью формализованных задач. Его теоретической основой является материалистическая диалектика (в [2] системный анализ определяется как прикладная диалектика), общая теория систем и кибернетика. С практической точки зрения системный анализ есть система методов исследования или проектирования сложных систем для ликвидации проблемных ситуаций. Наиболее известные ученые, развивающие это направление, — С. Оптнер, Ю.И. Черняк, Д. Клиланд, В. Кинг, Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко, В.Н. Волкова и др.

Системный анализ широко применяется для изучения социально-экономических систем (предприятий, компаний, корпораций и других бизнес-систем), управления их функционированием и развитием. Типичными задачами, решаемыми посредством аппарата системного анализа, являются разработка целевых программ, выработка концепции развития системы, стратегическое планирование и прогнозирование,

совершенствование организационной структуры, комплексная оценка уровня развития системы. Для успешного решения этих и подобных задач необходимо не только знание методики системного анализа, методов и моделей, которые могут использоваться на различных его этапах, но и знание основных понятий теории систем, понимание закономерностей, присущих всем системам. Поэтому два научных направления — теория систем и системный анализ — объединены в одну учебную дисциплину, призванную дать комплексные системные представления как концептуального, так и прикладного характера.

Систему знаний, включаемых в дисциплину «Теория систем и системный анализ», можно представить в виде пирамиды (рис. 2), уровни которой расположены таким образом, что чем выше уровень, тем более прикладной, узконаправленный характер носят его составляющие.



Рис. 2. Уровни знаний, составляющих дисциплину «Теория систем и системный анализ»

**Основание пирамиды** составляют основополагающие понятия теории систем и системного анализа, свойства и закономерности строения, функционирования и развития систем, изложению которых посвящен *первый раздел* данного посо-

бия. Также в разделе даются основы информационного подхода к анализу систем, приводится их классификация.

**На втором уровне** расположены основные методы и модели теории систем и системного анализа. Их описание приводится *во втором разделе*. Все приводимые методы и модели сгруппированы в соответствии с тремя базовыми моделями систем — моделью черного ящика, моделью состава и моделью структуры — отражающими три подхода к рассмотрению системы. Модель черного ящика рассматривает систему как целостный объект, описываемый набором свойств. Основными вопросами, связанными с построением подобных моделей, являются вопросы выбора шкалы измерения/оценки свойств системы, способа измерения в условиях определенности и неопределенности, методов обработки результатов измерений. Модель состава рассматривает систему как совокупность частей (подсистем, элементов). Для формирования такого рода моделей применяются методы декомпозиции — последовательного расчленения системы на все более мелкие части с использованием различных оснований декомпозиции, а также методы композиции, использующие комбинаторный подход к формированию подсистем. В модели структуры системы акцент переносится на отношения между частями системы. Методы формирования таких моделей зависят от типа отношений, включаемых в модель. Так, различия между такими видами иерархий, как страты, слои, эшелоны и классы, определяются, прежде всего, используемыми отношениями.

**Третий уровень знаний**, включаемых в дисциплину, представлен методологиями системного анализа. Их назначение — разрешение сложных многофакторных проблем посредством приложения теории систем. Методология фиксирует содержание и последовательность действий по принятию и реализации решений, устраняющих проблему. Базовая методология системного анализа представлена в виде так называемой системной последовательности этапов принятия решений. Выбор конкретных моделей и методов, используемых на том или ином этапе, остается за системным аналитиком. Большинство методов предполагает выявление мнений экспертов и требует выполнения сложных экспертиз.

Базовая методология является отправной точкой для создания различных прикладных методологий системного анализа, в основу каждой из которых положена та или иная методология моделирования. Выделяют две основные группы прикладных методологий: структурный анализ и логический анализ. В центре внимания первой находится структурная модель исследуемой системы, представленная в виде иерархии подсистем, связанных отношениями «часть-целое». Вторая группа базируется на моделях, связывающих цели со средствами их достижения. Как правило, такие модели тоже представляют собой иерархии, но построены они на основе причинно-следственных связей. Базовая методология системного анализа, методы организации экспертиз, а также ряд методологий структурного и логического анализа приведены *в третьем разделе*.

***Верхний уровень компонентов*** теории систем и системного анализа составляют технологии проведения системного анализа. Их рассмотрению посвящен *четвертый раздел*. Технологии отличаются от методологий более четкой организацией процесса системного анализа, наличием конкретных рекомендаций относительно последовательности этапов анализа, состава работ и используемых процедур, методов и моделей. Кроме того, как правило, технологии предполагают использование компьютерных инструментальных систем поддержки. Большинство существующих системных технологий являются специализированными, ориентированными на конкретные виды систем, например, CASE-технологии разработки информационных систем, технологии реинжиниринга бизнес-процессов, САПР-технологии разработки технических систем. Универсальной, ориентированной на широкий класс систем, можно считать объектно-ориентированную технологию системного анализа, разработанную авторами данного пособия и описанную в четвертом разделе.

*В пятом разделе* рассматриваются примеры применения описанных в предыдущих разделах принципов, методов, моделей, методологий и технологий для решения сложных задач в таких областях, как экономический анализ, проектирование и развитие систем организационного управления, анализ информационных ресурсов.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

## 1.1. Определение системы

Существует несколько десятков определений понятия «система». Прямой перевод этого слова с греческого означает «состав», т. е. нечто составленное, соединённое из частей. Это свойство *членимости (делимости)* отражается практически во всех определениях системы. Однако система — не просто множество, совокупность частей. Компоненты системы находятся *во взаимосвязи*, они определенным образом организованы, благодаря чему и обеспечивается *целостность* системы. Примеры соответствующих **определений системы**:

- система — «организованное множество» (Ф.Е. Темников [13]);
- «комплекс взаимодействующих компонентов» (Л. фон Берталанфи) [14];
- «система — это совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях между собой и образующих некоторое целостное единство» (Философский словарь [15]);
- «система есть совокупность взаимосвязанных элементов, обособленная от среды и взаимодействующая с ней как целое» (Ф.П. Тарасенко [2]).

Некоторые исследователи подчеркивают, что отношения, существующие между частями системы, обуславливают определенные *свойства системы как целого*, ее качество<sup>1</sup>:

- «система есть совокупность объектов, свойство которой определяется отношением между этими объектами» (Ф.И. Перегудов и др. [16]);
- система — «множество объектов, на котором реализуется определенное отношение с фиксированными свойствами» (А.И. Уемов [17]);

---

<sup>1</sup> Качество — это свойства предмета, необходимые и достаточные для его отличия [18].

- «система — это множество элементов, структура которого является необходимым и достаточным условием наличия качества данного множества» (В.Н. Сагатовский [18]).

Все выше приведенные определения являются **дескриптивными**, т. е. описательными, объясняющими, что представляет собой система, из чего она состоит и чем характеризуется. Однако они не объясняют, как выделить систему, что считать системой. Ведь практически любой предмет, объект, любую вещь можно рассматривать как систему, причем один и тот же объект может быть представлен как различные системы. Например, предприятие мы можем рассматривать как социальную систему, если в центре внимания оказываются отношения между работниками, или как технологическую, если исследуются взаимосвязи производственных операций, или как экономическую, если подсистемы предприятия описываются в экономических терминах.

В **конструктивных определениях** система рассматривается как функция от цели, т. е. что считать системой определяется тем, для чего, с какой целью человек выделяет систему. Таким образом, в определение системы вводятся такие понятия, как **субъект** (наблюдатель, исследователь) и **цель** (задача) исследования системы:

- «система есть отражение в сознании субъекта (исследователя, наблюдателя) свойств объектов и их отношений в решении задачи исследования, познания» (Ю.И. Черняк [19]);

- «система есть конечное множество функциональных элементов и отношений между ними, выделенное из среды в соответствии с определенной целью в рамках определенного временного интервала» ([16]);

- «системой является то, что мы хотим рассматривать как систему» (Дж. Клир [12]).

Субъективность восприятия системы не отрицает объективности ее существования. В понятии системы объективное и субъективное составляют диалектическое единство, ведь система — это абстракция, вводимая для объяснения сложных объектов реального мира, а также для целенаправленной деятельности человека, решающего сложные проблемы.

При выделении искусственных систем, создаваемых человеком, понятие цели является определяющим. Приведем примеры определений подобных систем:

«система есть средство достижения цели» (Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко [2]);

«система — это средство решения проблемы» (С. Оптнер [20]).

В связи с вышесказанным нельзя считать, что только искусственные системы характеризуются целенаправленностью. Нужно отметить, что цель — есть понятие более широкое, чем сознательная цель, которая ставится человеком. В самом общем плане цель — это состояние, к которому направлена тенденция движения объекта [16], или результат реализации объективных закономерностей [2]. И в этом смысле можно различать субъективные и объективные цели.

**Определение системы через термины теории множеств.** Самому общему определению системы как совокупности взаимосвязанных элементов соответствует следующая запись (рис. 1.1, а):

$$S \underset{def}{=} \langle V, R \rangle,$$

где  $V$  — множество элементов системы;

$R$  — множество отношений между элементами.

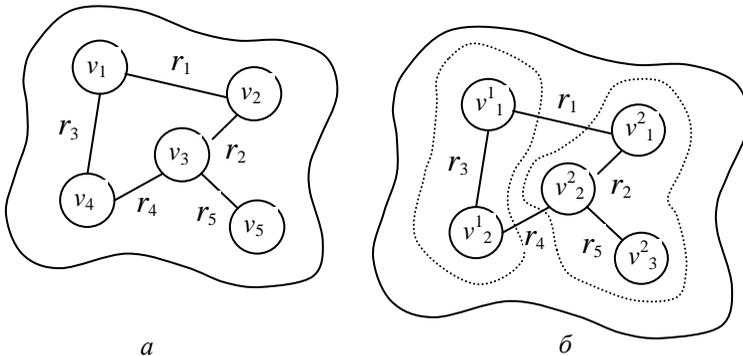


Рис. 1.1. Представление системы в виде множеств:  
а — с однородными элементами; б — с разнородными элементами

Если система состоит из элементов различной природы, то систему можно задать следующим образом (рис. 1.1, б):

$$S \subseteq V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n$$

или  $S \underset{def}{=} \langle V_1, V_2, \dots, V_n, R \rangle$ ,

где  $V_i$  — множество однородных элементов некоторого вида.

Иногда все элементы разделяют на два типа множеств: множество *входных объектов*  $X$ , воздействующих на систему, и множество *выходных результатов*  $Y$ . В этом случае систему определяют как  $S \subseteq X \times Y$ .

Можно задать систему как функцию выходных объектов от входов  $S: X \rightarrow Y$ .

Определению системы, в которое дополнительно введено множество *свойств*  $Q$ , характеризующих как отдельные элементы, так и всю систему в целом, соответствует запись

$$S \underset{def}{=} \langle V_1, V_2, \dots, V_n, Q, R \rangle,$$

$$Q = Q_s \cup Q_v,$$

где  $Q_s$  — множество свойств системы;

$Q_v$  — множество свойств элементов.

Конструктивное определение системы, включающее *наблюдателя*  $N$  (лицо, представляющее объект или процесс в виде системы) и *цель* (совокупность или структуру целей)  $Z$ , может быть представлено как

$$S \underset{def}{=} \langle V_1, V_2, \dots, V_n, Q, R, N, Z \rangle.$$

Дополнительно в формулу могут быть введены: окружающая *среда*  $Sr$  системы и *интервал времени*  $\Delta T$ , т. е. период, в рамках которого будет существовать система и её цели:

$$S \underset{def}{=} \langle V_1, V_2, \dots, V_n, Q, R, N, Z, Sr, \Delta T \rangle.$$

**Определение системы через свойства систем.** Ввиду множественности определений системы очень часто систему определяют через свойства. В список свойств, присущих любым системам, разные авторы включают разные свойства, но большинством авторов упоминаются следующие:

1) **целостность**. Всякая система обладает целостностью, обособленностью от окружающей среды, выступает как нечто единое, обладающее общими свойствами и поведением;

2) **делимость**. Целостность системы не означает ее однородности и неделимости: в *системе* всегда можно выделить определенные составные части;

3) **коммуникативность**. Изолированность систем является относительной, поскольку элементы, образующие систему, взаимодействуют со средой. Цельность системы основана на том, что внутрисистемные связи между элементами в каком-то отношении сильнее, существеннее, важнее, чем внешние связи со средой [2];

4) **динамичность**. В результате внешних и внутренних взаимодействий все системы находятся в динамике, подвержены постоянным изменениям. Они не являются застывшими, неизменными образованиями;

5) **развитие**. Несмотря на постоянные возмущающие воздействия со стороны внешней среды открытые системы способны не только стабильно функционировать и поддерживать динамический баланс со средой, но и усложнять свою внутреннюю структуру, развиваться;

6) **целеустремленность**. Динамика системы как последовательность изменений ее состояния, как правило, носит не случайный характер. Она отражает целенаправленность системы. Именно цель определяет и структуру, и функцию системы.

Первые три свойства выходят на первый план при структурном (статическом) подходе к системам, т. е. при исследовании строения системы и так называемой надсистемы — системы более высокого порядка, включающей исходную систему. Остальные свойства исследуются при функциональном (динамическом) подходе, т. е. при изучении процессов функционирования и развития систем.

Перечисленные выше и некоторые другие свойства систем, а также связанные с ними понятия и закономерности, более подробно будут рассмотрены в двух следующих параграфах.

## 1.2. Закономерности систем: статический подход

**Иерархичность.** В соответствии со свойством делимости система всегда рассматривается как совокупность частей — компонентов системы. При этом составные части сами могут состоять из других, более мелких, частей. Различают понятия элемента системы и подсистемы.

**Элементы** — это части системы, которые мы рассматриваем как неделимые. **Подсистемами** называются части системы, состоящие более чем из одного элемента.

При этом ответ на вопрос, что считать элементом, а что — подсистемой, не всегда однозначен. Например, в качестве элементов системы управления компанией можно считать сотрудников компании. Однако каждого сотрудника можно рассматривать как человеческий организм, состоящий из различных органов, которые, в свою очередь, также могут быть разделены на составные части и т. д. Поэтому не случайно в определении элемента указано, что это части, которые мы рассматриваем как неделимые. Предел делимости определяется целями рассмотрения системы, т. е. с точки зрения решения конкретной задачи.

Неоднозначен также и ответ на вопрос, как проводить границы между подсистемами. Расчленение системы на подсистемы может быть выполнено различными способами и определяется используемыми основаниями декомпозиции (признаками разбиения)<sup>2</sup>. Например, для предприятия подсистемы можно выделить по пространственному расположению (региональные отделения), а можно — по функциональному признаку (подсистемы снабжения, маркетинга, сбыта, финансов, научных исследований и т. д.) или по видам выпускаемой продукции.

В любом случае в качестве подсистем должны выступать более или менее самостоятельные части системы, обладаю-

---

<sup>2</sup> Более подробно декомпозиция и основания декомпозиции будут рассмотрены в разделе 2 (п. 2.4.1).

щие определенной целостностью, т. е. они сами могут рассматриваться как системы более низкого уровня. Связи элементов внутри подсистем должны быть сильнее, чем связи между подсистемами.

Очевидно, что и сама система может рассматриваться как подсистема более крупной системы. Например, предприятие может быть частью производственного объединения. Можно рассматривать предприятие как часть отрасли, региона, наконец, как часть экономической системы страны.

Таким образом, для любой системы применим **принцип иерархичности**: отдельные компоненты системы (и сама система) выступают как части системы более высокого уровня и одновременно как системы для компонентов низшего уровня.

Вложенность более мелких частей системы в более крупные схематически может быть представлена в виде многоуровневой иерархии (рис. 1.2). На верхнем уровне иерархии представлена система в целом, на нижнем уровне — элементы системы, на промежуточных уровнях — подсистемы.

Необходимо подчеркнуть, что когда говорят о свойстве иерархичности систем, как правило, имеют в виду иерархичность *состава* системы. Отношения между частями системы при этом имеют смысл «состоять из ...» или «являться частью ...» (в литературе часто встречаются английские варианты названия этого вида отношений — «include» и «part of»). Структуры на основе этого вида отношений всегда представляют собой иерархию. Структуры же, отражающие другие виды отношений, могут принимать совершенно разные формы<sup>3</sup>.

Например, организационная структура управления компаний, включающая отношения подчиненности между сотрудниками, может быть не только иерархической, но и матричной, сетевой.

Иерархическая упорядоченность систем была в числе первых закономерностей теории систем, которые выделил и исследовал Л. фон Берталанфи. Очень образно сформулировал данную закономерность Кёстлер.

---

<sup>3</sup> Различные формы структур будут рассмотрены в подразд. 2.2 и 2.5



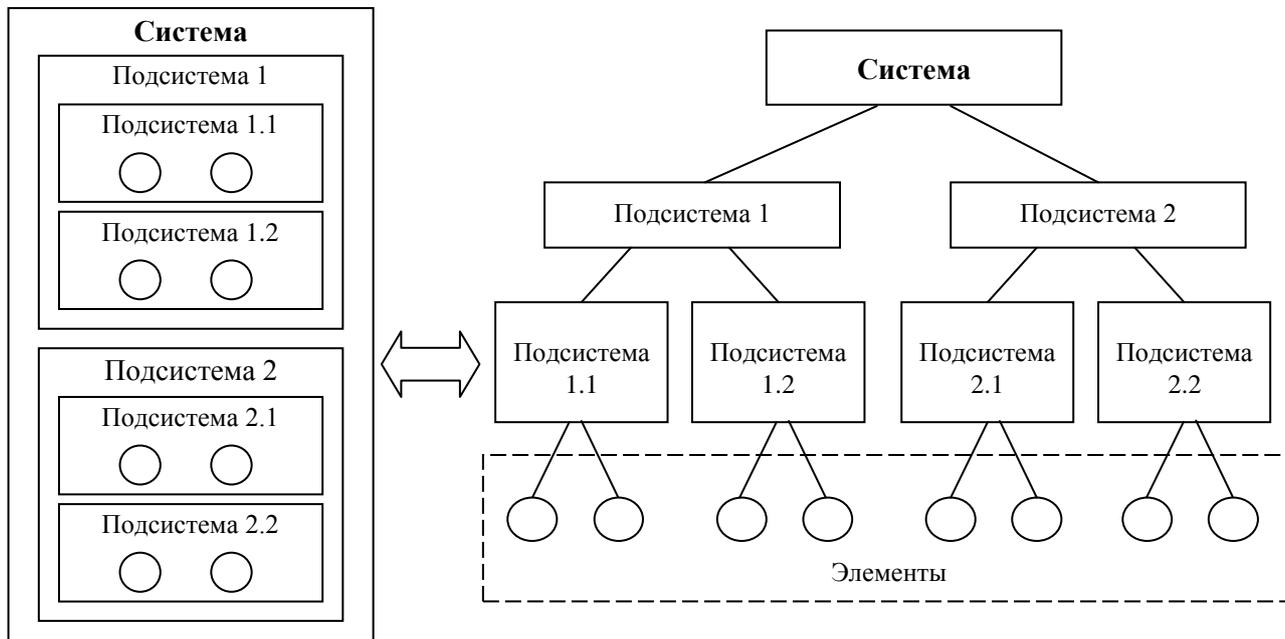


Рис. 1.2. Иерархичность системы



По формулировке Кёстлера (цитируется по [1]) каждый уровень иерархии обладает свойством «двуликого Януса»: «клик», направленный в сторону нижележащего уровня, имеет характер автономного целого (системы), а «клик», направленный к узлу (вершине) вышестоящего уровня, проявляет свойства зависимой части (элемента вышестоящей системы, каковой является для него составляющая вышестоящего уровня, которой он подчинен).

Философы доказали, что иерархичность — неотъемлемое свойство материи. Современные представления позволяют говорить о мире, как о бесконечной иерархической системе систем, находящихся на разных уровнях иерархии, взаимодействующих друг с другом [2].

**Целостность, эмерджентность.** Отдельные элементы и подсистемы, а также система в целом имеют множество свойств. *Свойства* — это то, что позволяет отличать объекты друг от друга или отождествлять их друг с другом. Свойство объекта, от которого зависят все его другие свойства, называется *сущностью*. Форма обнаружения (выражения) сущности, отражающая внешние свойства и отношения предмета, называется *явлением* [18, 21].

Свойства элементов, взятых вне системы, отличаются от их свойств в рамках системы. Элементы, функционируя в системе, играют определенную роль в ней. Соединение множества элементов в единое целое, в котором каждый из них занимает определенное место, обуславливает появление новых свойств системы, которых не было у элементов. Например, отдельные детали, из которых собирается самолет, не обладают свойством летать. Это свойство появляется лишь у всего самолета в целом, когда все его части соединены должным образом и начинают определенным способом взаимодействовать. Эта несводимость свойств системы к сумме свойств ее компонентов называется эмерджентностью.

*Эмерджентность* — появление у системы при объединении составляющих ее частей в целое принципиально новых качеств, не имеющих у отдельных частей.

Формально данное свойство можно записать следующим образом [1]:

$$Q_s \neq \sum_{i=1}^n q_i,$$

где  $Q_s$  — свойства системы;

$q_i$  — свойства  $i$ -го элемента (компонента).

Другими словами, свойства системы в целом не есть просто сумма свойств составляющих ее частей. Система обладает свойствами, которыми не могут обладать ее составляющие. В качестве примера проявления данной закономерности в системах организационного типа можно привести знаменитое исследование Адама Смита, в котором он описал эффективность, достигнутую рабочими мануфактуры по производству булавок. Один рабочий, выполняя все операции самостоятельно, мог производить не более 20 булавок в день. В мануфактуре один рабочий тянул проволоку, другой — выпрямлял ее, третий — обрезал и т. д. Такая специализация позволила десяти работникам производить 48000 булавок ежедневно [22].

Несводимость свойств системы  $Q_s$  к свойствам элементов  $q_i$  не означает независимости множеств  $Q_s$  и  $q_i$ . Наоборот, свойства системы зависят от свойств составляющих ее элементов:  $Q_s = f(q_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Одно из условий появления эффекта эмерджентности уже упоминалось — это функциональная специфичность элементов. Но свою функцию, свое назначение элемент может выполнить только при условии его взаимодействия с другими элементами. Таким образом, принцип эмерджентности обеспечивается за счет выполнения *принципа взаимодействия*: единство обеспечивается взаимодействием частей.

Под **взаимодействием** понимается взаимное воздействие элементов друг на друга, когда изменение одного из них влечет изменение другого. Другими словами, это установленные связи между элементами.

Здесь необходимо пояснить, что такое связь и в чем ее отличие от отношения. **Связь** (зависимость) — это такое отношение между объектами, когда изменениям одного из них соответствуют изменения другого [18]. **Отношение** — это

более широкое понятие и, по сути, означает соотнесение объектов друг с другом, установление различия или тождества в определенном смысле. Не все отношения можно назвать связями. Например, констатируя, что один предмет больше другого или что один город восточнее другого, мы устанавливаем отношения, но не связи, так как при этом мы ничего не говорим ни об изменениях этих объектов, ни о том, зависят ли они друг от друга.

Элементы системы являются связанными между собой, а также с окружающей средой разнообразными связями — информационными, вещественными, энергетическими. При этом внутренние связи элементов образуют структуру системы.

**Структура** (от лат. *structura* — строение, расположение) — совокупность связей между частями системы [2].

Свойство системы как целого проявляется во взаимодействии с окружающей средой, т. е. реализуется через внешние связи (как функция системы), но само это свойство возникает лишь благодаря взаимодействию частей, т. е. благодаря внутренним связям, составляющим структуру системы (рис. 1.3).

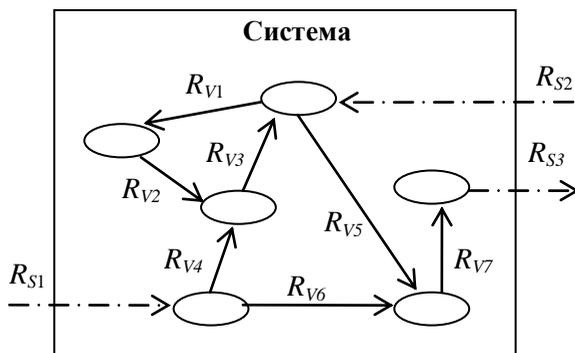


Рис. 1.3. Внутренние и внешние связи системы

В случае если компоненты системы действуют несогласованно, взаимосвязи между ними постепенно ослабевают и отдельные части системы становятся локальными образованиями, т. е. целое распадается.

Если обозначить суммарную силу (мощность) внутренних связей  $R_{Vi}$  через  $W_{Vi}$ , а суммарную мощность внешних связей  $R_{Sj}$  через  $W_{Sj}$ , то для обеспечения целостности системы необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$W_{Vi} > W_{Sj}.$$

**Коммуникативность.** Функционирование любой системы происходит в некоторой окружающей ее внешней среде, определенным образом взаимодействующей с системой. Очевидно, что при выделении среды невозможно включить в нее все то, что находится вне системы. Целесообразно рассматривать всё то во внешней среде, что некоторым образом связано с системой. Окружающая среда должна состоять из релевантных объектов, т. е. объектов, непосредственно или косвенно влияющих на систему. Такому представлению соответствует следующее определение среды: *среда* есть совокупность всех объектов, изменение свойств которых влияет на систему, а также тех объектов, чьи свойства меняются в результате поведения системы [23].

Иногда разделяют понятия микро- и макросреды. В первую включают объекты среды, имеющие непосредственные связи с системой, например, обменивающиеся с ней материальными, энергетическими или информационными потоками. Макросреду составляют объекты, оказывающие опосредованное влияние через более или менее длинные цепочки причинно-следственных связей.

Например, при исследовании организаций в микросреду, как правило, включают потребителей, поставщиков, партнеров, инвесторов, в макросреду — совокупность технологических, географических, политико-правовых, социально-культурных факторов, которые оказывают влияние на деятельность организации и которые необходимо учитывать при принятии стратегических решений (рис. 1.4).

Осознание взаимозависимости системы и окружающей среды очень важно для управления системами. Необходимо изучать, анализировать внешнюю среду, прогнозировать ситуацию с тем, чтобы вовремя и адекватно реагировать на изменение среды.



Рис. 1.4. Окружающая среда организации

### 1.3. Закономерности систем: динамический подход

**Динамичность, историчность.** Любая система не является застывшим, неизменным образованием. Наоборот, в результате внешних и внутренних взаимодействий система находится в динамике, подвержена постоянным изменениям. Другими словами, система обладает поведением. **Поведение** (behaviour) — совокупность действий, изменений изучаемой системы, ее всякая реакция на внешние воздействия (изменение, развитие, рост) [24].

Поведение проявляется в изменении с течением времени состояний системы, т. е. является функцией времени и параметров:

$$P = F(Q, t),$$

где  $P$  — показатель состояния или положения системы;

$Q$  — совокупность ее параметров;

$t$  — время;

$F$  — зависимость.

**Состояние** — это множество одновременно существующих свойств системы. Можно задать любое состояние системы как совокупность характеризующих ее величин — *параметров*. Например, состояние человека может характеризоваться такими параметрами, как температура, кровяное давление, пульс. К параметрам, характеризующим состояние некоторой экономической системы, относят объем выпускаемой продукции, производительность труда, фондоотдачу, рентабельность и т. д.

Когда одно состояние сменяется другим, это концептуализуется как событие. **Событие** — это переход в новое состояние (в некоторый момент времени имело место одно состояние, а в некоторый последующий — уже другое). Таким образом, поведение (функционирование) системы есть цепочка событий, процесс, состоящий из последовательно сменяющих друг друга состояний.

Можно рассматривать значения параметров, характеризующих состояние системы, как координаты в пространстве, которое называется *пространством состояний*. Тогда со-

стояние системы может быть представлено как точка, а поведение (функционирование) системы — как траектория движения в пространстве состояний. Если состояние системы характеризуется двумя параметрами, то траекторию движения системы можно представить кривой в двумерном пространстве.

На рис. 1.5 представлен пример траектории движения системы в пространстве, задаваемом двумя параметрами —  $z_1$  и  $z_2$ . Начальное состояние системы задано координатами  $Z' = (z_1', z_2')$ , конечное — координатами  $Z'' = (z_1'', z_2'')$ .

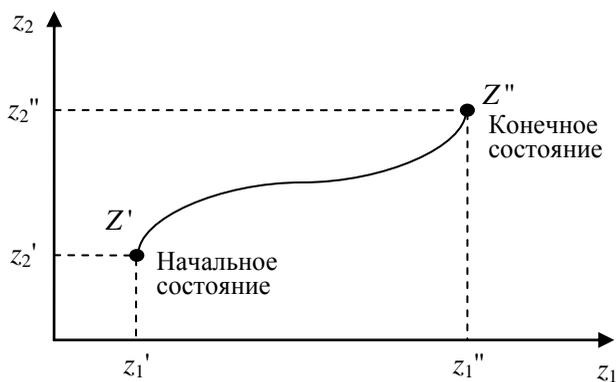


Рис 1.5. Движение системы в пространстве состояний

В процессе своей жизнедеятельности системы проходят определенные этапы — становление, расцвет, упадок. Последовательность этапов от возникновения до распада системы называется **жизненным циклом (ЖЦ)**. Поведение системы (траектория движения в пространстве состояний) на разных этапах различно. На рис. 1.6 приведен пример траектории в пространстве, задаваемом интегральным параметром «эффективность».

Этапы жизненного цикла следуют в строгой последовательности и характеризуются определенными предсказуемыми состояниями.

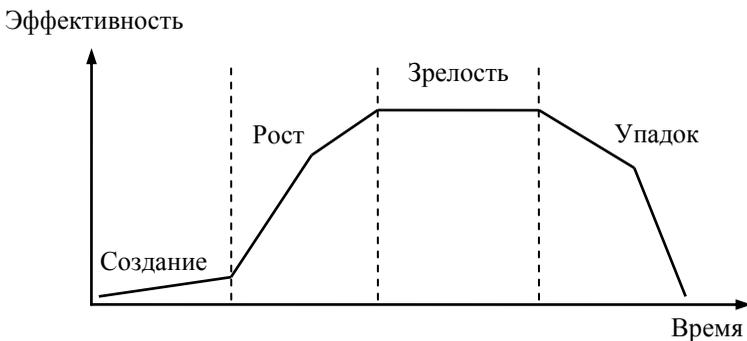


Рис. 1.6. Жизненный цикл системы

Для различных видов систем выделяют различные типовые этапы жизненного цикла. Например, для информационных систем, как правило, выделяют такие этапы жизненного цикла, как анализ требований, проектирование, реализация, компоновка, тестирование, эксплуатация. В менеджменте есть понятие жизненного цикла изделия, включающего этапы: исследований и разработок, внедрения на рынок, расширения рынка, зрелости, насыщения рынка, вытеснения с рынка и реализации остатков готовой продукции. Для социально-экономических систем (организаций) выделяют этапы предпринимательства, формализации управления, выработки структуры, упадка [25].

Прохождение системами определенных стадий развития называется закономерностью *историчности*. Руководителям организаций и проектов, конструкторам информационных и технических систем следует учитывать данную закономерность, так как это помогает правильно выбрать стратегию управления.

**Устойчивость, развитие.** Состояние системы в каждый момент времени зависит от предыдущего состояния, а также от внутренних и внешних взаимодействий. При этом взаимодействия могут быть непредсказуемыми, неопределенными. Они называются *возмущениями* или *возмущающими воздействиями*.

Динамическая система может находиться либо в равновесном состоянии, либо в состоянии перехода из состояния в состояние. Понятие *равновесие* определяют как способность системы в отсутствии внешних возмущающих воздействий (или при постоянных воздействиях) сохранять свое состояние сколь угодно долго [1]. Состояние равновесия выражается некоторой фиксированной точкой в пространстве состояний.

Под *переходным процессом* понимается процесс изменения во времени координат (параметров) системы, имеющий место при переходе ее из одного равновесного состояния в другое или из одного устоявшегося режима работы в другой [26].

Различают два вида равновесного состояния — *статическое* и *динамическое равновесие*. В качестве примера статического равновесия можно привести состояние покоящегося физического тела. Динамическое равновесие системы обуславливается действием на нее факторов, вызывающих в среднем равные и противоположные следствия. Пример динамического равновесия — сохранение неизменного среднего уровня воды в водохранилище при равных расходе и притоке воды [26].

Состояние равновесия, в которое система способна возвращаться, называют *устойчивым состоянием равновесия*. При этом под *устойчивостью* понимают способность системы возвращаться в состояние равновесия после того, как она была из этого состояния выведена под влиянием *внешних* (или в системах с активными элементами — *внутренних*) возмущающих воздействий [1].

Открытые системы, характеризуемые самопроизвольностью (отсутствием жесткой детерминации) поведения компонентов системы и интенсивным обменом веществом и энергией между компонентами системы и между системой и средой, способны к *саморегулированию*, т. е. способны приспосабливаться к изменениям внешней среды. При этом различают два уровня саморегулирования:

1) *самостабилизация (адаптация)* — способность системы в ответ на поток возмущений из внешней среды вырабатывать соответствующие корректирующие действия, возвращающие систему в устойчивое состояние динамического баланса с внешней средой;

2) *самоорганизация (развитие)* — способность системы в ответ на поток возмущений из внешней среды реорганизовать свою внутреннюю структуру.

Самоорганизация выражается в новых устойчивых состояниях, которые более стойки к возмущениям, чем предыдущие. Адаптивные системы выживают в средах, в которых возмущения находятся в пределах диапазона их корректирующих действий; самоорганизующиеся системы эволюционируют в более сложные и более жизнеспособные системы [27].

К саморегулируемым системам относятся живые организмы, в том числе человек. Примером адаптации человеческого организма к неблагоприятным условиям является появление пота в жару или расширение сосудов в мороз. Биологическая самоорганизация основана на генетической программе сохранения вида. Ее проявление заключается в мутации живых организмов и естественном отборе более жизнестойких особей.

В качестве примера самоорганизации в неживых системах обычно приводят ячейки Бенара — явление, которое состоит в следующем. В плоском сосуде с жидкостью, равномерно подогреваемом снизу, самопроизвольно образуются конвективные вихревые течения, если мощность подогрева превосходит некое критическое значение. Вихри образуют регулярную структуру (рис. 1.7 [28]).

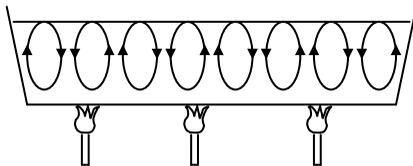


Рис. 1.7. Ячейки Бенара

Можно привести много примеров подобного рода: образование перистых облаков и геологических структур, испускание лазером когерентной световой волны и др. Подобного рода явления изучает наука синергетика [28].

Вопросами устойчивости и саморегулирования социально-экономических систем занимается теория экономического равновесия. В ней исследуется проблема создания условий, при которых предложение товаров полностью удовлетворяет спрос на них, причем производители и потребители товаров не стремятся к нарушению сложившегося состояния равновесия [26].

Способность систем к самоадаптации называют **законом самосохранения**, а способность к самоорганизации — **законом развития**. В основе этих способностей лежит более глубокая закономерность, базирующаяся на сочетании двух противоречивых тенденций: с одной стороны, для всех систем, в том числе и для открытых, развивающихся, справедлив второй закон термодинамики («второе начало»), т. е. стремление к *возрастанию энтропии*; а с другой стороны, наблюдаются *негэнтропийные* тенденции, лежащие в основе эволюции. Дж. Ван Гиг называет эту особенность «дуализмом» [29].

Развивающиеся системы имеют некоторый предел, определяемый ее структурой и свойствами. Например, тот или иной вид животных можно охарактеризовать свойственными ему предельными возможностями. Причем если в закрытых детерминированных системах состояние системы полностью определяется ее начальным состоянием и временем перехода к текущему состоянию, а значит достижение предельного состояния обусловлено временем и начальными условиями, то в отношении открытых систем это не так. Как показал Л. Фон Берталанфи, открытые системы характеризуются тем, что стремление к предельным состояниям и достижение этих состояний не определяется начальными условиями.

Эту закономерность Берталанфи назвал *эквифинальностью* и определил ее как «способность в отличие от состояния равновесия в закрытых системах, полностью детерминированных начальными условиями, ... достигать не зависящего от времени состояния, которое не зависит от начальных условий и определяется исключительно параметрами системы» [4].

**Целенаправленность, управляемость.** Динамика (последовательность изменений состояния) развивающихся систем отражает их **целенаправленность**.

**Цель** — желаемый результат деятельности системы (модель желаемого будущего) [2]. Различают *объективные* и *субъективные цели*. Объективные цели реализует природа, субъективные цели ставит, формирует человек, т. е. первые формируют естественные системы, вторые — искусственные, создаваемые человеком или сообществом людей.

Существует также понятие *имманентной* цели, т. е. цели, внутренне присущей системе. Системы, обладающие имманентной целью способны к выбору своего поведения. Наиболее наглядным примером такого рода систем является человек. Для неживых систем, как искусственных, так и естественных, цель задается извне и определяется задачами использования системы [10].

Поскольку цель есть будущий результат деятельности системы, то она существенно зависит от временного горизонта. Различают градации понятия цели по степени достижимости и отдаленности. На одном конце этой шкалы лежит *идеал* — результат, который невозможно получить, но к которому можно неограниченно стремиться, на другом конце расположен *итог, задача* — ближайший желаемый результат, достижимый за сравнительно короткий период времени.

Цель может быть задана как *желаемое состояние*, т. е. некоторая точка (или область) в пространстве состояний, характеризующая вполне конкретными значениями (интервалом значений) параметров состояния (рис. 1.8). В этом случае параметры состояния являются критериями достижения цели.

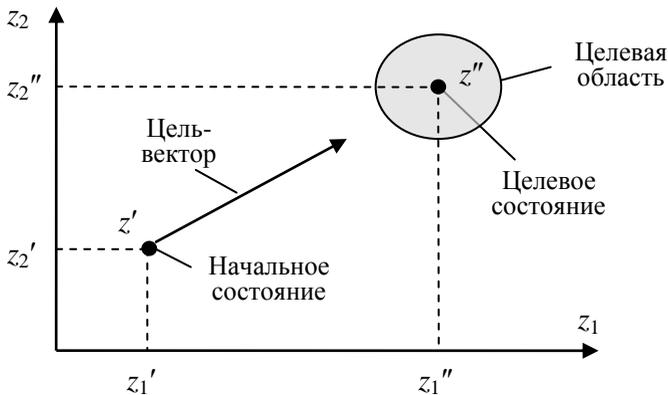


Рис. 1.8. Способы задания целей системы в пространстве состояний

Например, перед предприятием руководство может поставить цели: повысить производительность в два раза, сократить срок изготовления продукта на 25–30 %, увеличить

среднее количество обрабатываемых заявок до 2–30 в день, увеличить объем выпуска продукции до 100 тыс. шт. в месяц.

Цель может быть задана как *желаемое направление* изменения системы, т. е. как вектор в пространстве состояний (см. рис. 1.8). Примеры формулировок такого рода целей: «повысить качество обслуживания клиентов», «максимизировать прибыль», «снизить себестоимость продукции», «сократить среднее время обработки заявки клиента».

«Правильное» функционирование, приводящее к заданной цели, может быть достигнуто за счет «правильной» конструкции системы, ее структуры. Однако для сложных открытых систем, действующих в постоянно меняющихся условиях и при изменяющихся целях, этого оказывается недостаточно. Необходимы специальные усилия, чтобы рассчитывать траекторию, приводящую систему к цели и заставить систему двигаться по этой траектории (изменять свое состояние по заданной программе), т. е. необходимо управление системой.

**Управление** — воздействие на объект для достижения заданной цели [2]. Необходимыми условиями при этом должны быть управляемость системы и достижимость цели.

*Управляемость* — это способность системы определенным образом в заданном направлении и временных границах реагировать на сигналы управления или на управленческое воздействие. Система управляема, если каждому воздействию управления соответствует строго определенное состояние параметров объекта, неуправляема или малоуправляема, — если объект управления меняет свои параметры произвольно [30].

Цель является *достижимой*, если она входит в так называемое *множество достижимости* — множество всех таких состояний, в которые можно привести динамическую систему при помощи допустимого управления из начальной точки (начального состояния) за заданный промежуток времени [24].

На рис. 1.9 приведена классическая кибернетическая схема функционирования системы с управлением. В системе выделяется управляющая подсистема и управляемая (объект управления). В управляемой системе происходит некоторый процесс преобразования входов в выходы. Например, на промышленном предприятии производственный процесс заключа-

ется в преобразовании сырья, материалов с помощью ресурсов (энергии, оборудования, работников) в конечную продукцию.



Рис. 1.9. Схема функционирования системы с управлением

Управляющая система формирует *управляющие воздействия*, которые поступают на вход объекта управления. Они позволяют удерживать управляемую подсистему на траектории, приводящей систему в целевое состояние.

Управляющие воздействия могут быть реализованы в различной форме. Например, при управлении механическим объектом (станком, конвейером), осуществляемом человеком, воздействие на управляемый объект осуществляется механическим путем — при помощи рычагов, тяг, пневматического привода и т. д. В организационных системах управляющие воздействия реализуются в виде управляющей информации (планов, приказов, распоряжений), поступающих от руководителей исполнителям. Управление человеком своими действиями осуществляется посредством нервных импульсов, передающихся от центральной нервной системы к двигательным нервам (мышцам, железам).

Для выработки управляющих воздействий управляющей системе необходима информация об объекте управления и о внешней среде. На основании этой информации разрабатывается программа управления и выбираются соответствующие управляющие воздействия, которые передаются объекту управления по каналу связи.

Однако не всегда при реализации управляющих воздействий достигается запланированный результат. Дело в том, что всякая система испытывает более или менее сильные

возмущающие воздействия, нарушающие заданные зависимости между входами и выходами системы, т. е. нарушающие требуемое функционирование. Эти возмущения могут быть как внешними, так и внутренними. Для хозяйствующих организаций в качестве внешних возмущающих воздействий выступают стихийные бедствия, перебои в снабжении, изменения курсов валют и т. д., а в качестве внутренних — возникающие внутрипроизводственные конфликты, аварии и др.

В случае простых систем, например несложных технических устройств, влияние возмущающих воздействий либо невелико, либо хорошо известно. Поэтому для достижения поставленной цели достаточно задать нужную программу, т. е. последовательность управляющих воздействий, не интересуясь полученным результатом (выходом системы). Такая система называется *разомкнутой*.

В случае же сложных систем часто оказывается, что процессы на неуправляемых входах отличаются от ранее предполагаемых, либо существенно оказывается действие неучитываемых входов и система «сходит с нужной траектории». Целесообразно использовать информацию о реальном выходе системы для определения дополнительного управления, которое в ближайшем будущем возвратит выходы на нужную траекторию.

Передача информации с выхода системы на ее вход (в данном случае на вход управляющей подсистемы, которая перерабатывает ее и передает в виде управляющих воздействий на вход управляемой подсистемы) называется *обратной связью* (см. рис. 1.9). Системы с обратной связью, т. е. способные воспринимать и использовать информацию о результатах своей деятельности, называют *замкнутыми*.

*Принцип обратной связи*, который гласит, что управление сложной системой может осуществляться только при условии получения информации о результатах реализации предыдущих управляющих воздействий, — один из самых важных принципов управления.

Важность обратной связи можно пояснить на следующем примере. Человек вряд ли сможет пройти скольконибудь значительное расстояние в городе, если он будет идти

с закрытыми глазами и не пользоваться тростью. Ему необходимо получать информацию, правильно ли он идет, и корректировать свое движение.

Хозяйствующее предприятие, реализуя разработанный план, должно контролировать ход его выполнения, так как возникающие отклонения могут приводить к его срыву. В ходе контроля анализируется информация, поступающая по каналам обратной связи (фактические показатели), сравнивается с запланированными результатами и, при необходимости, вырабатываются корректирующие указания, т. е. осуществляется регулирование.

Различают положительную и отрицательную обратную связь. *Положительная обратная связь* характеризуется тем, что корректирующие управляющие воздействия действуют на систему в том же направлении, в котором движется система. При *отрицательной обратной связи* дополнительное управление действует на систему в направлении, противоположном тенденции ее изменения.

Предельные возможности управления сформулировал У.Р. Эшби. Он вывел закономерность, известную под названием *закон необходимого разнообразия* [31]. Суть ее состоит в следующем. Система управления вырабатывает то или иное управляющее воздействие (принимает решение) в зависимости от решаемой проблемы, от сложившейся ситуации. Если на объект управления воздействуют случайные внутренние и внешние возмущающие воздействия, то имеет место разнообразие проблем, решаемых управляющей системой. Принятие решения, адекватного сложившейся ситуации, снижает исходное разнообразие проблем, так как уменьшает неопределенность. Эшби доказал, что неопределенность управления есть разница между разнообразием проблем  $V_D$  и разнообразием решений  $V_R$ :

$$V_D - V_R.$$

Уменьшение неопределенности может быть достигнуто лишь за счет соответствующего увеличения  $V_R$ : «только разнообразие может уничтожить разнообразие». Другими словами, для того чтобы создать систему, способную справиться с решением проблемы, обладающей определенным разнооб-

разием, нужно, чтобы система имела еще большее разнообразие, чем разнообразие решаемой проблемы, или была способна создать в себе это разнообразие [31].

Таким образом, любая система управления (техническая, биологическая, экономическая) для оптимизации процесса управления должна располагать достаточным разнообразием управляющих воздействий. Из этого закона следует, что невозможно спроектировать простую систему управления для сложной системы, действующей в недетерминированной среде. Это необходимо учитывать при разработке и совершенствовании систем управления предприятиями. Способами, помогающими справиться системе управления предприятия с разнообразием проблем при усложнении производственных процессов, являются:

- увеличение численности аппарата управления;
- делегирование полномочий по принятию решений на нижестоящие уровни, вплоть до исполнительского уровня, децентрализация принятия решений;
  - привлечение работников нижестоящих уровней к процессу принятия решений на более высоких уровнях;
  - использование формальных и эвристических методов и моделей принятия решений (как универсальных, так и ориентированных на определенные классы задач управления);
  - автоматизация, использование компьютерных информационных систем — систем управления базами данных, систем поддержки принятия решений, экспертных систем и т. д.

## **1.4. Информационный подход к анализу систем**

Роль информации в существовании систем и их познании огромна. Можно выделить два основных направления использования информационного подхода в теории систем и системном анализе. Первое связано с вопросами отображения информации о системах, количественного измерения информационных потоков, идущих от анализируемой системы и воспринимаемых исследователем. Эти вопросы имеют большое значение для моделирования систем.

Второе направление связано с процессами управления, реализуемыми целенаправленными динамическими системами, на которые воздействует динамически изменяющаяся внешняя среда. Для понимания закономерностей управления используются такие основные понятия теории информации, как неопределенность, энтропия, количество информации и др. Недаром А.Н. Колмогоров дал следующее определение кибернетики как науки об управлении: «кибернетика — это наука, которая занимается изучением систем любой природы, способных воспринимать, хранить и перерабатывать информацию и использовать ее для управления и регулирования» (мы цитируем данное определение по [2]).

**Информация.** На бытовом уровне термин «информация» понимается как «сведения, знания, данные, сообщения», т. е. нечто, связанное с сознанием человека и общением между людьми. Однако существуют и другие формы информации. Например, такие явления, как чувствительность некоторых растений к прикосновению, способность живых организмов реагировать на изменение характеристик среды (температуры, освещенности и т. д.), соответствие между положением стрелки на вольтметре и напряжением на его клеммах — есть примеры восприятия и использования информации. *Информация* в широком смысле — это *отражение* одного объекта на другой, т. е. когда состояние одного объекта находится *в соответствии* с состоянием другого. В настоящее время информация рассматривается как фундаментальное свойство материи, т. к. свойство отражения присуще всей материи.

Понятие информации обычно предполагает наличие двух объектов — источника информации и потребителя. Информация от источника к потребителю передается посредством *сигналов*, являющихся материальными носителями информации. Примеры сигналов — речь, звуки музыки, радиоволны, магнитофонная запись, световые сигналы, письменный текст. Один и тот же носитель информации (физический объект или поле) может передавать разные сигналы, например, колебания воздуха могут передавать человеческую речь, музыку, шум прибоя, пение птиц. Следовательно, в качестве сигнала выступают *состояния* носителя информации.

Информация, переносимая сигналом, как правило, имеет некоторый смысл для потребителя, отличный от смысла самого факта поступления сигнала. Это достигается за счет специальных соглашений, называемых *кодом*. Например, люди могут договориться считать один удар барабана сигналом приближения противника. Для человека, не знающего о таком соглашении, этот звук такой информации не несет [32]. Следовательно, для успешного восприятия информации должно быть соответствие кодов источника и потребителя. В искусственных системах согласование кодов взаимодействующих объектов организуется специально. В природных системах согласование кодов происходит в самой структуре систем через естественный отбор различных вариантов [2].

Общая схема передачи информации приведена на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Схема передачи информации

Сообщение, вырабатываемое источником (человеческая речь, музыкальное произведение, письменный текст, изображение), преобразуется с помощью передатчика в сигнал, вид которого удобен для передачи по каналу связи. Чаще всего в современных системах связи таким видом являются колебания тока (напряжения) или электромагнитного поля. Тип передатчика зависит от вида «естественного» и «искусственного» сигнала. Например, передатчиком при телефонной передаче является микрофон, при телеграфной передаче — телеграфный ключ, при телевизионной передаче — передающая антенна. Затем сигнал передается по каналам связи (электрическим, акустическим, оптическим, радиоканалам и т. д.) приемнику. Приемник обеспечивает обратное преобразование сигналов в сообщения. При передаче сигнала по каналу связи к полез-

ным сигналам примешиваются помехи (шумы) от различных источников. Например, при передаче электрических сигналов помехами могут являться разряды атмосферного электричества, помехи от других линий электропередачи и т. д. [26].

В результате всех преобразований при передаче информации, искажений и помех оказывается, что сообщение, поступающее к получателю, всегда в той или иной степени отличается от сообщения, отправленного источником. Поэтому важнейшей проблемой, решаемой теорией информации, является проблема способности системы связи доставлять получателю сообщения с минимальными потерями и искажениями [26].

**Теория информационного поля**, разработанная Денисовым А.А., занимается исследованием процессов отображения и анализа пространственно-распределенных систем, вопросами моделирования (отображения материальных систем в виде информационных моделей). Она опирается на аппарат математической теории поля.

В основе данной теории лежит понятие информационного поля, обобщающее понятия физических полей (гравитационных, электромагнитных и др.). Наиболее универсальным свойством материи, объясняющим механизм всеобщей взаимосвязи и взаимозависимости явлений, является свойство материи *обладать изменяющейся структурой*, т. е. существовать *в пространстве и времени* в форме универсального поля, называемого информационным. Это поле создается всей совокупностью окружающих нас предметов и явлений, выступающих источниками поля [1].

С позиций материализма материя есть объективная реальность, данная нам в ощущении. Наши органы чувств дают нам информацию, являющуюся копией отражаемой материи. Поскольку ощущение является источником информации об окружающем мире, то, говоря современным языком, *материальные объекты даны нам в информации*.

Таким образом, продукт отражения (информация) есть *функция отображаемого*. Обозначим через  $M$  измеряемое материальное свойство (цвет, масса, заряд) и через  $J$  — чувственную (воспринимаемую) информацию о нем. Адекватность

информации  $J$  отображаемой материи  $M$  определяется так называемой относительной информационной проницаемостью среды  $R_k$ , в которой происходит отражение. Если отражение полное, то  $R_k = 1$ ; если среда затрудняет чувственное отражение, то  $R_k < 1$ ; если же отражение невозможно ввиду непроницаемого барьера между нами и объектом отражения, то  $R_k = 0$ . В общем случае  $R_k$  является функцией от  $M$ :  $R_k(M)$ .

Можно считать (с определенными допущениями), что информация пропорциональна измеряемой материи с коэффициентом, равным  $R_k$ :

$$J = R_k M .$$

Данное соотношение иллюстрирует постулат об *адекватности отражения материи* [1]. Все объекты и явления природы не только содержат определенную информацию, но и непрерывно испускают ее в окружающее пространство. Поскольку чувственное отражение протекает во времени и в пространстве, то информация  $J$  представляет собой сумму потоков информации от отдельных частей материального объекта.

Если говорить об отражении материального объекта некой произвольной замкнутой вокруг него поверхностью  $S$ , то *полная информация* составит из потоков информации, приходящихся на единицу  $dS$  площади этой поверхности. Интенсивность отражения соответствует той доли доступной нам информации, которая приходится на единицу поверхности, т. е. вектор плотности информации (интенсивности потока отражения)  $O = dJ/dS$ . В таком случае имеет место теорема Гаусса:

$$J = \oint_s O dS ,$$

где  $\int_s$  — интеграл по всей замкнутой поверхности [1].

Эта теорема — математическое выражение философского положения о познаваемости мира.

Доступность информации подразумевает и субъективный ее отбор. Мы воспринимаем ту информацию, которая представляет для нас интерес, и некоторым образом на нее реагируем. Это называется *логическим отражением*.

Подобно тому, как материальные свойства с помощью чувственного восприятия адекватно отражаются окружающей средой, логическое отражение адекватно потоку чувственной информации. Другими словами, в отсутствии априорной информации об отражаемом объекте интенсивность потока логической информации  $E$  пропорциональна интенсивности потока чувственной информации  $O$ . Соотношение интенсивности этих информационных потоков характеризуется безразмерной константой  $R_o$ , зависящей от логической реакции на поток чувственной информации. Таким образом, можно записать:  $E = R_o O$ . Это математическая запись *закона логического отражения*.

В связи с этим законом нужно отметить, что под логикой понимается не только субъективная человеческая логика (логическая реакция на информацию, заключающаяся в ее отборе, осмыслении и выборе соответствующего поведения), но и объективная логика природы в виде причинно-следственных связей источника и приемника информации.

Из закона логического отражения следует, что хотя материальные объекты различной природы в принципе получают одинаковый поток информации об отражаемом материальном свойстве, но их реакция на этот поток может быть различна в зависимости от величины  $R_o$ , характеризующей природу соответствующего объекта.

Выше изложенные законы отражения при всей своей универсальности ограничены элементарными свойствами материальных объектов типа заряда, массы, цвета и т. д., в то время как большинство объектов *многокачественны*. Так объект, обладающий свойством пищи, представляет собой систему элементарных материальных свойств вроде массы, вкуса, запаха, цвета и пр., не сводимую к простой сумме этих свойств. Это тем более верно в отношении систем, состоящих из совокупности элементов, взаимодействие которых определяет появление различных взаимозависимых свойств системы.

Сложный объект представляет собой вектор  $M$ , компоненты которого — элементарные материальные свойства, причем если  $M$  представляет единое целое, то целостность системы проявляется во взаимозависимости свойств. В ре-

зультате при отражении объекта мы имеем векторное соотношение  $J = R_k M$  или [33]:

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ J_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_{m1} & R_{m2} & \cdots & R_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ M_n \end{pmatrix},$$

где  $J_k$  и  $M_k$  — компоненты соответственно вектора информации (восприятия)  $J$  и вектора материальных свойств  $M$  системы;

$R_{kk}$ ,  $R_{ki}$  — собственные и взаимные проницаемости среды, причем  $R_{kk}$  характеризуют отражение отдельно взятых материальных свойств, составляющих целое, а  $R_{ki}$  присущи только восприятию вектора  $M$  как единого целого.

Целостность чувственного восприятия может быть количественно определена через отношение суммы всех недиагональных элементов вектора восприятия к сумме его диагональных членов [33]. Подчеркнем, что число  $t$  компонентов вектора информации (число ощущений) необязательно равно числу  $n$  материальных компонентов, поскольку взаимозависимость последних может создавать синтетические ощущения вроде *удовольствия* или *комфорта* или взаимно ослаблять ощущения вплоть до полной компенсации. Точно так же при логическом отражении, помимо набора  $R_o$ , присущих логике отдельных компонентов, может появиться набор констант, связанных с логикой целостного системного поведения.

Таким образом, изложенный аппарат справедлив и применительно к сложным целостным материальным системам. Здесь наибольшую трудность составляет измерение свойства целостности (т. е. взаимных проницаемостей), которое нередко имманентно присуще лишь отражающему объекту и не может быть зафиксировано никаким иным прибором. Например, удовольствие, испытываемое конкретным человеком, хотя и вызванное определенным набором материальных условий,

не всегда в аналогичной ситуации возникает даже у другого человека, не говоря уже о технических средствах измерения. С учетом этого удается посредством изложенного аппарата моделировать разные сложные явления, которые порождаются физическими явлениями, но как целое к ним не сводятся.

На основе теории информационного поля были промоделированы процессы в физически неоднородных (электрогидравлических) системах, некоторые экономические явления, акты человеческого поведения и др. [33].

**Энтропия, количество информации.** Несколько другой подход к измерению количества информации используется в кибернетике. Поскольку в центре внимания кибернетики находятся вопросы управления, то и информация оценивается с точки зрения ее полезности для управления.

Суть управления состоит в преобразовании информации: блок управления воспринимает текущую информацию о состоянии объекта управления и результатах его деятельности, а также о состоянии внешней среды для выработки соответствующей управляющей информации, которая затем передается объекту управления. В случае детерминированного поведения управляемого объекта и среды, т. е. при отсутствии случайных внешних и внутренних возмущающих воздействий, блок управления не испытывает нужды в текущей информации. В случае, когда поведение интересующих объектов случайно и можно говорить лишь о вероятности наступления того или иного события, очевидно, что любая информация приводит к снятию априорной неопределенности. Таким образом, процесс получения информации можно интерпретировать как изменение неопределенности в результате приема сообщения [26].

Количественной мерой степени неопределенности является энтропия. Если некоторый случайный объект  $A$  может принимать конечное множество возможных состояний (исходов)  $A_1, \dots, A_n$  с соответствующими вероятностями  $p_1, \dots, p_n$ ,

то энтропия этого случайного объекта  $H(A) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$ .

Выбор данного функционала в качестве меры неопределенности объясняется тем, что он удовлетворяет ряду оче-

видных требований. В частности, он равен нулю в том и только том случае, когда вероятность одного из состояний равна единице, а остальных — нулю, т. е. когда отсутствует всякая неопределенность. С другой стороны,  $H(A)$  достигает максимального значения, когда вероятности всех исходов равны, т. е. в случае максимальной неопределенности [26].

Кроме того, в случае, когда имеется два независимых случайных объекта  $A$  и  $B$ , энтропия этих двух объектов  $H(A \cap B)$  равна сумме энтропий каждого, т. е. к неопределенности одного объекта добавляется неопределенность другого. Если же случайные объекты  $A$  и  $B$  — зависимые, то энтропия  $H(A \cap B)$  тоже больше энтропий каждого из этих объектов, однако обычно меньше простой суммы, так как условная энтропия некоторого случайного объекта меньше (или равна) безусловной энтропии:  $H(A/B) \leq H(A)$ . Для пояснения последнего утверждения можно привести пример, описанный в [26]. Пусть случайными событиями являются вызовы учеников к доске на уроке. Вызов одного из учеников уменьшает неопределенность вызова другого.

Приведенная формула информационной энтропии К. Шэннона, основателя теории информации, оказалась тождественной формуле Больцмана для термодинамической энтропии (энтропии закрытой термодинамической системы). Это совпадение носит не только формальный, но и содержательный характер. Основываясь на понятии информационной энтропии, можно определить *количество информации* о некотором случайном объекте как разность априорной (до получения информации) и апостериорной (после получения информации) энтропий этого объекта, т. е.  $I(X, Y) = H(X) - H(X/Y)$ .

Среди свойств количества информации можно отметить следующее. При преобразовании данных содержащееся в них количество информации не может быть увеличено, т. е. преобразование позволяет представить информацию в более удобном, компактном виде, но оно не может внести новую полезную информацию.

Рассмотренный выше метод измерения количества информации полностью игнорирует ее смысл (содержание) и полезность для достижения цели (ценность, целесообразность).

Семантический и прагматический подходы, учитывающие соответственно смысловое содержание и полезность информации, разрабатываются в рамках семиотики — отрасли научных знаний, изучающей различные свойства знаковых систем [26].

## 1.5. Классификация систем

Существуют различные классификации систем, использующие разные признаки различения (табл. 1.1).

Таблица 1.1  
Различные виды классификаций систем

Признак классификации	Классы систем
Происхождение	Естественные (живые, неживые), искусственные (абстрактные, материальные), смешанные
Сложность	Простые, сложные
Изолированность	Открытые, закрытые
Характер функционирования	Стабильные, развивающиеся (самостабилизирующиеся, самоорганизующиеся)
Степень организованности	Хорошо организованные, плохо организованные (диффузные)
Способ задания целей	Цели задаются извне, цели формируются внутри
Способ управления	Самоуправляемые, управляемые извне, с комбинированным управлением; с программным управлением, регулируемые; с управлением по параметрам, с управлением по структуре

Рассмотрим основные классификации систем.

**По происхождению** системы подразделяются на три основных класса (рис. 1.11):

1) **природные (естественные)** — системы, существующие в живой и неживой природе, возникшие без участия человека. Примеры таких систем – атом, молекула, организм, популяция;

2) **искусственные** — системы, созданные человеком:

*материальные (реальные)*, состоящие из физических объектов, собранных человеком в систему с некоторой целью (механизмы, машины, автоматы, роботы, технические комплексы);

*абстрактные (идеальные)* — системы представлений, созданные средствами мышления (учения, теории, методологии, проекты, языки). Абстрактные системы по существу являются модельным (на определенном уровне формализма и абстракции) отображением либо средством отображения реальности. По типу используемого формализма можно выделить различные подклассы абстрактных систем: аналитические, логические, алгоритмические, образные и др. Абстрактные системы, как правило, имеют и материальное воплощение — отображение в виде текста, диаграмм, рисунков и т. д. на бумажных или электронных носителях;

3) *смешанные* — системы, представляющие собой объединения природных и искусственных объектов (эргономические системы (комплексы «человек – машина»); организационные системы (включающие людей, а также технические устройства).



Рис. 1.11. Классификация систем по их происхождению

Весьма важным является деление систем **по сложности**. Поскольку трудно точно определить границу между простой и сложной системой, можно говорить лишь о степени сложности по некоторой шкале, на одном конце которой расположены совсем простые системы, на другом — очень сложные.

Имеется два принципиально различных подхода к определению сложности. Один подход связывает сложность не с

особенностями самой системы, а с уровнем знаний исследователя о системе, с особенностями формирования и использования модели системы.

Приведем примеры соответствующих определений сложных систем:

1) «сложной называется система, в модели которой не хватает информации для эффективного управления» [2];

2) «единственной специфической особенностью сложных систем является то, что наше знание о них ограничено» [6].

Исходя из данной точки зрения на сложность, одна и та же система может быть идентифицирована как сложная (если недостаток информации о системе не позволяет успешно управлять ею или предсказывать ее поведение) и как простая (если исследователь хорошо представляет себе структуру системы и законы ее функционирования). Например, для человека, не знакомого с устройством часов, данная система является сложной, а для часовщика — простой.

Другой подход заключается в определении понятия сложных систем через выделение характерных особенностей этих систем. К числу этих особенностей относятся [34]:

- *многомерность*, обуславливаемая как наличием большого числа подсистем, так и наличием большого числа связей между подсистемами;

- *многообразие природы* подсистем и связей, которое характеризуется их различной физической сущностью;

- *многообразие структуры*, обуславливаемое как разнообразием структур подсистем, так и разнообразием объединения подсистем в единую систему;

- *многокритериальность*, обуславливаемая разнообразием целей отдельных подсистем, а также разнообразием требований, предъявляемых со стороны других систем.

Нужно отметить, что понятия «большая» и «сложная» система — разные. Большую систему отличает только *размерность*, т. е. это система, состоящая из большого числа элементов. Существенной характеристикой сложной системы является *многообразие* (видов элементов, связей, структур, целей). Система может быть большой, но не сложной. Например, поезд, состоящий из большого числа одинаковых

товарных вагонов, вряд ли можно считать сложной системой, хотя он, несомненно, относится к классу больших систем.

**По степени изолированности** от окружающей среды системы подразделяются на два класса:

1) **закрытые** — изолированные системы, не взаимодействующие со средой;

2) **открытые** — системы, взаимодействующие со средой, обменивающиеся с ней материей, энергией, информацией.

Понятие закрытых систем порождено физическими науками. Это относительное понятие, так как абсолютно закрытых систем не бывает. Можно говорить о степени замкнутости системы с точностью до принятой чувствительности модели. Так, если среда оказывает несущественное влияние на некоторый процесс, протекающий внутри системы, то систему можно считать замкнутой по данному процессу.

Закрытость/открытость системы влияет на степень выраженности энтропийных или неэнтропийных тенденций. В системах с высокой степенью изолированности от среды наблюдается возрастание энтропии, поскольку, в соответствии со вторым законом термодинамики, состояние равновесия для таких систем характеризуется максимальной энтропией и минимальным использованием свободной энергии. Таким образом, закрытые системы имеют тенденцию к разрушению структуры, к иссяканию.

В открытых системах приток энергии предотвращает энтропию и позволяет достигать устойчивого состояния, не сопровождающегося разрушением структуры. При этом использование свободной энергии (при определенных условиях) может быть направлено даже в сторону усложнения системы.

**По характеру функционирования** (по способности *менять свою структуру и поведение*) и по характеру изменений системы можно отнести к одному из следующих классов.

1. **Стабильные** — системы, структура и функции которых практически не изменяются в течение всего периода их существования [10]. Как правило, качество функционирования стабильных систем со временем только ухудшается. К данному классу относится, прежде всего, широкий круг неживых систем, как естественных, так и искусственных.

2. *Развивающиеся* — системы, структура и функции которых с течением времени претерпевают существенные изменения [10]. Качество функционирования данных систем со временем может повышаться. Примерами развивающихся систем могут служить живые организмы, социальные системы (предприятия, учреждения, компании).

Среди развивающихся систем можно выделить подклассы *самостабилизирующихся (адаптивных)* и *самоорганизующихся* систем, в которых происходят соответственно процессы самостабилизации и самоорганизации (см. п. 1.3). Для того чтобы в системе происходили процессы адаптации и развития, необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, это должна быть открытая система, характеризующаяся интенсивным обменом веществом и энергией с ее окружением. Вторым обязательным условием является наличие активных элементов, поведение которых характеризуется самопроизвольностью (отсутствием жесткой детерминации извне), сочетающейся с их активным взаимодействием.

Весьма близка к классификации по характеру функционирования классификация **по степени организованности**. При этом под организованностью понимается степень упорядоченности, детерминированности поведения системы. По данному признаку системы подразделяют: на *хорошо организованные*, поведение которых можно описать в виде детерминированных зависимостей, и *плохо организованные (диффузные)*, характеризующиеся стохастичностью поведения, нестабильностью отдельных параметров [1].

Существует также классификация **по способу задания целей**, включающая класс систем, для которых *цели задаются извне*, и класс систем, в которых *цели формируются внутри системы*. Как правило, первому из этих классов соответствует класс стабильных систем, так как стабильные системы не способны к каким-либо активным изменениям, для них цель определяется извне, исходя из задач их использования. К классу систем, самостоятельно формирующих свои цели, относятся развивающиеся системы, т. к. они способны к выбору своего поведения в соответствии с внутренне присущей (имманентной) целью.

**По способам управления** можно привести ряд классификаций, отличающихся классификационным признаком. Так, в зависимости от того, входит ли управляющий блок в систему или является внешним по отношению к ней, выделяют классы *самоуправляемых систем*, *управляемых извне* и *с комбинированным управлением*. По тому, используется ли в процессе управления обратная связь, различают системы *с программным управлением* (без обратной связи) и *регулируемые* (с обратной связью). По виду изменений в объекте управления, осуществляемых блоком управления, различают системы *с управлением по параметрам* (управление состоит в подстройке параметров) и *с управлением по структуре* (управление состоит в подстройке структуры) [2].

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что представляет собой система в соответствии с дескриптивным определением?
2. Чем отличается конструктивное определение системы от дескриптивного? Какие существенные элементы вносятся в это определение?
3. Как можно проиллюстрировать дескриптивное и конструктивное определения системы с помощью терминов теории множеств?
4. Перечислите основные свойства систем.
5. В чем различие между подсистемами и элементами? Приведите примеры тех и других.
6. В чем состоит принцип иерархичности?
7. Поясните следующие понятия: свойство, сущность, явление.
8. Что такое эмерджентность? Каковы условия появления эффекта эмерджентности?
9. Что называется отношением, связью, структурой?
10. Каково соотношение мощности внутренних и внешних связей?
11. Что относится к окружающей среде системы?
12. Поясните следующие понятия: поведение, состояние, событие. Каким образом они отображаются в пространстве состояний?
13. Что называется жизненным циклом? Как это понятие связано с закономерностью историчности?

14. Что такое статическое, динамическое, устойчивое равновесие, переходной процесс?
15. В чем отличие процессов самостабилизации и самоорганизации?
16. Поясните закономерность эквивинальности.
17. Что такое цель? Какие виды целей вы знаете?
18. Что называется управлением и управляемостью?
19. Чем отличаются замкнутые и разомкнутые системы управления?
20. В чем состоит принцип обратной связи?
21. Поясните закон необходимого разнообразия.
22. Что такое информация? Приведите схему передачи информации.
23. Каковы основные положения теории информационного поля?
24. Как измеряется количество информации?
25. Приведите классы систем по следующим признакам классификации: происхождение, сложность, изолированность, характер функционирования, степень организованности, способ задания целей, способ управления.

## 2. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

### 2.1. Моделирование

**Понятие модели.** В соответствии с постулатом об адекватности отражения материи (см. подразд. 1.3) человек формирует представление об объектах и явлениях окружающего мира в виде некоторых абстрактных структур в его сознании, которые он может воплощать и в виде материальных объектов, например, в виде макетов, чертежей, карт и т. д. Подобные абстрактные и материальные *образы* реальных объектов и называются моделью:

- **модель** представляет искусственный, созданный человеком объект любой природы (умозрительный или материально реализованный), который замещает или воспроизводит исследуемый объект [26];

- **модель** является представлением объекта, системы или понятия в некоторой форме, отличной от формы их реального существования [35].

Модель не обязательно является объектом-заместителем реально существующего в материальной природе объекта-оригинала. Оригиналом может быть и представление человека о несуществующем (возможно, пока не существующем или вообще неосуществимом) объекте, явлении, понятии. Гипотезы, проекты, планы — это тоже модели.

Человек использует модели в познавательной деятельности, а также для планирования, организации практической деятельности потому, что они позволяют в более наглядной, «выпуклой», структурированной форме представить знания. Можно говорить о модели как о *способе существования знаний* или структурированном знании. *Принцип моделирования* состоит в том, что замещение исходного объекта аналогом позволяет выделить скрытую от наблюдения сущность оригинала. Моделирование является обязательным, неизбежным

действием во всякой целесообразной деятельности человека, пронизывает и организует ее [2].

Модель не тождественна оригиналу. Она соответствует оригиналу в каком-то определенном смысле и до определенной степени. Это *упрощенный, приближенный* образ, отображающий оригинал лишь в конечном числе отношений. И дело не только в том, что, создавая модель, человек зачастую ограничен в ресурсах и времени. Дело в том, что человек формирует модель с какой-то целью, для решения определенной задачи, и при этом он сознательно отображает в модели только главные, наиболее существенные (с точки зрения решаемой им задачи) свойства оригинала и опускает ненужные детали, лишь отвлекающие от решения задачи. *Модель является целевым отображением* [2].

Для одного и того же объекта может быть построено множество различных моделей, отвечающих различным целям. Например, модель, отображающая форму и внешний вид радиоприемника, используется дизайнером, для изучения принципов работы радиоприемника больше подходит модель в виде структурной схемы. На рис. 2.1, *а*, *б* приведены обе модели.

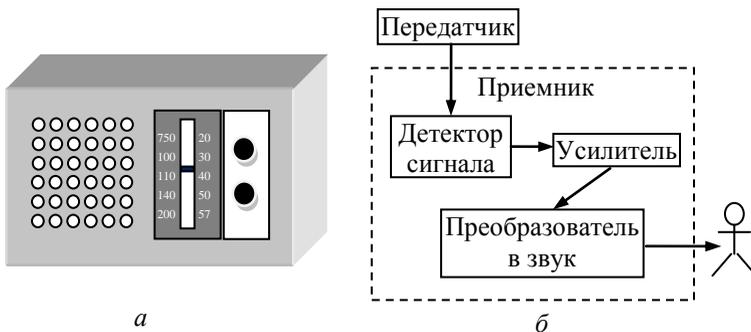


Рис. 2.1. Различные модели радиоприемника:  
*а* — модель внешнего вида; *б* — структурная схема

Приведенные на рисунке модели иллюстрируют два *вида подобия*. Если подобие модели на рис. 2.1, *а* внешнему виду радиоприемника можно считать *прямым*, то схема на рис. 2.1, *б* является собой *условное* подобие: прямоугольники с текстом

внутри мы условились считать отображением блоков (устройств), а линии со стрелками — отображением сигналов. Имеется и третий вид подобия — *косвенное* подобие. Оно обнаруживается в виде совпадения или достаточной близости абстрактных моделей различных физических процессов (например, электрических и механических) [2].

Еще одна причина упрощения модели по сравнению с оригиналом связана с ограничениями, накладываемыми существующими методами оперирования моделью. Примерами упрощений, вызванных этой причиной, являются: уменьшение размерности математических моделей, замена непрерывных величин дискретными, случайных — детерминированными и т. д.

Соответствие модели оригиналу называется *адекватностью* модели. Адекватность включает требования полноты и точности (правильности, истинности) модели. Поскольку модели в принципе ограничены (от них и не требуется полного подобия), то, для того чтобы считать модель адекватной, вышеперечисленные требования должны выполняться в той мере, которая *достаточна для достижения цели* [2]. В конечном итоге истинность моделей всегда определяется практикой. Если применение знаний, полученных с помощью модели, в практической деятельности приносит ожидаемые результаты, то модель можно считать адекватной.

Как и все в мире, модели проходят свой жизненный цикл: возникают, развиваются, уступают место другим моделям. Процесс моделирования можно структурировать, выделив в нем этапы. Например, при проектировании сложной системы ее модель развивается от концептуальной до модели реализации.

Итак, ***основными свойствами моделей*** являются [2]:

- конечность — модели отображают оригинал лишь в конечном числе его отношений;
- упрощенность — модели отображают только существенные стороны объекта;
- приближительность — действительность отображается моделями грубо или приближительно;
- адекватность — модели отражают моделируемую систему с достаточной полнотой и точностью;

• динамичность — модели развиваются, переходят одна в другую.

**Классификация моделей.** Классификация моделей осуществляется по разным признакам. Некоторые из классификаций моделей приведены на рис. 2.2.

По тому, что отражают модели — уже существующие объекты или объекты, которые должны быть осуществлены (или которые желательно осуществить), — их можно разделить на *познавательные* и *нормативные*. В методологиях моделирования бизнес-процессов эти классы моделей часто называют моделями «как есть» (в английском варианте — as is) и «как должно быть» (в английском варианте — to be) или моделями существующего и нового бизнеса.

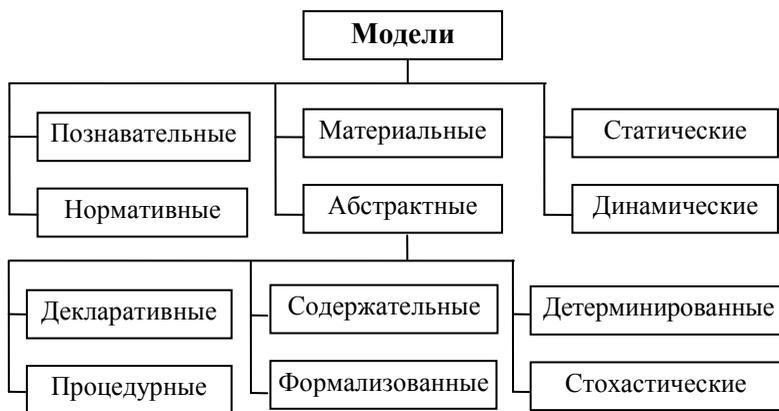


Рис. 2.2. Классификации моделей

Познавательные или объяснительные модели служат для того, чтобы упорядочить и структурировать знания об исследуемом объекте, выявить взаимосвязи между компонентами, соотношения между характеристиками, закономерности поведения и т. д.

Нормативные или прагматические модели являются средством отображения идеального объекта или будущего результата некоторой практических действий. Это образец, эталон, стандарт или программа действий, план, алгоритм. Существуют разные градации нормативных моделей по степени де-

тальности — от референтной модели, построенной для целого класса объектов, до модели конкретного объекта.

В зависимости от того, учитывается ли в модели фактор времени, модели разделяют на *статические* и *динамические*.

Статические модели не учитывают временной фактор. Они отражают постоянные, устойчивые состояния объекта, его состав, структуру, устойчивые внутренние и внешние связи. Это как бы «моментальная фотография» объекта.

Динамические модели отражают изменения объекта, происходящие с течением времени, — поведение объекта (изменение во времени его состояний), последовательность действий, операций, внутренних и внешних взаимодействий и т. д. При этом сама модель динамического процесса может быть статичной, не изменяющей своего состояния. Примеры таких моделей — календарный график работ, блок-схема алгоритма, формула изменения некоторой характеристики во времени.

Однако существует класс динамических моделей, которые сами могут находиться в динамике. Это *имитационные* модели, имитирующие реальные процессы. Примерами могут служить: действующая механическая модель солнечной системы; деловая игра, имитирующая какой-либо бизнес-процесс; военные учения; компьютерная имитационная модель процесса обслуживания клиентов, «проигрываемая» с помощью специальной программы в сжатом режиме времени.

По способу воплощения модели подразделяются на классы *материальных* (реальных, вещественных) моделей и *абстрактных* (идеальных) моделей.

Материальные модели построены из реальных объектов. К ним относятся, например, манекены, чучела животных, макеты зданий (кораблей, автомобилей, самолетов), тренажеры, имитирующие кабину машиниста поезда или салон автомобиля и т. д. Абстрактные модели представляют собой идеальные конструкции, выполненные средствами мышления, сознания [2]. Модели этого типа могут не только находиться в сознании человека — они могут иметь материальное воплощение с тем, чтобы их можно было хранить и передавать от одного человека другому. Схемы, чертежи, диаграммы, форму-

лы, таблицы, нарисованные на бумаге, напечатанные в книге, записанные в виде компьютерных файлов — все это вещественные формы абстрактных моделей. Как правило, они описываются на каком-либо языке (естественном, математическом, графическом и др.), предполагающем наличие некоторых соглашений о том, из каких элементов (знаков) формируется модель, что обозначают эти элементы, по каким правилам строятся конструкции из элементов языка, как преобразовывать, использовать построенные конструкции и т. д. Ниже будут охарактеризованы некоторые из наиболее распространенных языков.

Абстрактные модели, в свою очередь, тоже могут быть классифицированы по различным признакам. Так, в зависимости от того, представляют ли модели описания свойств объектов или их действий, различают *декларативные* и *процедурные* модели. В декларативных моделях отражаются свойства, структуры, состояния (причем хоть в статике, хоть в динамике). В процедурных моделях находит отражение процедурное, операционное знание.

Выделяют также классы *детерминированных* и *стохастических* моделей. Первые отражают процессы и явления, не подверженные случайностям, вторые — случайные процессы, описываемые вероятностными характеристиками и статистическими закономерностями.

По степени абстрактности различают целый спектр моделей — от *формализованных* до слабо формализуемых или *содержательных (семантических)*. Как правило, чем меньше семантики (смысла, содержания) отражается в модели, тем она более формализована. К сильно формализованным относятся математические модели. Они универсальны в том смысле, что одна и та же модель может описывать весьма различные физические процессы или может вообще не иметь смысловой интерпретации. В слабо формализованных, содержательных моделях сохраняется семантика моделируемого объекта. В этом смысле эти модели уникальны.

Примеры содержательных моделей: дерево целей, модель организационной структуры компании, блок-схема алгоритма.

Основное преимущество формализованных моделей — наличие формального аппарата оперирования моделью (поиска решений на модели). Однако многие объекты, процессы, явления с трудом поддаются формализованному описанию. Семантическую же модель в виде описания на естественном языке можно создать практически для любого объекта.

**Языки описания моделей.** Абстрактные модели описываются на том или ином языке, т. е. в виде некоторой знаковой системы. Каждый из языков имеет свой набор символов — условных обозначений, свои правила формирования модели и ее интерпретации. Одна и та же модель может быть представлена на разных языках. В табл. 2.1 приводятся описания одной и той же модели дерева целей на различных языках. Дадим краткую характеристику наиболее распространенных языков (классов языков).

**Естественный язык.** Описания моделируемых объектов, явлений, процессов на естественном языке (языке общения между людьми) также можно рассматривать как модели. Примером может служить описание дерева целей, приведенное в табл. 2.1. Из всех языков естественный язык обладает наиболее богатыми описательными возможностями. Однако он расплывчат, многозначен и не формализован. Поэтому чаще всего его используют для первоначального описания моделируемого объекта, служащего отправной точкой для построения более формализованной модели на другом, более абстрактном языке.

**Графический язык.** Модель на графическом языке представляется в виде некоторого графического образа — в виде графа, схемы, диаграммы, графика, гистограммы, чертежа. Примером является граф дерева целей (см. табл. 2.1). Основным достоинством подобных моделей является наглядность. Графические образы зачастую лучше воспринимаются и запоминаются, чем, скажем, формулы и тексты.

Методы формирования и преобразования графических моделей определенного вида разрабатываются в таких научных дисциплинах, как теория графов, теория сетевого планирования и управления, теория сетей Петри, теория семантических сетей и др.

Таблица 2.1

Представление модели дерева целей на различных языках

Язык	Модель дерева целей
Естественный	«Глобальная цель с кодом $c_1$ содержит две подцели второго уровня – $c_2$ и $c_3$ . В свою очередь, подцель $c_2$ содержит подцели $c_4$ и $c_5$ , а подцель $c_3$ – подцели $c_6$ и $c_7$ »
Графический	<pre> graph TD     c1[c1] --&gt; c2[c2]     c1 --&gt; c3[c3]     c2 --&gt; c4[c4]     c2 --&gt; c5[c5]     c3 --&gt; c6[c6]     c3 --&gt; c7[c7]             </pre>
Теории множеств	<p>Множество целей <math>C = \{c_i\}, i = \overline{1,7}</math></p> <p>Отношение доминирования <math>R_{\succ} \subset C \times C</math> :</p> <p><math>c_1 R_{\succ} c_2, c_1 R_{\succ} c_3, c_2 R_{\succ} c_4, c_2 R_{\succ} c_5, c_3 R_{\succ} c_6, c_3 R_{\succ} c_7</math></p>
Математический	$C = \begin{bmatrix} 1110000 \\ 0101100 \\ 0010011 \\ 0001000 \\ 0000100 \\ 0000010 \\ 0000001 \end{bmatrix}, c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я цель содержит } j\text{-ю} \\ 0, & \text{если } i\text{-я цель не содержит } j\text{-ю} \end{cases}$
Логический	<p><math>P(c_1, c_2) \&amp; P(c_1, c_3) \&amp; P(c_2, c_4) \&amp; P(c_2, c_5)</math></p> <p><math>\&amp; P(c_3, c_6) \&amp; P(c_3, c_7) \equiv \text{И},</math></p> <p>где <math>P(c_i, c_j)</math> — предикат, означающий, что цель <math>c_i</math> содержит подцель <math>c_j</math></p>
Произвольный семиотический	<p><math>c_1 (c_2 (c_4, c_5), c_3 (c_6, c_7)),</math> где <math>c_{i1} (c_{i2}, \dots, c_{in})</math> — означает, что цель <math>c_{i1}</math> содержит подцели <math>c_{i2}, \dots, c_{in}</math>.</p>

В последнее время активно развиваются методы визуального моделирования для проектирования информационных систем с помощью так называемых CASE-средств. Аббревиатура CASE расшифровывается как Computer-Aided Software

Engineering — компьютерная поддержка проектирования программного обеспечения. Это специальные компьютерные программы, с помощью которых можно строить графическую модель проектируемой информационной системы не на бумаге, а на экране компьютера в интерактивном режиме.

Разработано множество различных методологий, подерживаемых CASE-средствами. Некоторые из них широко используются не только для разработки программного обеспечения, но и для моделирования систем самого широкого назначения, прежде всего, бизнес-систем. Одна из таких методологий — методология функциональной декомпозиции IDEF0 будет рассмотрена в п. 3.2.2.

**Язык теории множеств.** Теоретико-множественное представление получило широкое распространение благодаря, с одной стороны, его формальности, и, с другой стороны, его общности (он применим, практически без ограничений, ко всем возможным объектам, даже к плохо структурированным, неопределенным системам). Язык теории множеств используется как обобщающий язык при сопоставлении различных направлений математики и других дисциплин, является основой для самых разных научных направлений, в том числе и для общей теории систем [1].

Основными понятиями теории множеств являются: *множество, элементы* множества, *отношения* на множествах. В табл. 2.1 приведено теоретико-множественное представление дерева целей, включающее множество целей и бинарное отношение доминирования на множестве целей. Отношение задано как подмножество декартова произведения множества целей самого на себя, т. е. как подмножество всех пар целей.

**Математический (аналитический) язык.** Математические модели описывают соотношения между количественными параметрами моделируемого объекта или логические условия в виде аналитических формул (алгебраических, интегродифференциальных, конечноразностных и т. д.). Это могут быть уравнения, связывающие переменные состояния, входов и выходов системы или соотношения для вычисления критериев оценки системы и др. В табл. 2.1 математическая модель дерева целей представлена в виде матрицы, элементы

которой представляют собой булевы переменные (принимающие одно из двух значений — 0 или 1).

В системном анализе получили наибольшее распространение математические модели оптимизации, математического программирования, исследования операций, теории игр. Построение подобных моделей предполагает выделение переменных (искомых величин), формирование целевой функции, связывающей критерий с переменными, и описание условий в виде ограничений, накладываемых на переменные. Целью поиска решения на модели является нахождение таких значений переменных, при которых достигается наилучшее значение целевой функции и удовлетворяются ограничения.

**Логический язык.** Язык математической логики (логики высказываний, логики предикатов) используется для моделирования логических закономерностей и логических выводов (дедуктивных, индуктивных).

Базовыми понятиями математической логики являются высказывание, предикат, логические операции (конъюнкция, дизъюнкция, отрицание, импликация, эквивалентность).

В табл. 2.1 для описания модели дерева целей на языке логики предикатов был введен предикат  $P(c_i, c_j)$ , интерпретируемый как истина (И), если цель  $c_i$  содержит подцель  $c_j$ , и как ложь (Л) в противном случае. Дерево целей представлено в виде конъюнкции предикатов этого вида. Если ввести правило вывода, отражающее транзитивность отношения «цель-подцель»:  $P(c_i, c_j), P(c_j, c_k) \mapsto P(c_i, c_k)$ , то на его основе можно вывести новые факты, например:

$$P(c_1, c_4) \& P(c_1, c_5) \& P(c_1, c_6) \& P(c_1, c_7) \cong \text{И}.$$

**Семиотический язык, язык математической лингвистики.** Семиотика — наука о знаках, знаковых системах — изучает правила построения языков. Под знаком понимаются элементы, обладающие тремя свойствами: синтаксисом, семантикой и прагматикой. Чтобы создать некоторый произвольный семиотический язык, нужно прежде всего определить алфавит языка — конечное множество символов, из которых формируются все конструкции языка. Для порождения грамматически (синтаксически) правильных предложений — це-

почек символов алфавита — вводятся синтаксические правила (операции). Кроме того, необходимо определить семантику и прагматику отдельных знаков и конструкций. Под семантикой при этом понимают содержание, смысл формируемых или распознаваемых конструкций языка, а под прагматикой — полезность для конкретной цели, задачи.

В табл. 2.1 представлен произвольный семиотический язык для описания модели дерева целей. Алфавит языка состоит из символов  $c_i$  (индекс  $i$  является натуральным числом), имеющих смысл «цель (подцель) с порядковым номером  $i$ » и символов ‘(’, ‘)’, ‘;’. Для построения смысловыражающих, т. е. синтаксически и семантически правильных конструкций, определено правило: если цель содержит подцели, то следом за символом цели в скобках через запятую записываются символы подцелей. Поскольку любая из подцелей может также содержать подцели, то описание дерева целей может представлять конструкцию с многоуровневой вложенностью скобок.

**Языки инженерии знаний.** Это языки искусственного интеллекта, разрабатываемые в теории экспертных систем. Они позволяют представлять слабо формализуемые эвристические знания экспертов, основанные на опыте, интуиции, в формальном виде, доступном для обработки с помощью специальных компьютерных программ — экспертных систем.

Основными языками инженерии знаний являются семантические сети, фреймы, системы правил-продукций, язык нечетких множеств и нечеткого вывода, нейронные сети, объектно-ориентированные представления, языки ситуационного управления и др. [36]. В системном анализе эти языки могут использоваться для структурирования знаний о системах, для описания причинно-следственных зависимостей между параметрами системы, для нечеткой оценки систем.

Рассмотрим для примера фреймовое описание цели. Фрейм — это информационная структура, «каркас» описания некоторого объекта, задаваемый набором слотов (атрибутов, характеристик), достаточно полно характеризующих данный объект.

На рис. 2.3 представлены два связанных фрейма, описывающих две цели, одна из которых является подцелью другой.



Рис. 2.3. Фреймовое описание целей

## 2.2. Базовые модели систем

Три ключевые характеристики любой системы — целостность, делимость и коммуникативность — определяют три базовых типа моделей систем: **модель «черного ящика»**, описывающую систему как нечто целое, характеризуемое общими свойствами и поведением; **модель состава**, отражающую состав подсистем и элементов системы или среды; **модель структуры**, отражающую внутренние связи между компонентами системы или взаимосвязи системы с подсистемами внешней среды.

Отметим, что каждая из перечисленных трех моделей систем может также относиться к тому или иному классу по любой из классификаций, приведенных в предыдущем параграфе. Так, любая из базовых моделей может быть познавательной или нормативной в зависимости от того, описывает ли она существующую систему или проектируемую, пока не созданную. Могут быть построены как статические, так и динамические базовые модели систем. Например, статическая модель «черного ящика» может представлять собой описание входных и выходных переменных системы, а динамическая — описание функций изменения этих переменных во времени.

Способы воплощения базовых моделей систем также могут быть разными. Хотя чаще формируются абстрактные модели, описываемые на том или ином языке, можно представить и материальную модель. Например, модель состава

конкретной системы может быть реализована в виде некоего макета, состоящего из отдельных частей, моделирующих подсистемы и элементы.

**Модель «черного ящика»** рассматривает систему как единое целое, о структуре которого в модели нет информации, т. е. система представляется как черный «непрозрачный» ящик. Можно выделить, по крайней мере, два аспекта исследования системы, для которых используется данная модель: исследование внешних взаимосвязей системы с окружающей средой; исследование свойств системы как целого.

В первом случае в модели фиксируются входные и выходные связи системы с окружающей средой. Это может быть просто перечисление входов и выходов (формально — определение множества  $X$  входных объектов и множества  $Y$  выходных результатов). Дополнительно входы и выходы могут быть описаны с помощью переменных (характеристик, параметров). Могут быть даже заданы закономерности изменений входных и выходных переменных во времени:  $x(t)$ ,  $y(t)$ , где  $t$  — моменты времени.

Модель «черного ящика» не предполагает описание соотношений между входными и выходными переменными. В случае если такие соотношения фиксируются, говорят о модели «серого» или «белого» ящика (в зависимости от степени определенности и полноты отображения входов на выходы).

На рис. 2.4 приведен пример модели «черного ящика» социально-экономической системы (предприятия). На вход системы поступают заказы на изготовление продукции, а также энергия и материалы (сырье, комплектующие и т. д.). Выходом является изготовленная продукция.

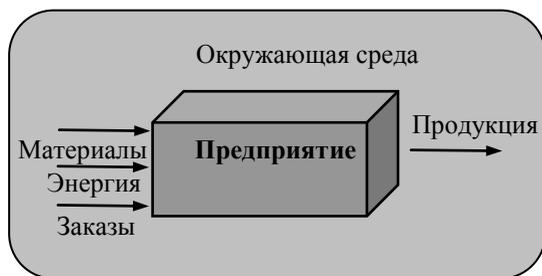


Рис. 2.4. Модель черного ящика предприятия

В каждом конкретном случае могут быть составлены подробные классификаторы входов, выходов и их параметров. Например, каждый вид продукции может быть охарактеризован такими параметрами, как вид, количество (объем), качество, себестоимость, цена и т. д.

Другой подход к построению модели «черного ящика» заключается в фиксации целостных свойств системы в виде качественных и количественных параметров. Параметры могут отражать фиксированные свойства, не подверженные изменению, либо изменяющиеся, зависящие от состояния системы. В последнем случае для характеристики различных состояний системы удобно использовать переменные. Тогда каждое конкретное состояние системы задается определенной комбинацией значений переменных.

В табл. 2.2 представлен пример описания состояний некоторой производственной системы (состояние характеризуется усредненными значениями переменных за определенный период времени).

Таблица 2.2

Параметр	I квартал	II квартал	III квартал
Объем производства	240	300	270
Численность персонала	3	3	3
Производительность	80	100	90
Затраты, тыс. руб.	65	60	60
Затраты на ед. продукции	0,27	0,2	0,22
Эффективность	средняя	высокая	средняя

Некоторые из параметров могут быть непосредственно измерены наблюдателем или каким-либо образом оценены (например, на основе субъективных суждений экспертов). При этом результаты измерений или оценивания фиксируются на некоторой шкале.

Значения одних параметров могут определяться на основе значений других, если известны зависимости между параметрами, например, в виде формул расчета. В этом случае можно говорить о модели как о «сером» или «белом» ящике (в литературе встречаются также термины «полупрозрачный», «прозрачный» ящик).

Среди параметров (переменных состояния) выделяются: управляемые — переменные, значения которых определяются управляющими воздействиями на систему; возмущения — переменные, значения которых определяются случайными воздействиями; целевые — переменные, используемые для оценивания качества системы (критерии достижения цели).

Модель «черного ящика» в виде совокупности предыдущих состояний системы может быть использована для нахождения причинно-следственных связей между параметрами (например, между управляемыми и целевыми), а также для определения закономерностей изменения параметров во времени. При этом могут быть использованы методы статистической обработки.

Кроме того, модель «черного ящика» может также использоваться для сравнительной оценки системы по отношению к другим системам данного типа или для выбора оптимального варианта реализации системы. В первом случае в модели фиксируются значения параметров исследуемой системы и параметров аналогичных систем. Во втором случае — возможные варианты системы в виде соответствующих комбинаций значений параметров. Методы сравнения, оценивания и выбора будут подробно рассмотрены в подразд. 2.3.

Необходимо отметить, что некоторые авторы не делают различия между представлением модели «черного ящика» в виде описания входов и выходов и представлением в виде описания свойств системы, понимая под входами управляемые переменные и возмущения, а под выходами — целевые переменные. Однако при таком подходе может возникнуть терминологическая путаница, так как целевыми могут быть переменные, характеризующие параметры входных объектов, а управляемыми — параметры выходов. Например, целью производственной системы может быть снижение объема используемых ресурсов (параметр входа), а управляемым параметром — объем производимой продукции (параметр выхода).

**Модель состава.** В модели данного типа фиксируется состав компонентов системы — подсистем и элементов.

В силу свойства иерархичности, присущего любой системе (см. подразд. 1.2), модель состава неизбежно принимает

иерархический вид. При этом можно выделить два основных способа построения такой иерархии: декомпозицию (последовательное расчленение системы на все более мелкие части); композицию (последовательное объединение частей системы во все более крупные подсистемы).

Использование декомпозиции/композиции при моделировании систем тесно связано с иерархичностью мышления человека, с такими основополагающими способами познания, как анализ и синтез. *Анализ*, т. е. разделение целого на части и представление сложного в виде более простых компонентов, позволяет решить противоречие между бесконечностью природы и конечностью ресурсов, используемых в познавательных процессах.

Однако исследование отдельных компонентов системы, взятых вне связи друг с другом, не позволяет исследовать эмерджентные свойства системы, судить о системе как о целом. Поэтому необходим и обратный процесс — *синтез*. Сочетание синтетического и аналитического мышления — один из основных принципов системного подхода.

Построение модели состава позволяет рассматривать систему на разных уровнях абстрагирования. На верхнем уровне система представляется как целое. Чем ниже мы спускаемся по иерархии, тем более детальным становится рассмотрение системы. При решении задачи проектирования или управлении сложной системой иерархическое представление позволяет снизить размерность задачи путем сведения ее к множеству более простых, иерархически связанных задач.

Главная трудность в построении модели состава заключается в неоднозначности разделения целого на части. На этот процесс оказывают влияние цель моделирования, точка зрения исследователя, его компетентность, полнота информации о системе и др. Например, модель состава промышленного предприятия, построенная для главного механика, будет отличаться от модели того же предприятия, предназначенной для главного экономиста.

Для облегчения процесса формирования модели состава используются стандартные основания декомпозиции. Их применение снижает неоднозначность, однако не устраняет ее

полностью, так как остается вопрос выбора того или иного основания при каждом акте декомпозиции. Принципы декомпозиции, а также некоторые из стандартных оснований декомпозиции будут рассмотрены в подразд. 2.4.

**Модель структуры.** Модель структуры строится на основе модели состава системы и предполагает установление *отношений* между компонентами (подсистемами, элементами) системы. Как правило, модель структуры строится для одного уровня модели состава, т. е. для каждого уровня формируется своя структурная модель (рис. 2.5).

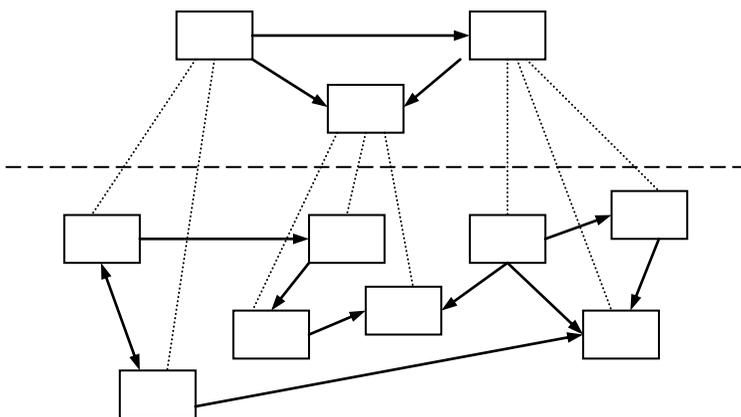


Рис. 2.5. Модель структуры для различных уровней модели состава

Следует отметить, что в модели состава также присутствуют отношения, но только отношения типа «целое-часть» между материнской системой (подсистемой) и ее дочерними подсистемами или элементами. Поэтому можно рассматривать модель состава как частный случай модели структуры.

В модели структуры могут отражаться самые разнообразные отношения: материальные потоки (вещественные, энергетические и информационные); пространственные отношения (например: дальше, ближе, выше, ниже); временные отношения (например: раньше, позже, одновременно); причинно-следственные связи; отношения власти/подчинения; отношения роли (например, быть инструментом, исполнителем, результа-

том) и др. Полной классификации всех видов отношений не существует. Однако интересен тот факт, что в естественном языке (в частности в русском, английском, итальянском) количество языковых конструкций, выражающих отношения, не так много — около 200 [2].

Отношения могут быть направленными и ненаправленными. В зависимости от количества объектов, связанных отношением, различают одноместные (унарные), двухместные (бинарные), трехместные (тернарные) и  $n$ -местные ( $n$ -арные) отношения. Унарные отношения отражают свойства объекта.

Модели структуры удобно изображать в виде графов. При этом объекты (подсистемы, элементы) представляются в виде вершин (узлов графа), а отношения между ними — в виде дуг (ребер). Если направления отношений не обозначаются, то граф называется неориентированным, если обозначаются — ориентированным или орграфом.

Графы могут отражать любые структуры. Примеры графов некоторых типовых структур приведены на рис. 2.6.

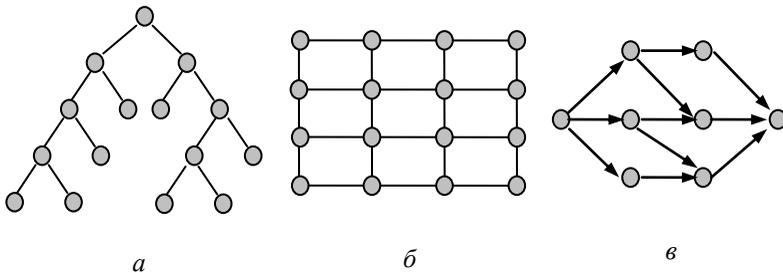


Рис. 2.6. Графы, соответствующие различным структурам:  
*a* – древовидная структура; *б* – матричная структура;  
*в* – сетевой график

Наибольшее распространение в теории систем и системном анализе получили *иерархические (древовидные) структуры* (рис. 2.6, *a*). Это не только модели на основе отношения «целое-часть», отражающие состав системы. К древовидным относятся структуры классификаций, отражающие отношения типа «общее-частное» между понятиями (классами понятий). Отличие данного вида отношений от отношений «целое-часть»

можно пояснить на следующем примере. При декомпозиции системы «автомобиль» мы выделяем его составные части — кузов, двигатель, колеса и т. д. Декомпозируя же понятие «автомобиль» мы можем выделить более конкретные понятия — «легковой автомобиль», «грузовик». Каждое из этих понятий может быть разделено на еще более узкие классы.

Еще один распространенный вид иерархических структур — деревья целей, построенные на основе отношений «цель-средство». Элементами структуры в данном случае являются цели (задачи, проблемы). Любая цель может иметь несколько подчиненных подцелей, которые могут рассматриваться, как средства достижения вышестоящей цели. Например, обобщенная цель «повысить эффективность» может быть декомпозирована на две подцели, уточняющие способы ее достижения — «снизить расходы» и «увеличить доходы».

В свою очередь, для достижения этих подцелей могут быть выдвинуты еще более конкретные подцели. Так, цель «снизить расходы» конкретизируется через подцели «повысить производительность», «снизить энергоемкость», а цель «увеличить доходы» — через подцели «увеличить объем реализации продукции», «увеличить отпускную цену» и т. д.

Иерархическую структуру имеют, как правило, и организационные системы управления. Их элементы — лица, принимающие решения, — связаны отношениями власти/подчиненности. Элементы принимают решения для достижения своих целей, однако их свобода выбора ограничена вышестоящими элементами, которые координируют, согласовывают решения подчиненных элементов. Это позволяет находить компромисс между локальными целями отдельных элементов многоцелевой системы принятия решений и общей глобальной целью всей системы. Впрочем, организационные структуры могут иметь не только вид строгой иерархии. Существуют и так называемые многолинейные структуры, в частности матричные.

Более подробно некоторые из упомянутых многоуровневых иерархических структур, в частности структуры на основе отношений «целое-часть», «цель-средство» и власти/подчиненности, называемые соответственно «страты», «слои» и «эшелоны», будут рассмотрены в подразд. 2.5.

**Матричные схемы** (рис. 2.6, б) чаще всего используются для отражения структуры систем, элементы которых связаны двумя типами связей. Связи одного типа представляются в виде вертикальных линий, связи другого типа — в виде горизонтальных линий. Например, в матричных оргструктурах используются два канала управления: как правило, один канал соответствует функциональному признаку структуризации, второй — проектному, т. е. помимо функциональных подразделений создаются временные команды для выполнения сложной многофункциональной задачи (проекта). В виде матриц могут быть представлены связи между данными в реляционных базах данных. Причем могут использоваться и многомерные матрицы. Так, в технологии организации баз данных OLAP используются так называемые OLAP-кубы, отражающие многомерное представление данных. Аналогичные представления используются в различных многомерных классификациях.

**Сетевые структуры** чаще всего используются для моделирования процессов. Так, графы, отображающие в виде ребер отдельные работы (действия, операции) процесса, а в виде вершин — события (результаты работ), представляются в виде направленной сети с одним истоком (начальное состояние) и одним стоком (конечное состояние) (рис. 2.6, в). Подобные сетевые графики используются при календарном планировании.

Распространены и сетевые структуры, отображающие в виде вершин работы, а в виде ребер — потоки (материальные, энергетические, информационные) между работами либо логические взаимовлияния, отражающие технологическую последовательность работ<sup>4</sup>. Соответствующие сетевые графы могут иметь самую разнообразную топологию.

В виде сетей различной конфигурации представляют структуры коммуникаций. Некоторые из таких сетей получили собственное название. Для примера на рис. 2.7 приведены типовые внутригрупповые коммуникационные сети. Аналогичные типовые структуры используют при построении вычислительных сетей.

---

<sup>4</sup> Подобные представления используются в CASE-методологиях моделирования бизнеса, таких как Work Flow Diagrams, Data Flow Diagrams и др.

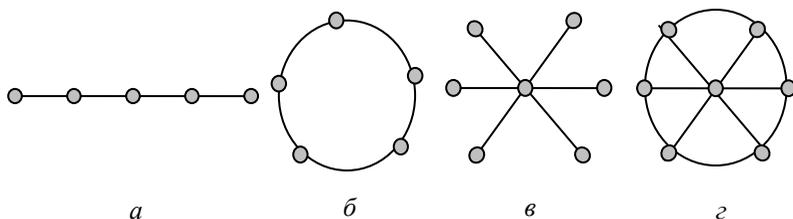


Рис. 2.7. Типы коммуникационных сетей: *a* — цепь; *б* — круг; *в* — звезда; *z* — паутина

**Комбинирование базовых моделей систем.** Базовые модели — модель «черного ящика», модель состава и модель структуры — лежат в основе большинства прикладных методологий системного анализа (некоторые из них будут рассмотрены в следующем разделе). При этом, как правило, модели используются в различных сочетаниях.

Так, анализ некоторой системы может начинаться с выделения объектов окружающей среды, т. е. с построения модели состава «надсистемы» (системы более высокого порядка, включающей исследуемую систему). Затем устанавливаются связи между анализируемой системой и подсистемами окружающей среды, т. е. формируется модель структуры «надсистемы» и одновременно модель «черного ящика» исследуемой системы. Модель черного ящика в виде описания входов и выходов может быть дополнена описанием свойств системы. Затем могут быть построены модели состава и структуры системы. При этом на каждом уровне декомпозиции для отдельных подсистем формируются модели «черного ящика».

## 2.3. Измерение/оценивание систем

### 2.3.1. Типы шкал

Измерением называется процедура, с помощью которой значения измеряемого свойства отображаются на определенную знаковую (например, числовую) систему с соответствующими отношениями между знаками (числами). Знаковые системы называются **шкалами**. Они могут быть как количественными, так и качественными.

Измерение предполагает наличие объекта измерения. Измеряются не объекты сами по себе, а их свойства. Например, если объект измерения суть люди, то их свойства — возраст, стаж работы, образование и др.; если коллектив, то свойства — сплоченность, информированность, численность и др. Другим элементом в определении измерения являются отношения между объектами измерения относительно изучаемого свойства. Например, людей можно сравнивать по возрасту в соответствии с отношением «старше», коллективы — по информированности согласно отношению «больше информирован, чем...».

При измерении исследуемым свойствам сопоставляются определенные значения на выбранной шкале. Например, при измерении возраста измеряемым объектам (людям) могут присваиваться числовые значения, соответствующие количеству прожитых лет. Для измерения информированности коллективов могут быть использованы числовые оценки в баллах от 1 до 5 или лингвистические значения: «плохо», «средне», «хорошо». Важно, чтобы на множестве шкальных значений можно было установить отношение, соответствующее измеряемому отношению между реальными объектами. Так, измерив возраст людей с помощью числовой шкалы, можно установить, кто из них старше и на сколько. Измерение коллективов по информированности на основе балльных оценок позволяет расположить их в порядке возрастания информированности.

Формально шкалу можно задать в виде [37]

$$\langle X, \varphi, Y \rangle,$$

где  $X = \{x_1, \dots, x_n, R_x\}$  — реальная эмпирическая система, включающая множество свойств  $x_i$ , на которых в соответствии с целями измерения задано некоторое отношение  $R_x$ ;

$Y = \{\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n), R_y\}$  — знаковая система, включающая значения измеряемых свойств  $\varphi(x_i)$  с соответствующим отношением  $R_y$ ;

$\varphi \in \Phi$  — гомоморфное отображение  $X$  на  $Y$ , устанавливающее соответствие между  $X$  и  $Y$  так, что  $\{\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n)\} \in R_y$  только тогда, когда  $\{x_1, \dots, x_n\} \in R_x$ .

Имеется несколько основных типов шкал: наименований (номинальные), порядка, интервальные, отношений, абсолютные. Тип шкалы определяется по множеству допустимых преобразований со шкальными значениями, исходя из целей измерения. Если требуется просто классифицировать людей по возрасту («молодой», «среднего возраста», «пожилой»), то используется шкала наименований, если необходимо расположить людей в порядке возрастания возраста, можно использовать шкалу порядка (каждому присваивается место), если же нужно установить, насколько и во сколько раз один человек старше другого, можно воспользоваться шкалой отношений.

**Шкала наименований (номинальная).** Это наиболее слабая, качественная шкала, соответствующая простейшему виду измерений, при котором каждому объекту сопоставляется наименование. Это необязательно уникальное имя конкретного объекта, оно может являться именем целого класса объектов.

Примерами измерений по номинальной шкале являются названия городов, имена людей, автомобильные номера, номера официальных документов, телефонные коды городов, номера авиарейсов, названия болезней и т. п. Эти измерения позволяют выявить сходства и различия между объектами. Таким образом, основным свойством номинальных шкал является сохранение неизменным отношений эквивалентности (по измеряемому признаку) элементов эмпирической системы.

Шкальными значениями служат наименования классов эквивалентности. В качестве наименований используются слова естественного языка, числа, произвольные символы. Измерение в номинальной шкале состоит в определении принадлежности объекта тому или иному классу эквивалентности.

На рис. 2.8 приведено измерение возраста людей, обозначенных через  $x_i$ , в номинальной шкале, включающей наименования «молодой», «среднего возраста», «пожилой».

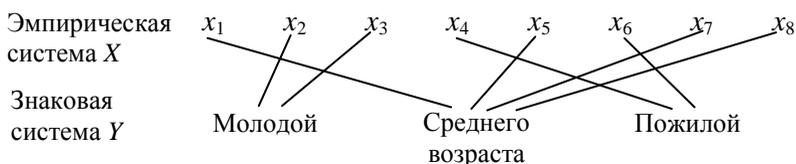


Рис. 2.8. Измерение объектов в номинальной шкале

Каждому элементу эмпирической системы (объекту  $x_i$ ) ставится в соответствие определенный элемент знаковой системы  $\varphi(x_i)$ .

Если в качестве шкальных значений используются символы 1, 2, 3, ...  $n$ , их все равно следует воспринимать не как числа, а как наименования. Над ними нельзя выполнять какие-либо математические операции. Например, если одному спортсмену присвоен номер 2, а другому — 4 (соответствующие номера указаны на их майках), то это не значит, что один из них лучше другого в два раза.

При обработке данных, зафиксированных по шкале наименований, можно выполнять только операцию проверки их совпадения или несовпадения. Для этого используется символ Кронекера:  $\delta_{ij} = \{1 : \varphi(x_i) = \varphi(x_j); 0 : \varphi(x_i) \neq \varphi(x_j)\}$ .

С результатами этой операции можно выполнять более сложные преобразования: считать количество совпадений, вычислять относительные частоты классов, сравнивать эти частоты между собой (находя, например, моду — номер наиболее часто встречающегося класса), выполнять различные статистические процедуры и т. д. [2]. Например, для системы, приведенной на рис. 2.8, можно вычислить частоты классов

по формуле:  $p_k = (\sum_{j=1}^n \delta_{kj}) / n$  ( $n$  — общее число наблюдений). Для классов «молодой» и «пожилой» частота будет составлять 2/8, для класса «среднего возраста» — 4/8.

**Шкала порядка (ранговая).** Эта шкала, следующая по силе за номинальной, используется для упорядочения объектов по измеряемым свойствам. Она позволяет расположить объекты в определенной последовательности, например, в соответствии с возрастанием или убыванием какого-либо качества.

Примерами применения ранговой шкалы являются призовые места в конкурсах или соревнованиях, нумерация очередности, номера классов средней школы или курсов высших учебных заведений (1-й, 2-й и т. д.), сила землетрясения по шкале Рихтера, сортность товаров и т. п.

Шкалы порядка кроме отношений эквивалентности сохраняют отношения предпочтения (обозначаемые через  $\succ$ )

на множестве элементов эмпирической системы, удовлетворяющие аксиомам упорядоченности:

если  $x_1 \neq x_2$ , то либо  $x_1 \succ x_2$ , либо  $x_2 \succ x_1$ ;

если  $x_1 \succ x_2$  и  $x_2 \succ x_3$ , то  $x_1 \succ x_3$ .

Между шкальными значениями, сопоставленными элементам эмпирической системы, должны выполняться те же отношения порядка, т. е. если  $x_1 \succ x_2$ , то  $\varphi(x_1) \succ \varphi(x_2)$ . Чаще всего в качестве шкальных значений используются числа натурального ряда, означающие номер объекта в упорядоченном ряду. Этот номер называется рангом.

На рис. 2.9 изображено измерение в ранговой шкале элементов  $x_i$  ( $i = \overline{1,8}$ ) эмпирической системы, упорядочение которых имеет следующий вид:

$$x_3 \succ x_5 \succ x_6 \succ x_1 \succ x_2 \succ x_8 \succ x_4 \succ x_7.$$

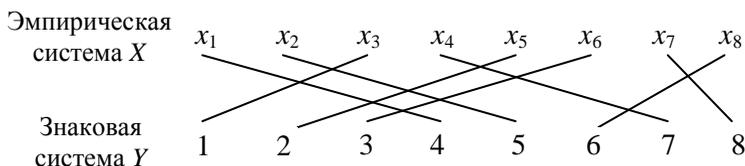


Рис. 2.9. Измерение объектов в ранговой шкале

Иногда оказывается, что не каждую пару объектов можно упорядочить по предпочтению: некоторые объекты считаются равными. В таком случае используют шкалу квазипорядка. При этом равные объекты могут иметь одинаковый ранг или им присваиваются ранги от младшего до старшего случайным образом.

Важно отметить, что ранги нельзя рассматривать как числа. Нельзя утверждать, что спортсмен, занявший в соревнованиях по бегу четвертое место, пробежал дистанцию в четыре раза быстрее, чем спортсмен, занявший первое место. Судя по рангам, ничего нельзя сказать о расстояниях между сравниваемыми объектами. Поэтому над шкальными значениями в ранговой шкале нельзя производить арифметические операции

и вообще любые действия, результат которых изменится при преобразованиях шкалы, не нарушающих порядка.

К допустимым операциям, кроме нахождения частот и мод (как и для номинальной шкалы), относятся: определение медианы (объекта с рангом, ближайшим к числу  $n/2$ ); разбиение всей выборки на части в любой пропорции; нахождение коэффициентов ранговой корреляции между двумя сериями порядковых наблюдений и некоторые другие [2].

**Шкала интервалов.** Данный вид шкал используется в случаях, когда упорядочение объектов можно выполнить настолько точно, что известны расстояния между любыми двумя из них. Все расстояния выражаются в некоторых единицах, одинаковых по всей длине шкалы. Объективно равные интервалы измеряются одинаковыми по длине отрезками шкалы. Таким образом, в шкале интервалов можно ввести систему координат: одна из точек играет роль начала координат, а расстояние между ней и некоторой другой точкой — роль единичного интервала. В шкале интервалов измеряются величины, которые по физической природе не имеют абсолютного нуля либо допускают свободу выбора в установлении начала отсчета. Примерами таких величин являются температура, время, высота местности.

Можно ввести несколько интервальных шкал для измерения одного и того же свойства элементов эмпирической системы. Например, для измерения температуры используются разные шкалы (шкала Цельсия, шкала Фаренгейта), системы летоисчисления также могут отличаться (у христиан оно ведется от рождества Христова, у мусульман — от переезда Мухаммеда в Медину). Но независимо от того, какое значение принято за начало отсчета и какова единица длины в каждой из шкал, отношения двух интервалов должны быть одинаковыми для всех шкал, т. е.

$$\frac{\varphi(x_1) - \varphi(x_2)}{\varphi(x_3) - \varphi(x_4)} = \frac{\varphi'(x_1) - \varphi'(x_2)}{\varphi'(x_3) - \varphi'(x_4)}.$$

Это значит, что если расстояние между  $x_1$  и  $x_2$  ( $\rho(x_1, x_2)$ ) в  $K$  раз больше расстояния между  $x_3$  и  $x_4$ , ( $\rho(x_3, x_4)$ ), то в любой эквивалентной шкале это соотношение сохранится. При-

мер измерений на двух эквивалентных интервальных шкалах приведен на рис. 2.10.

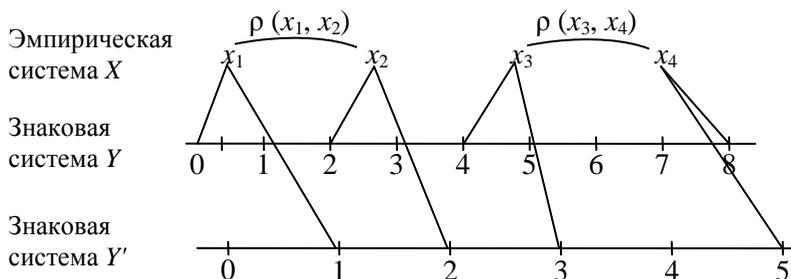


Рис. 2.10. Измерение объектов в интервальных шкалах

Таким образом, шкала интервалов единственна с точностью до линейных преобразований вида  $\phi'(x) = a\phi(x) + b$ .

Например, для перехода от шкалы Цельсия к шкале Фаренгейта используется преобразование:  $t^{\circ}\text{F} = 1,8 t^{\circ}\text{C} + 32$ .

В шкале интервалов только интервалы имеют смысл настоящих чисел, и только над интервалами следует выполнять арифметические операции. Например, нельзя сказать, что температура воды увеличилась в два раза при ее нагреве от  $9^{\circ}\text{C}$  до  $18^{\circ}\text{C}$ , так как по шкале Фаренгейта температура изменится от 48,2 до 64,4 [2]. Над интервалами же можно выполнять любые арифметические операции.

**Шкала отношений.** Это еще более сильная шкала. Она позволяет оценить, во сколько раз свойство одного объекта превосходит то же свойство другого объекта. Величины, измеряемые в шкале отношений, имеют естественный абсолютный нуль, хотя остается свобода в выборе единиц.

Примерами таких величин являются вес и длина объектов. Вес можно измерять в килограммах, в фунтах, в пудах. Длину можно измерять в метрах, в аршинах, в ярдах. Но при этом если в одной системе единиц вес (или длина) объекта  $x_1$  в  $K$  раз больше, чем вес (длина) объекта  $x_2$ , то и в другой эквивалентной системе измерений то же отношение весов (длин) сохраняется.

Таким образом, основным свойством шкал отношений является сохранение отношения двух шкальных значений при переходе от одной шкалы к другой:

$$\frac{\varphi(x_1)}{\varphi(x_2)} = \frac{\varphi'(x_1)}{\varphi'(x_2)}.$$

Отсюда следует, что шкала отношений единственна с точностью до линейных преобразований вида

$$\varphi'(x) = a\varphi(x).$$

Эта формула выводится из формулы связи между разными системами координат, введенной для интервальных шкал, при условии, что точка отсчета фиксирована и сдвиг равен нулю ( $b = 0$ ). Нефиксированным остается масштаб измерений ( $a \neq 0$ ), т. е. переход от одной шкалы к другой осуществляется с помощью преобразований подобия (растяжения). На рис. 2.11 приведен пример измерений на двух эквивалентных шкалах отношений.

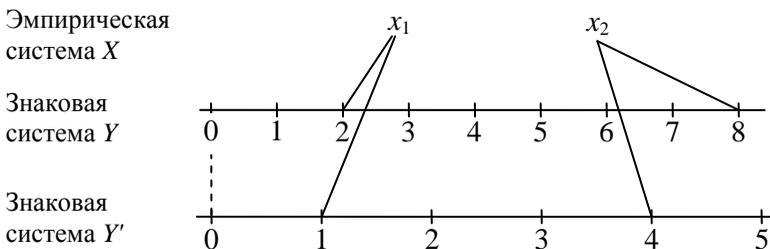


Рис. 2.11. Измерение объектов в шкалах отношений

Значения, измеренные в шкале отношений, являются «полноправными» числами, с ними можно выполнять любые арифметические действия.

**Абсолютная шкала.** Эта шкала имеет не только абсолютный нуль, как шкала отношений, но и абсолютную единицу. Это уникальная шкала, т. е. других, эквивалентных ей шкал не существует (существует только одно отображение эмпирических объектов в знаковую систему). Примером абсолютной шкалы является числовая ось. Важной особенностью такой шкалы является отвличенность (безразмерность)

и абсолютность ее единицы. Над показаниями абсолютной шкалы можно не только производить все арифметические операции, но и использовать эти показания в качестве показателей степени и аргумента логарифма.

**Выбор типа шкалы**, используемой для измерения объектов, в первую очередь зависит от определяющего отношения. Так, шкала наименований используется в случае, если определяющим является отношение эквивалентности, удовлетворяющее *аксиомам тождества*:

- 1)  $A = A$  (рефлексивность);
- 2) если  $A = B$ , то  $B = A$  (симметричность);
- 3) если  $A = B$  и  $B = C$ , то  $A = C$  (транзитивность).

Ранговая шкала используется, если определяющее отношение удовлетворяет *аксиомам упорядоченности*:

- 1) если  $A \neq B$ , то либо  $A > B$ , либо  $B > A$  (антисимметричность);
- 2) если  $A > B$  и  $B > C$ , то  $A > C$  (транзитивность).

Шкала интервалов применяется не только при выполнении аксиом упорядоченности, но и в случае, если известны расстояния между объектами, причем расстояния измеряются в единицах, одинаковых по всей длине шкалы.

Использование шкалы отношений допустимо, только если в дополнение к аксиомам упорядоченности выполняются и *аксиомы аддитивности*:

- 1) если  $A = P$  и  $B > 0$ , то  $A + B > P$ ;
- 2)  $A + B = B + A$ ;
- 3) если  $A = P$  и  $B = Q$ , то  $A + B = P + Q$ ;
- 4)  $(A + B) + C = A + (B + C)$ .

Для того чтобы можно было использовать абсолютную шкалу, помимо выполнения аксиом для всех предыдущих шкал необходимо наличие абсолютного нуля и абсолютной единицы.

Основные сведения обо всех рассмотренных шкалах приведены в табл. 2.3 [2].

Кроме приведенных в таблице основных типов шкал существуют и другие, такие, например, как шкала разностей (циклическая), степенная, логарифмическая и др.

Таблица 2.3

## Характеристики основных шкал

Название шкалы	Определяющие отношения	Эквивалентное преобразование шкал	Первичная обработка данных	Вторичная обработка
Наименований	Эквивалентность	Перестановки наименований	Вычисление символа Кронекера $\delta_{ij}$	Вычисление относительных частот, операции над ними
Порядка	Эквивалентность, предпочтение	Не изменяющее порядка (монотонное)	Вычисление $\delta_{ij}$ и рангов	Вычисление относительных частот, выборочных квантилей, операции над ними
Интервалов	Эквивалентность, предпочтение, сохранение отношения интервалов	Линейное преобразование $y = ax + b$	Вычисление $\delta_{ij}$ , рангов и интервалов	Арифметические действия над интервалами
Отношений	Эквивалентность, предпочтение, сохранение отношения интервалов, сохранение отношения значений	Растяжение $y = ax$	Все арифметические операции	Любая подходящая обработка
Абсолютная	Эквивалентность, предпочтение, сохранение отношения интервалов, сохранение отношения значений, абсолютная и безразмерная единица, абсолютный нуль	Шкала уникальна	Все арифметические операции, использование в качестве показателя степени, основания логарифма	Любая необходимая обработка

### 2.3.2. Методы измерений/оценки в условиях определенности

**Виды измерений.** Измерения необходимы при решении задач оценивания и выбора, таких как определение уровня развития системы по сравнению с аналогами, анализ динамики изменения состояний системы, выбор оптимального варианта реализации проектируемой системы, выбор оптимальной стратегии развития и т. д.

В данном разделе будут рассмотрены методы измерения свойств системы и их использования для оценивания систем и принятия решений в условиях отсутствия статистической неопределенности (система не подвержена воздействию случайных событий) и отсутствия нечеткости, расплывчатости (мнения экспертов о свойствах системы считаются четкими и достоверными). Измерения могут быть *объективными* или *субъективными*.

**Объективные** измерения производятся измерительными приборами<sup>5</sup>: измерение времени с помощью часов, массы с помощью весов, температуры с помощью термометра.

**Субъективные** измерения — это результат мыслительной деятельности человека, играющего в данном случае роль измерительного прибора. Субъективное измерение обычно производится экспертом (группой экспертов) или лицом, принимающим решения (ЛПР). Сравнивая объекты измерения между собой или с эталоном, эксперт выносит суждения, например, об их предпочтительности, степени соответствия требованиям, уровне их эффективности и т. д.

Чаще всего целью субъективных измерений является *оценивание* системы по тому или иному качественному признаку. Например, предприятие может оцениваться по качеству продукции, комфортности условий труда, уровню централизации управления и др. Результатом оценивания является оценка — число, отражающее меру (интенсивность) выраженности ка-

---

<sup>5</sup> Объективные измерения иногда могут выполняться человеком без применения приборов (например, подсчет количества чего-либо), но поскольку их результат не связан с субъективным мнением человека, то они считаются объективными.

качественного свойства или приоритет объекта среди множества других по данному свойству.

Поскольку объекты могут быть измерены с помощью субъективных и объективных измерений по множеству различных признаков, как качественных, так и количественных, для удобства сравнения объектов друг с другом необходима обобщенная или *интегральная* оценка. В самом деле, зачастую по одному признаку наилучшим является один объект, по другому — другой. Например, один вариант реализации бизнес-процесса может быть лучше другого по критерию стоимости, но хуже по средней продолжительности или по качеству. Таким образом, возникает проблема сведения значений частных критериев оценивания, измеряемых в различных шкалах, к значению интегрального критерия. В случае если удастся нормализовать значения частных критериев, т. е. привести их к значениям, измеряемым в одной шкале, используются *методы интеграции (свертки)*.

Оценивание играет важную роль при решении задач *выбора*, так как позволяет выявить предпочтения на множестве альтернативных вариантов (например: вариантов реализации системы, вариантов развития системы, вариантов управления). Варианты оцениваются по одному или множеству признаков, выступающих в роли критериев выбора, и осуществляется выбор наиболее предпочтительных.

В рамках теории принятия решений разработано множество методов количественного и качественного оценивания и выбора, основанных на объективном и субъективном измерениях: методы теории полезности, методы векторной оптимизации, методы экспертных оценок, эвристические процедуры принятия решений и др. Рассмотрим две группы методов экспертных оценок — методы выявления предпочтений экспертов и методы интеграции измерений.

**Методы выявления предпочтений экспертов.** По сути, это методы субъективного измерения (оценивания) по одному признаку. Имеется конечное число объектов  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ , оцениваемых экспертами по некоторому признаку  $q$ . Необходимо получить экспертные оценки  $q(x_1), \dots, q(x_n)$  объектов,

представляющие собой в зависимости от используемого вида шкалы либо ранги  $r_i, i = \overline{1, n}$ , либо числовые значения (баллы, действительные числа)  $a_i, i = \overline{1, n}$ .

**Ранжирование.** Представляет собой процедуру упорядочения объектов, выполняемую экспертом. На основе знаний и опыта эксперт располагает объекты в порядке предпочтения. Ранги присваиваются в порядке увеличения или убывания предпочтения. Если упорядочение образует нестрогий линейный порядок, то для эквивалентных объектов удобно с точки зрения технологии последующей обработки экспертных оценок назначать одинаковые ранги, равные среднеарифметическому значению присваиваемых им рангов. Такие ранги называют *связанными* [37, 38]. Например, пусть упорядочение объектов имеет следующий вид:  $x_1 \succ x_2 \succ x_3 \equiv x_4 \equiv x_5 \succ x_6$ . Тогда для объектов  $x_3, x_4, x_5$  связанные ранги  $r_3 = r_4 = r_5 = (3 + 4 + 5) / 3 = 4$ .

При групповом ранжировании каждый  $j$ -й эксперт присваивает каждому  $i$ -му объекту ранг  $r_{ij}$ . В результате проведения экспертизы получается матрица рангов  $\|r_{ij}\|$ .

Для агрегирования мнений нескольких экспертов чаще всего используется *метод суммы мест*. Для каждого объекта ранги, присвоенные экспертами, суммируются. Обобщенные ранги присваиваются в соответствии с увеличением (убыванием) сумм рангов.

В табл. 2.4 приведен пример результатов ранжирования семи объектов тремя экспертами и обобщенные ранги, полученные методом суммы мест.

Таблица 2.4

Пример результатов ранжирования

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
Эксперт 1	3	7	1	2	6	4	5
Эксперт 2	1	5	2	3	7	4	6
Эксперт 3	1	6	4	2	7	3	5
Сумма рангов	5	18	7	7	20	11	16
Обобщенный ранг	1	6	2,5	2,5	7	4	5

Необходимо подчеркнуть, что данный метод допустимо использовать только когда предполагается, что «расстояние» между рангами приблизительно одинаковы, т. е. когда ранги, по сути, являются баллами, а шкала в строгом смысле не является порядковой и может быть отнесена к интервальной.

Для оценки согласованности мнений экспертов используется дисперсионный коэффициент конкордации. При наличии связанных рангов используется формула [38]:

$$K = (12 \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2) / (m^2 (n^3 - n) - m \sum_{s=1}^m T_s),$$

где  $m$  — количество экспертов;  $n$  — количество объектов ранжирования;  $\bar{r}$  — оценка математического ожидания равная  $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij}$ ;  $T_s$  — показатель связанных рангов в  $s$ -й ранжировке.

Показатель  $T_s$  определяется по формуле  $T_s = \sum_{k=1}^{H_s} h_k^3 - h_k$ ,

где  $H_s$  — число групп равных рангов в  $s$ -й ранжировке;

$h_k$  — число равных рангов в  $k$ -й группе связанных рангов. Если совпадающих рангов нет, то  $T_s = 0$ .

Качественная оценка согласованности мнений экспертов, определяемая на основе коэффициента конкордации  $K$ , приведена в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Значение $K$	< 0,3	0,3–0,5	0,5–0,7	0,7–0,9	> 0,9
Характеристика согласованности	слабая	умеренная	заметная	высокая	очень высокая

**Парное сравнение.** Этот метод представляет собой процедуру установления предпочтения объектов при сравнении всех возможных пар. Результаты сравнения всех пар объектов удобно представлять в виде матрицы с булевыми значениями:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \succ x_j \text{ или } x_i \equiv x_j; \\ 0, & \text{если } x_i \prec x_j, i, j = \overline{1, n}. \end{cases}$$

В табл. 2.6 приведен пример матрицы парных сравнений с булевыми значениями для объектов, имеющих следующий порядок:  $x_1 \succ x_5 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$ .

Таблица 2.6

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$x_1$	1	1	1	1	1
$x_2$	0	1	0	0	0
$x_3$	0	1	1	1	0
$x_4$	0	1	0	1	0
$x_5$	0	1	1	1	1

Матрица должна быть согласована, т. е. для  $\forall i, j, k = \overline{1, n}$  должны выполняться условия:

- 1)  $w_{ii} = 1$ ;
- 2) если  $w_{ij} = 1$ , то  $w_{ji} = 0$ ;
- 3) если  $w_{ij} = 1$  и  $w_{jk} = 1$ , то  $w_{ik} = 1$ .

На основе матрицы парных сравнений с булевыми значениями можно определить ранги объектов. Сумма элементов матрицы по строке даст ранг объекта в порядке увеличения предпочтения (самый худший объект получит ранг 1, самый лучший — максимальный ранг), сумма элементов матрицы по столбцу — ранг объекта в порядке убывания предпочтения. Например, суммирование по строкам матрицы, приведенной в табл. 2.6, дает следующие ранги:  $r_1 = 5$ ,  $r_2 = 1$ ,  $r_3 = 3$ ,  $r_4 = 2$ ,  $r_5 = 4$ .

Если имеется несколько экспертов, то каждый из экспертов строит свою матрицу парных сравнений. Для построения обобщенной матрицы чаще всего используют *метод нахождения медианы*. При этом вводится понятие расстояния между матрицами, которое определяется числом поразрядных несовпадений всех значений элементов матрицы (метрика Хэмминга). Медианой называют матрицу, сумма расстояний от которой до всех матриц, построенных экспертами, является минимальной. В [38] показано, что все элементы медианы определяются по правилу большинства голосов, т. е. элемент обобщенной матрицы равен 1 только в том случае, если половина или больше экспертов посчитали этот элемент равным 1.

На рис. 2.12 в качестве примера приведены матрицы парных сравнений, построенные тремя экспертами, и соответствующая обобщенная матрица.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1

Матрица для 1-го эксперта      Матрица для 2-го эксперта      Матрица для 3-го эксперта      Обобщенная матрица

Рис. 2.12. Нахождение обобщенной матрицы парных сравнений

Для оценки степени согласованности мнений экспертов можно преобразовать матрицы парных сравнений в ранжировки и оценить степень их согласованности с помощью вычисления дисперсионного коэффициента конкордации (см. выше).

Значения матриц парных сравнений могут быть не только булевыми. Существуют и другие представления матриц парных сравнений. В частности:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \succ x_j; \\ 0, & \text{если } x_i \equiv x_j; \\ -1, & \text{если } x_i \prec x_j, \quad i, j = \overline{1, n}. \end{cases}$$

Используются также матрицы, которые позволяют не только фиксировать факт превосходства одного объекта над другим или их равенства, но и степень превосходства объектов друг над другом. Данный подход используется, в частности, в методе анализа иерархий (МАИ), разработанном Томасом Саати<sup>6</sup> [27].

**Непосредственная оценка.** Метод заключается в присвоении объектам числовых значений, отражающих степень выраженности измеряемого свойства. Это могут быть действительные числа на определенном интервале числовой оси, например на отрезке  $[0, 1]$ . Чаще применяют балльную оценку по 5-, 10-, 100-балльной шкале. Иногда эксперты исполь-

<sup>6</sup> Метод анализа иерархий будет рассмотрен в разделе 3 (п. 3.3.2).

зуют лингвистические значения, которые затем переводятся в балльные значения, например: «отлично» — 1,0; «очень хорошо» — 0,75; «хорошо» — 0,625; «удовлетворительно» — 0,5; «посредственно» — 0,25; «неудовлетворительно» — 0.

В случае групповой экспертизы обобщенные оценки объектов строятся на основе применения методов осреднения. Например, обобщенная оценка  $a_i$  объекта  $x_i$  может вычисляться по формуле среднего арифметического:

$$a_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m a_{ij},$$

где  $a_{ij}$  — оценка  $i$ -го объекта, выставленная  $j$ -м экспертом;  
 $m$  — количество экспертов.

При вычислении обобщенной оценки может быть учтена компетентность экспертов. В этом случае вводятся коэффициенты компетентности экспертов  $k_j$  — числа в интервале  $[0, 1]$ .

Причем сумма коэффициентов должна быть равна 1:  $\sum_{j=1}^m k_j = 1$ .

Обобщенная оценка в этом случае определяется по формуле

$$a_i = \sum_{j=1}^m k_j a_{ij}.$$

Коэффициенты компетентности могут быть определены методом непосредственной оценки.

**Последовательное сравнение (метод Черчмена–Акоффа).** Данный метод представляет собой комплексную процедуру измерения, включающую как ранжирование, так и непосредственную оценку. При последовательном сравнении эксперт выполняет следующие операции:

- 1) осуществляет ранжирование объектов;
- 2) производит непосредственную оценку объектов на отрезке  $[0,1]$ , полагая, что чем предпочтительнее объект  $x_i$ , тем больше его числовая оценка  $q(x_i)$ ;

- 3) решает, будет ли первый объект превосходить по предпочтительности все остальные объекты вместе взятые. Если да, то эксперт увеличивает значение числовой оценки первого объекта так, чтобы она стала больше суммы числовых оценок остальных объектов:

$$q(x_1) > \sum_{i=2}^m q(x_i)$$

В противном случае он изменяет величину  $q(x_1)$  так, чтобы она стала меньше, чем сумма оценок остальных объектов;

4) решает, будет ли второй объект предпочтительнее, чем все последующие вместе взятые объекты, и изменяет  $q(x_2)$  так же, как это описано для  $q(x_1)$  в пункте 3;

5) продолжает операцию сравнения предпочтительности последующих объектов и изменяет числовые оценки этих объектов в зависимости от своего решения о предпочтительности.

**Методы интеграции измерений (свертки).** Имеется конечное число объектов  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ , сравниваемых по множеству частных признаков (критериев)  $q_1, \dots, q_m$ . Для каждого объекта определены значения частных критериев:  $q_1(x_i), \dots, q_m(x_i), i = \overline{1, n}$ . Это могут быть как экспертные оценки (в случае групповой экспертизы используются обобщенные оценки), так и результаты объективных измерений. Необходимо определить интегральные оценки объектов  $\hat{q}(x_i), i = \overline{1, n}$ . Оценки по интегральному критерию зависят от значений частных критериев, т. е. являются их функцией:

$$\hat{q}(x_i) = f(q_1(x_i), \dots, q_m(x_i)), i = \overline{1, n}.$$

В случае если частные критерии имеют различную размерность (измеряются в различных шкалах), предварительно необходимо *нормировать* значения частных критериев, т. е. привести их к одному масштабу. Большинство способов свертки предполагает, что значения должны быть представлены в шкале, по типу являющейся шкалой отношений. Для нормирования абсолютные «натуральные» значения критериев переводятся в относительные безразмерные значения. Чаще всего используется отношение абсолютного значения критерия  $q_j^{ab}(x_i)$  к некоторому нормирующему значению  $q_j^{et}$  («идеальному», эталонному, максимальному), измеренному в тех же единицах:

$$q_j(x_i) = q_j^{ab}(x_i) / q_j^{et}.$$

Например, чтобы нормировать рост человека, измеренный в метрах, можно поделить его на нормирующий показатель, равный максимальному росту (допустим, 2,5 м). Тогда росту 1,5 м будет соответствовать нормированное значение 0,6,; росту 1,8 м — 0,72.

В качестве нормирующего значения может выступать сумма нормируемых значений по всем сравниваемым объектам. Например, нормирование объемов производства различных цехов предприятия может осуществляться путем вычисления соответствующих долей в общем объеме производства.

В случае, когда чем меньше значение критерия, тем оно должно оцениваться выше, используется отношение разницы между максимальным и абсолютным значением к разнице между минимальным и максимальным значениями:

$$q_j(x_i) = (q_j^{\max} - q_j^{ab}(x_i)) / (q_j^{\max} - q_j^{\min}),$$

где  $q_j^{\min}$ ,  $q_j^{\max}$  — соответственно минимальное и максимальное значения  $j$ -го критерия.

Иногда для нормирования используются так называемые «приростные» показатели. В этом случае находится доля прироста — отношение разницы между текущим значением показателя  $q_j^t(x_i)$  и некоторым базовым значением  $q_j^b(x_i)$  к базовому значению:

$$q_j(x_i) = (q_j^t(x_i) - q_j^b(x_i)) / q_j^b(x_i).$$

При этом значения, выходящие за рамки интервала  $[0;1]$  обрезаются (значение, превышающее единицу, приравнивается к 1, отрицательное значение считается равным 0). В случае если не увеличение, а снижение значения показателя оценивается как положительная тенденция, определяется не прирост, а убыль текущего значения по отношению к базовому.

Этот способ нормирования чаще всего используют при оценке динамики изменения состояния системы во времени. Текущим считается состояние в настоящий момент времени, базовым — состояние в некоторый предыдущий момент времени.

Перейдем к рассмотрению собственно методов интеграции измерений. Используется два основных способа — свертка (аддитивная или мультипликативная) частных критериев и метод идеальной точки.

**Аддитивная свертка частных критериев.** Значение интегрального критерия определяется как сумма значений частных критериев, поделенная на количество частных критериев:

$$\hat{q}(x_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m q_j(x_i), i = \overline{1, n}.$$

В случае если частные критерии имеют различную важность (вес), вместо формулы среднеарифметического для определения значения интегрального критерия используют средневзвешенное арифметическое:

$$\hat{q}(x_i) = \sum_{j=1}^m v_j q_j(x_i), i = \overline{1, n},$$

где  $v_j$  — вес  $j$ -го критерия, отражающий вклад частного критерия в интегральный. Это число в интервале  $[0, 1]$ . Причем сумма весовых коэффициентов всех частных критериев должна быть равна 1:  $\sum_{j=1}^m v_j = 1$ .

Для определения весовых коэффициентов может быть использован метод непосредственной оценки. Если оценка производится по 5- (10-, 100- ...) балльной шкале, то для нормирования можно использовать отношение к сумме баллов по всем критериям.

Иногда используют методы ранжирования. В частности, для определения весов на основе рангов используется формула  $v_j = r_j / \sum_{i=1}^m r_i$  (если наилучший критерий имеет макси-

мальный ранг) или  $v_j = (m + 1 - r_j) / \sum_{i=1}^m r_i$  (если наилучший критерий имеет ранг 1).

Однако этот способ позволяет определять веса весьма приблизительно. Рассмотрим пример. Пусть при оценивании степени важности четырех критериев эксперты присвоили ме-

тодом непосредственной оценки следующие значения весовых коэффициентов:  $v_1 = 0,15$ ;  $v_2 = 0,23$ ;  $v_3 = 0,27$ ;  $v_4 = 0,35$  ( $0,15 + 0,23 + 0,27 + 0,35 = 1$ ). При ранжировании критериев получим ранги:  $r_1 = 4$ ,  $r_2 = 3$ ,  $r_3 = 2$ ,  $r_4 = 1$ . Сумма рангов равна 10. Значения весовых коэффициентов, вычисленные на основе рангов, будут следующими:  $v_1 = (4 + 1 - 4)/10 = 0,1$ ;  $v_2 = (4 + 1 - 3)/10 = 0,2$ ;  $v_3 = (4 + 1 - 2)/10 = 0,3$ ;  $v_4 = (4 + 1 - 1)/10 = 0,4$ . Эти значения отличаются от весов, полученных методом непосредственной оценки.

**Мультипликативная свертка частных критериев.** Если частные критерии имеют одинаковый вес, значение интегрального критерия определяется по формуле среднегеометрического

$$\hat{q}(x_i) = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m q_j(x_i)}, i = \overline{1, n}.$$

Если же частные критерии имеют различную важность, то определяется средневзвешенное геометрическое

$$\hat{q}(x_i) = \prod_{j=1}^m q_j(x_i)^{v_j}, i = \overline{1, n}.$$

Как и в случае аддитивной свертки, сумма весовых коэффициентов должна быть равна 1.

Основным недостатком методов свертки является то, что низкие значения по одним критериям компенсируются высокими значениями по другим. Если же требуется обеспечить равномерное подтягивание всех показателей к наилучшему уровню (к «идеалу»), то используется метод идеальной точки.

**Метод идеальной точки.** Прежде всего, необходимо задать идеальную точку  $x_0$ , т. е. объект с наилучшими значениями по всем критериям. Для этого по каждому из частных критериев  $q_j$  необходимо определить наилучшее значение  $q_j(x_0)$ . Как правило,  $q_j(x_0) = \max_i q_j(x_i)$ .

Значение интегрального критерия для объекта  $x_i$  определяется через евклидово расстояние между ним и идеальной точкой  $x_0$  по всем частным критериям:

$$\hat{q}(x_i) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (q_j(x_0) - q_j(x_i))^2}, i = \overline{1, n}.$$

Наилучшим является объект, имеющий минимальное значение критерия.

В случае различной важности частных критериев используется взвешенная сумма расстояний

$$\hat{q}(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m v_j (q_j(x_0) - q_j(x_i))^2}, i = \overline{1, n}.$$

Если оценки объектов по частным критериям получены в порядковой (ранговой) шкале измерений, то расстояние между точками  $x_i$  и  $x_0$  определяется по формулам:

$$\hat{q}(x_i) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (1 - r_j(x_i))^2}; \quad \hat{q}(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m v_j (1 - r_j(x_i))^2}, i = \overline{1, n}$$

Первая формула используется, если критерии имеют одинаковый вес, вторая — если разный.

Существуют и различные модификации метода идеальной точки. В частности, расстояния по каждому из частных критериев не суммируются, а находится максимальное отклонение  $\hat{q}(x_i) = \max_j \sqrt{v_j (q_j(x_0) - q_j(x_i))^2}, i = \overline{1, n}$ .

Наилучшим считается объект, у которого максимальное отклонение минимально. Этот критерий позволяет «отбраковывать» альтернативы с большими отклонениями по отдельным критериям.

Рассмотрим пример. В табл. 2.7 приведены результаты измерения трех фирм-конкурентов Ф1, Ф2, Ф3 по трем частным критериям — «Стоимость продукции», «Время изготовления» и «Качество продукции», а также максимальные (max) и минимальные (min) значения критериев и их оценки важности (вес).

Таблица 2.7

Критерии		Результаты измерений				
Наименование	вес	Ф1	Ф2	Ф3	max	min
Стоимость продукции, руб.	0,5	700	300	500	900	100
Время изготовления, ч	0,3	32	24	48	56	16
Качество продукции, балл	0,2	80	50	75	100	0

Вычислим значения интегральных критериев с помощью аддитивной, мультипликативной свертки и метода идеальной точки.

Поскольку критерии имеют различную размерность, необходимо нормировать результаты измерений. При выборе способа нормирования по критерию стоимости нужно учесть, что чем меньше стоимость, тем оценка должна быть выше. Поэтому следует использовать отношение разницы между максимальным и абсолютным значением к разнице между минимальным и максимальным значениями:

- 1) для Ф1:  $(900 - 700) / (900 - 100) = 200 / 800 = 0,25$ ;
- 2) для Ф2:  $(900 - 300) / (900 - 100) = 600 / 800 = 0,75$ ;
- 3) для Ф3:  $(900 - 500) / (900 - 100) = 400 / 800 = 0,5$ .

По критерию времени нормирование осуществляется аналогично:

- 1) для Ф1:  $(56 - 32) / (56 - 16) = 24 / 40 = 0,6$ ;
- 2) для Ф2:  $(56 - 24) / (56 - 16) = 32 / 40 = 0,8$ ;
- 3) для Ф3:  $(56 - 48) / (56 - 16) = 8 / 40 = 0,2$ .

Для нормирования по критерию «Качество продукции» используем отношение к максимальному значению: 1) для Ф1:  $80/100 = 0,8$ ; 2) для Ф2:  $50/100 = 0,5$ ; 3) для Ф3:  $5/100 = 0,05$ .

Значения интегрального критерия по формуле аддитивной свертки:

- 1) для Ф1:  $0,25 \cdot 0,5 + 0,6 \cdot 0,3 + 0,8 \cdot 0,2 = 0,125 + 0,18 + 0,16 = 0,465$ ;
- 2) для Ф2:  $0,75 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,2 = 0,375 + 0,24 + 0,1 = 0,715$ ;
- 3) для Ф3:  $0,5 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 0,3 + 0,75 \cdot 0,2 = 0,25 + 0,06 + 0,15 = 0,46$ .

По формуле мультипликативной свертки получим следующие значения интегрального критерия:

- 1) для Ф1:  $0,25^{0,5} \cdot 0,6^{0,3} \cdot 0,8^{0,2} = 0,5 \cdot 0,858 \cdot 0,956 = 0,41$ ;
- 2) для Ф2:  $0,75^{0,5} \cdot 0,8^{0,3} \cdot 0,5^{0,2} = 0,866 \cdot 0,935 \cdot 0,87 = 0,704$ ;
- 3) для Ф3:  $0,5^{0,5} \cdot 0,2^{0,3} \cdot 0,75^{0,2} = 0,71 \cdot 0,617 \cdot 0,944 = 0,4135$ .

Наконец, по методу идеальной точки получим следующие значения:

- 1) для Ф1:  $\sqrt{0,5 \cdot (1 - 0,25)^2 + 0,3 \cdot (1 - 0,6)^2 + 0,2 \cdot (1 - 0,8)^2} = 0,64$ ;
- 2) для Ф2:  $\sqrt{0,5 \cdot (1 - 0,75)^2 + 0,3 \cdot (1 - 0,8)^2 + 0,2 \cdot (1 - 0,5)^2} = 0,3$ ;
- 3) для Ф3:  $\sqrt{0,5 \cdot (1 - 0,5)^2 + 0,3 \cdot (1 - 0,2)^2 + 0,2 \cdot (1 - 0,75)^2} = 0,57$ .

Как видим, наилучшее значение интегрального критерия по всем трем методам получила фирма Ф2. По методу аддитивной свертки на втором месте оказалась фирма Ф1, на третьем — Ф3. Методы мультипликативной свертки и идеальной точки дали несколько другой результат: второе место заняла фирма Ф3, а третье — Ф1.

### 2.3.3. Методы измерений/оценки в условиях неопределенности

**Виды неопределенности.** В процессе моделирования происходит отображение реальной ситуации на некоторый формализованный язык. В случае, когда отображение устанавливает взаимно однозначное соответствие между объектами отображаемой реальности и объектами языка, имеет место моделирование в условиях определенности. В противном случае говорят о наличии неопределенности. Виды неопределенности можно представить с помощью дерева (рис. 2.13) [39].

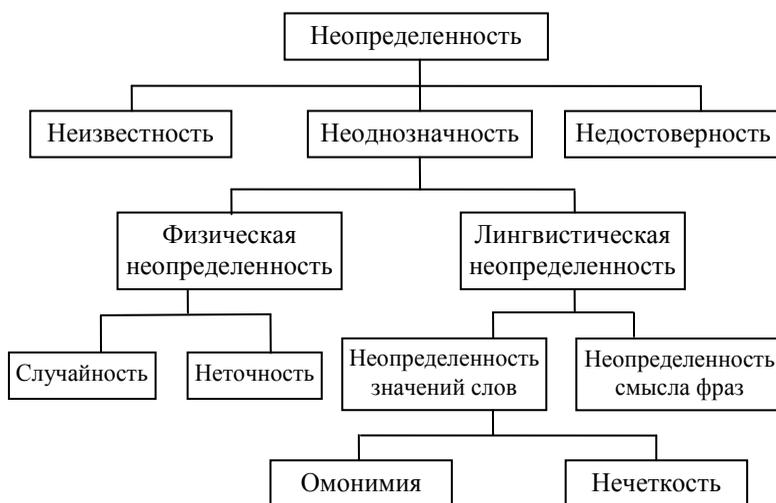


Рис. 2.13. Виды неопределенности

Первый уровень дерева образован терминами, качественно характеризующими количество отсутствующей информации.

В случае *неизвестности* информация практически отсутствует. Это, как правило, бывает на начальной стадии изучения ситуации.

*Недостоверность* присутствует, когда информация собрана не полностью или собранная информация характеризует объекты реальности приблизительно (неадекватно). Наличие этого вида неопределенности связано либо с тем, что процесс сбора информации временно приостановлен, либо с нехваткой ресурсов, выделенных для сбора информации.

Неопределенность типа *неоднозначности* имеет место, когда вся возможная информация собрана, однако полностью определенное описание не получено и не может быть получено [39].

Второй уровень дерева описывает источники (причины) неоднозначности, которыми являются внешняя среда (*физическая неопределенность*) или используемый исследователем профессиональный язык (*лингвистическая неопределенность*).

Физическая неопределенность типа *случайности* (стохастическая неопределенность) связана с наличием во внешней среде нескольких возможностей, каждая из которых случайным образом становится действительностью. Другим видом физической неопределенности является *неточность*, которая связана с неточностью измерений вполне определенной величины, выполняемых физическими приборами [39].

Лингвистическая неопределенность связана с использованием естественного языка. Она обусловлена необходимостью оперировать конечным числом слов и ограниченным числом структур фраз для описания бесконечного множества разнообразных ситуаций. Лингвистическая неопределенность порождается, с одной стороны, *неопределенностью значений слов* (понятий и отношений) языка, которую условно называют *полисемией*, а, с другой стороны, *неоднозначностью смысла фраз*.

Можно выделить два вида полисемии: омонимия и нечеткость. Если отображаемые одним и тем же словом объекты существенно различны, то соответствующую ситуацию относят к *омонимии*. Например, словом «коса» обозначают такие разные объекты, как вид побережья, сельскохозяйственный инструмент, вид прически. Полисемия типа *нечеткости* имеет

место, когда применение того или иного слова для отображения объектов неоднозначно. Например, рост 177 см можно обозначить словом «высокий», а можно — словом «средний».

Неоднозначность смысла фраз может быть *синтаксической, семантической и прагматической*. В первом случае уточнение синтаксиса позволяет понять смысл фразы. Например, правильная расстановка знаков препинания в предложении «казнить нельзя помиловать» позволяет избежать неоднозначности. При семантической неопределенности, несмотря на правильность синтаксиса, смысл отдельных слов и всей фразы неясен. Классический пример — фраза «глокая куздра штеко будланула бокра и кудрячит бокренка». Прагматическая неопределенность связана с неоднозначностью использования понятной информации для достижения целей деятельности [39].

В данном разделе будут рассмотрены некоторые процедуры оценивания систем в условиях физической неопределенности (неопределенности состояний внешней среды), а также в условиях лингвистической неопределенности (нечеткости понятий, используемых для оценки).

**Измерения в условиях неопределенности состояний внешней среды.** Рассмотрим процедуры оценки, используемые в задачах *выбора управления в условиях риска*.

Имеется ряд альтернативных вариантов управления  $u_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) системой, а также ряд возможных состояний  $w_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) внешней среды. Каждому  $i$ -му варианту управления для каждого  $j$ -го состояния среды могут быть сопоставлены значения эффективности системы  $k_{ij}$ . Оценки эффективности системы можно представить в виде таблицы (табл. 2.8). Каждая строка таблицы содержит значения эффективности системы для одного варианта управления при всех состояниях среды, а каждый столбец — значения эффективности для всех вариантов управления при одном и том же состоянии среды.

Необходимо выбрать наиболее предпочтительный вариант управления. В зависимости от характера предпочтений лица, принимающего решения, используются различные критерии выбора [37].

Таблица 2.8

Варианты управления	Возможные состояния среды			
	$w_1$	$w_2$	...	$w_n$
$u_1$	$k_{11}$	$k_{12}$	...	$k_{1n}$
$u_2$	$k_{21}$	$k_{22}$	...	$k_{2n}$
...	...	...	...	...
$u_m$	$k_{m1}$	$k_{m2}$	...	$k_{mn}$

**Критерий среднего выигрыша.** Данный критерий предполагает задание вероятностей состояний среды  $p_j$ . Эффективность вариантов управления оценивается как среднее ожидаемое значение (математическое ожидание) оценок эффективности по всем состояниям среды:

$$K(u_i) = \sum_{j=1}^n p_j k_{ij}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Наилучшим считается вариант, имеющий максимальную эффективность:  $u^{\text{opt}} = \arg \max_i K(u_i)$ .

**Критерий Лапласа** представляет собой частный случай критерия среднего выигрыша. Он применяется в случае, когда неизвестны вероятности состояний среды. В основе критерия лежит предположение, что поскольку о состояниях обстановки ничего не известно, то их можно считать равновероятными. Исходя из этого

$$K(u_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij}, \quad i = 1, \dots, m; \quad u^{\text{opt}} = \arg \max_i K(u_i).$$

**Критерий максимина (Вальда).** Другое название — критерий *осторожного наблюдателя*, так как он гарантирует определенный выигрыш при наихудших условиях. Критерий основывается на том, что, если состояние обстановки неизвестно, нужно поступать самым осторожным образом, ориентируясь на минимальное значение эффективности каждого варианта.

Для каждого варианта находится минимальная из оценок по различным состояниям среды:

$$K(u_i) = \min_j k_{ij}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n.$$

Оптимальным считается вариант с максимальным значением минимальной оценки:  $u^{\text{opt}} = \arg \max_i K(u_i)$ .

**Критерий максимакса.** Это самый оптимистический критерий. Те, кто предпочитает им пользоваться, всегда надеются на лучшее состояние обстановки и, естественно, в большой степени рискуют. Варианты оцениваются по максимальному значению эффективности и в качестве оптимального выбирается вариант, обладающий наибольшим из максимумов:

$$K(u_i) = \max_j k_{ij}, i = 1, \dots, m; u^{\text{opt}} = \arg \max_i K(u_i).$$

**Критерий пессимизма-оптимизма (Гурвица).** Согласно данному критерию при оценке и выборе систем неразумно проявлять как осторожность, так и азарт, а следует, учитывая самое высокое и самое низкое значения эффективности, занимать промежуточную позицию (взвешивать наихудшие и наилучшие условия). Для этого вводится коэффициент оптимизма  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), характеризующий отношение к риску лица, принимающего решение. Эффективность систем находится как взвешенная с помощью коэффициента  $\alpha$  сумма максимальной и минимальной оценок:

$$K(u_i) = \alpha \max_j k_{ij} + (1 - \alpha) \min_j k_{ij}; u^{\text{opt}} = \arg \max_i K(u_i).$$

При  $\alpha = 0$  критерий Гурвица сводится к критерию максимина, при  $\alpha = 1$  — к критерию максимакса. Значение  $\alpha$  может определяться методом экспертных оценок.

**Критерий минимакса (Сэвиджа).** Как и критерий максимина (Вальда) он минимизирует потери эффективности при наихудших условиях. Для оценки систем на основе данного критерия матрица эффективности должна быть преобразована в матрицу потерь (риска). Каждый элемент матрицы потерь определяется как разность между максимальным (по всем вариантам) и текущим (для данного варианта) значениями оценок эффективности:  $\Delta k_{ij} = \max_i k_{ij} - k_{ij}$ .

После преобразования матрицы оптимальным считается вариант с минимальной из максимальных оценок потерь по всем состояниям среды:

$$K(u_i) = \max_j \Delta k_{ij}; \quad u^{\text{opt}} = \arg \min_i K(u_i).$$

На выбор того или иного критерия оказывает влияние ряд факторов [37]:

- природа конкретной задачи и ее цель (для одних целей допустим риск, для других — нужен гарантированный результат);
- причины неопределенности (одно дело, когда неопределенность является случайным результатом действия объективных законов природы, и другое, когда она вызывается действиями разумного противника, стремящегося помешать в достижении цели);
- характер лица, принимающего решение (одни люди склонны к риску в надежде добиться большего успеха, другие предпочитают действовать всегда осторожно).

Результаты оценки эффективности вариантов по различным критериям существенно отличаются. В табл. 2.9 приведены исходные значения эффективности трех вариантов при четырех различных состояниях среды и вычисленные значения эффективности по рассмотренным критериям. При вычислении эффективности по критерию Гурвица использовался коэффициент оптимизма  $\alpha = 0.6$ .

Таблица 2.9

Варианты	Эффективность для разных состояний среды				Эффективность по критериям					
	$w_1(p_1 = 0,3)$	$w_2(p_2 = 0,2)$	$w_3(p_3 = 0,4)$	$w_4(p_4 = 0,1)$	Среднего выигрыша	Лапласа	Вальда	Максимакса	Гурвица	Сэвиджа
$u_1$	0,4	0,3	0,2	0,5	0,31	0,35	0,2	0,5	0,38	0,3
$u_2$	0,2	0,4	0,1	0,3	0,21	0,25	0,1	0,4	0,28	0,4
$u_3$	0,3	0,1	0,5	0,4	0,35	0,325	0,1	0,5	0,34	0,3

Рассмотрим для примера, как определялась эффективность для варианта  $u_1$  по различным критериям:

1) критерию среднего выигрыша:

$$K(u_1) = 0,4 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 0,4 + 0,5 \cdot 0,1 = 0,31.$$

2) критерию Лапласа:

$$K(u_1) = (0,4 + 0,3 + 0,2 + 0,5) / 4 = 0,35.$$

3) критерию Вальда:

$$K(u_1) = \min (0,4; 0,3; 0,2; 0,5) = 0,2.$$

4) критерию максимакса:

$$K(u_1) = \max (0,4; 0,3; 0,2; 0,5) = 0,5.$$

5) критерию Гурвица:

$$K(u_1) = 0,6 \cdot \max (0,4; 0,3; 0,2; 0,5) + 0,4 \cdot \min (0,4; 0,3; 0,2; 0,5) = 0,38.$$

6) критерию Сэвиджа:

$$K(u_1) = \max (0,4 - 0,4; 0,4 - 0,3; 0,5 - 0,2; 0,5 - 0,5) = 0,3.$$

**Нечеткие измерения.** Типовые шкалы основаны на справедливости отношения эквивалентности: два измерения либо тождественны, либо различимы. Однако люди часто пользуются нечеткими, расплывчатыми понятиями, не позволяющими однозначно отнести измеряемые объекты к тому или иному классу эквивалентности. Например, человека ростом 169 см, можно отнести как классу «низкий», так и к классу «средний». Примеры подобных понятий: «молодой», «сильный», «толстый», «бедный», «немного», «медленно» и т. п. Математическая теория нечетких множеств Л. Заде, позволяет описывать нечеткие понятия и знания, оперировать этими знаниями и делать нечеткие выводы. Рассмотрим основные понятия данной теории, расширяющие понимание шкалы.

Пусть  $X = \{x\}$  — базовое множество, а  $G$  — некоторое свойство. Обычное (четкое) подмножество  $A$  базового множества  $X$ , элементы которого удовлетворяют свойству  $G$ , можно задать, сопоставив каждому элементу  $x$  значение характеристической функции  $\mu_A(x)$ , принимающей значение 1, если  $x$  удовлетворяет свойству  $G$ , и 0 — в противном случае:

$$A = \{x / \mu_A(x)\}.$$

Например, базовое множество составляют дни недели: {пн, вт, ср, чт, пт, сб, вс} (используются сокращенные названия), а измеряемое свойство — «являться выходным днем». Тогда четкое множество «выходной день» (при пятидневной рабочей неделе) можно задать следующим образом:

{пн/0, вт/0, ср/0, чт/0, пт/0, сб/1, вс/1}

или, опустив элементы с нулевым значением характеристической функции, как {сб/1, вс/1}.

Нечеткое множество отличается от обычного тем, что для элементов  $x$  нет однозначного ответа, удовлетворяют ли они свойству  $G$ , можно это утверждать лишь с некоторой степенью уверенности. Степень уверенности выражается числом в интервале  $[0, 1]$ . При этом 1 означает полную уверенность, что  $x$  удовлетворяет свойству  $G$ , 0 — полную уверенность, что  $x$  не удовлетворяет свойству  $G$ , промежуточные значения означают частичную уверенность (чем больше число, тем больше степень уверенности). Таким образом, в случае нечеткого множества имеет место формула  $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ . Характеристическая функция при этом называется *функцией принадлежности* [40].

Например, нечеткое множество «выходной день» для случая, если неизвестно, имеется в виду пятидневная или шестидневная рабочая неделя, может быть задано следующим образом: {пн/0, вт/0, ср/0, чт/0, пт/0, сб/0.75, вс/1} или {сб/0.75, вс/1}.

Для описания нечетких свойств объектов используются также так называемые *лингвистические переменные*, значения которых суть нечеткие множества. Для примера рассмотрим лингвистическую переменную «возраст» со значениями «молодой», «средний», «пожилой». Каждому из этих значений соответствует нечеткое множество. Множества можно задать, используя в качестве базового множества множество конкретных людей  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_7\}$ , например:

«молодой» =  $\{x_1/0,3; x_2/1; x_3/0,8\}$ ;

«средний» =  $\{x_1/0,6; x_3/0,25; x_4/1; x_5/1; x_6/0,4\}$ ;

«пожилой» =  $\{x_6/0,7; x_7/1\}$ .

Как видим, в этом примере некоторые люди были отнесены сразу к нескольким множествам. Например,  $x_1$  был включен во множество «молодой» со степенью уверенности 0,3, а во множество «средний» — со степенью уверенности 0,6.

Значения лингвистической переменной «возраст» можно задать и на базовом множестве, представляющем собой значения возраста в годах. Если рассматривать переменную,

соответствующую возрасту в годах, как непрерывную величину, то областью определения функций принадлежности нечетких множеств «молодой», «средний», «пожилой» будет отрезок числовой оси от 0 до 100. На рис. 2.14 приведен пример функций принадлежности для каждого из данных множеств ( $\mu_{\text{мол}}$ ,  $\mu_{\text{ср}}$ ,  $\mu_{\text{пож}}$ ). Как видно из рисунка для 30-летнего человека лингвистическая переменная «возраст» принимает значение «молодой» со степенью уверенности 0,25 ( $\mu_{\text{мол}} = 0,25$ ) и «средний» со степенью уверенности 0,8 ( $\mu_{\text{ср}} = 0,8$ ).

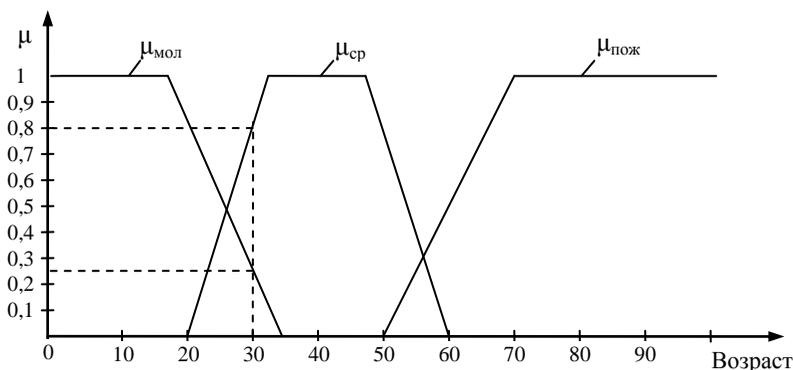


Рис. 2.14. Пример функций принадлежности нечетких множеств

Переход от четкого значения на базовом множестве к нечеткому называется *фаззификацией* (от англ. fuzzy — нечеткость), обратный переход — *дефаззификацией*.

Над нечеткими множествами можно производить **логические операции** — объединение, пересечение, дополнение, включение, разность и т. д. Рассмотрим первые две из перечисленных операций (графическая интерпретация данных операций приведена на рис. 2.15).

*Пересечением*  $A \cap B$  нечетких множеств  $A$  и  $B$  является наибольшее нечеткое подмножество, содержащееся одновременно в  $A$  и  $B$  (рис. 2.15, а), с функцией принадлежности  $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ .

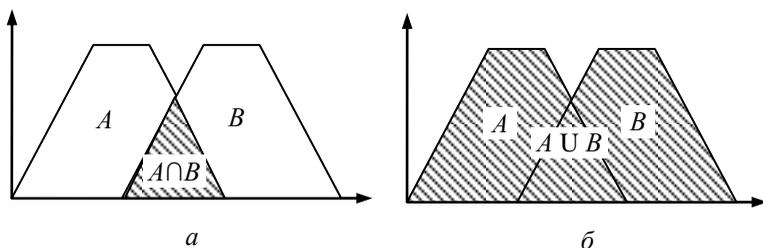


Рис. 2.15. Графическая интерпретация нечетких логических операций:  
*a* – пересечения; *б* – объединения

Объединением  $A \cup B$  нечетких множеств  $A$  и  $B$  является наименьшее нечеткое множество, включающее как  $A$ , так и  $B$  (рис. 2.15, б), с функцией принадлежности

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)).$$

Операцию пересечения используют для конъюнкции нечетких высказываний типа « $a$  есть  $A$ » ( $a$  — нечеткая переменная,  $A$  — значение), а операцию объединения — для дизъюнкции. Например, степень уверенности утверждения ( $x$  есть «молодой») И ( $x$  есть «высокий») определяется как минимум степеней уверенности в истинности каждого из высказываний, входящих в это утверждение.

Для выбора вариантов, измеряемых с помощью нечетких параметров, используются различные методы — ранжирование альтернатив на множестве лингвистических оценок, многокритериальный выбор на основе нечеткого отношения предпочтения, нечеткий вывод на множестве правил-продукций и т. д. [2, 39, 40, 41].

Рассмотрим на простом примере, каким образом осуществляется выбор альтернатив с помощью механизма нечеткого вывода. Имеется три варианта организации бизнес-процесса —  $V_1, V_2, V_3$ , характеризуемых лингвистическими переменными «качество», «стоимость», «эффективность». Переменная «качество» принимает значения <'п' (плохое), 'у' (удовлетворительное), 'х' (хорошее)>, а переменные «стоимость» и «эффективность» — <'н' (низкая), 'с' (средняя), 'в' (высокая)>. Значения переменной «стоимость» для каждого из вариантов

может определяться с помощью функций принадлежности (базовым множеством может выступать стоимость процесса, заданная в рублях). Пусть были получены следующие оценки стоимости: для В1 — 'н'/0,8, для В2 — 'в'/0,75, для В3 — 'с'/0,6. Значения переменной «качество» могут задаваться непосредственно экспертами для каждого из вариантов. Допустим, были получены следующие оценки: для В1 — 'х'/0,7, для В2 — 'у'/0,65, для В3 — 'у'/0,9.

Переменная «эффективность» выступает критерием эффективности и определяется с помощью, так называемых, правил-продукций — логических правил формата «Если ... и ... то» («If ... & ... then»):

П1: If «стоимость» = 'н' & «качество» = 'х' then «эффективность» = 'в';

П2: If «стоимость» = 'с' & «качество» = 'у' then «эффективность» = 'с';

П3: If «стоимость» = 'в' & «качество» = 'у' then «эффективность» = 'н';

....

При выводе последовательно перебираются правила, и для каждого проверяется выполнение условной части (предпосылки, части «If»). При этом если условная часть содержит несколько высказываний, соединенных конъюнкцией (&, «и»), то степень уверенности в одновременном выполнении всех предпосылок определяется как минимум от степеней уверенности для отдельных высказываний. Если истинность левой части правила отлична от 0, то истинность заключения (правой части, части «then») также считается ненулевой. При этом степень уверенности для высказывания, содержащегося в заключении правила, равна степени уверенности для предпосылки правила.

Например, в процессе вывода оценки варианта В1, для которого «стоимость» = 'н'/0,8 и «качество» = 'х'/0,7, по вышеприведенным правилам определяется, что ненулевое значение истинности имеет правило П1. Степень уверенности для его левой части определяется как  $\min(0,8; 0,7)$  и равна 0,7. Такую же степень уверенности будет иметь высказывание в правой части. Следовательно, для этого варианта «эф-

фективность» =  $v/0,7$ . Аналогично выводятся значения критерия для остальных вариантов. Для варианта В2 срабатывает правило П3 и выводится значение «эффективность» =  $n/0,65$ . Для варианта В3 подходит правило П2, в соответствии с которым «эффективность» =  $c/0,6$ .

Если самим правилам-продукциям присваивается некоторая степень уверенности в их истинности, то при выводе истинности заключения, как правило, используют или операцию минимума между степенями истинности левой части и всего правила, или операцию умножения. Если для одной и той же переменной вывода получены разные значения (с разными степенями уверенности), выведенные с помощью различных правил, то для композиции (объединения) этих значений обычно используют операцию максимума или алгебраическую сумму степеней уверенности. Мы проиллюстрировали наиболее простой способ нечеткого вывода. Существует множество других, в частности, описанных в работах [39–41].

**Различия между вероятностным подходом и подходом на основе нечеткости.** Теория нечетких множеств появилась относительно недавно. Традиционно для учета неопределенности использовался вероятностный подход. Случайность и нечеткость имеют много общего. Обе описывают неопределенность числами в интервале  $[0,1]$  и оперируют множествами согласно законам ассоциативности, коммутативности и дистрибутивности. Однако по сути это разные понятия. Применение вероятностей оправданно там, где речь идет об однородных случайных событиях массового характера. В том случае, если статистической однородности нет, применение классических вероятностей в анализе оказывается незаконным. Нечеткость же используется как характеристика уверенности субъекта в правильности суждений о явлениях, которые могут даже не носить случайного характера. Законами распределения вероятностей описываются объективные закономерности, функции принадлежности же всегда субъективны.

Различия носят не только концептуальный, но и теоретический характер. Рассмотрим пример пересечения взаимоисключающих событий. Сумма вероятностей двух взаимно

исключающих друг друга событий всегда равна единице, в то время как сумма значений функций принадлежности для элемента, принадлежащего двум нечетким множествам, описывающим два различных понятия, может быть и меньше, и больше единицы.

## 2.4. Декомпозиция/композиция систем

### 2.4.1. Методы декомпозиции

Декомпозиция позволяет осуществить последовательное расчленение системы на подсистемы, которые, в свою очередь, могут быть разбиты на составляющие их части. Разбиение системы на подсистемы в общем случае может быть выполнено неоднозначным образом и определяется составом используемых признаков декомпозиции (*оснований декомпозиции*) и порядком их применения.

Основание декомпозиции (ОД) может соответствовать типу отношения между подсистемами, выделенного в качестве признака различения подсистем. Так, использование признака «пространство» позволяет выделить пространственно удаленные друг от друга подсистемы, при декомпозиции по признаку «время» выделяют подсистемы, которые проявляют себя в различные периоды времени, например, выполняющие различные этапы процесса (рис. 2.16).

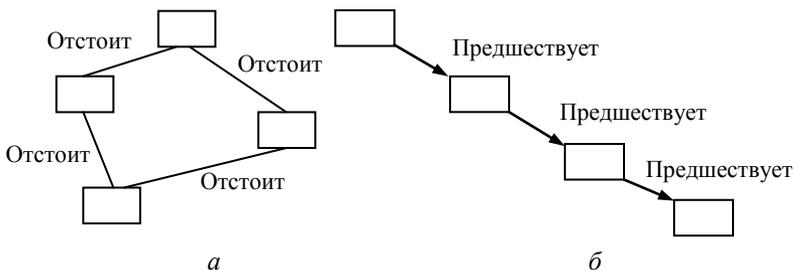


Рис. 2.16. Декомпозиция:

*а* — по пространственному признаку; *б* — по временному признаку

Другой способ задания основания декомпозиции — перечисление подсистем, получаемых в процессе декомпозиции. Например, выделение моделируемой системы и окружающей среды есть основание декомпозиции «надсистемы», выделение управляющей и управляемой подсистем есть основание декомпозиции любой системы с управлением. Таким образом, основание декомпозиции рассматривается как модель состава. Впрочем, это справедливо и для оснований, соответствующих типам отношений. В самом деле, основание ОД по пространственному признаку можно рассматривать как модель системы в виде совокупности пространственно удаленных подсистем, ОД по временному признаку — в виде совокупности этапов, следующих друг за другом во времени.

Для различных классов систем можно выделить ряд *стандартных оснований декомпозиции* (СОД). СОД, по сути, являются типовыми моделями системы, относящейся к соответствующему классу.

**Принципы формирования и применения стандартных оснований декомпозиции [42]:**

1) СОД должны отражать инвариантный состав систем определенного класса. Например, можно определить типовой набор подсистем для различных классов организационных систем, информационных систем, технических и т. д.;

2) СОД должны обеспечивать выделение в качестве подсистем более или менее самостоятельно функционирующие части, т. е. связи между подсистемами должны быть минимальными, а связи между элементами внутри подсистем — максимальными;

3) СОД должны обеспечивать при декомпозиции получение относительно полной совокупности подсистем (элементов) декомпозируемой системы. Например, формально полной является декомпозиция связей системы с окружающей средой на входящие и выходящие. Полной можно считать совокупность следующих этапов жизненного цикла системы: начало, середина, конец. Конечно, эта схема слишком обща, поэтому на практике используются более детальные модели;

4) СОД должны обеспечивать выделение подсистем, которые не включают друг друга. Например, применение одного

СОД при декомпозиции некоторого производственного процесса не должно приводить к выделению наряду с подсистемой «производство изделия» подсистемы «сборка изделия», так как сборка есть часть процесса производства, и соответствующая подсистема может появиться лишь при дальнейшей декомпозиции;

5) на каждом шаге декомпозиции должно использоваться только одно основание декомпозиции;

6) выбор СОД для декомпозиции конкретной подсистемы зависит от того, какая последовательность была применена ранее для выделения данной подсистемы. Например, декомпозиция на технологические этапы производства некоторого продукта может быть проведена только после того, как будет выделена подсистема производства данного продукта;

7) некоторые из СОД могут применяться несколько раз подряд. Например, основание декомпозиции, предполагающее выделение технологических этапов, может быть применено сначала для выделения укрупненных стадий производства, а затем применительно к каждой из этих стадий — для выделения подэтапов и т. д. (вплоть до операций).

Перечислим **стандартные основания декомпозиции для систем организационно-технологического типа** (предприятий, фирм, компаний, занимающихся производством каких-либо продуктов или оказанием услуг) [1, 2, 16, 42–44 и др.].

1. **Система – среда.** Выделение исследуемой системы и окружающей среды.

2. **Макросреда – микросреда.** Макросреда — совокупность факторов общественной жизни, оказывающих влияние на исследуемую систему, микросреда — совокупность организаций, непосредственно или опосредованно связанных с системой.

3. **Подсистемы макросреды.** Типичными подсистемами макросреды являются: «производство» (технологическое, экономическое окружение), «природа» (географическое окружение), «социум» (социально-культурное окружение), «управление» (политико-правовое окружение).

4. **Подсистемы микросреды.** К микросреде относятся, как правило, следующие группы организаций: вышестоящие органы управления (территориальные, отраслевые), нижестоящие

(подведомственные) организации, контрагенты (поставщики, партнеры), клиенты (потребители, заказчики), конкуренты.

3. **Система управления – объект управления.** Выделение в исследуемой системе управляемой подсистемы (включающей исполнителей производственных процессов, оборудование, ресурсы) и управляющей (аппарат управления).

4. **Основная – обеспечивающая деятельность.** Основная деятельность связана с производством конечных продуктов системы, передаваемых во внешнюю среду – клиентам (потребителям, заказчикам). Обеспечивающая (вспомогательная) деятельность обеспечивает работу основных процессов. Она напрямую не связана с продукцией, ее задача — формирование и обслуживание инфраструктуры.

5. **Виды конечных продуктов.** Декомпозиция основной деятельности на подсистемы, производящие различные конечные продукты (оказывающие различные виды услуг). Например, выделение подсистемы производства мягкой мебели и подсистемы производства корпусной мебели.

6. **Жизненный цикл.** Жизненный цикл — это цепочка процессов, составляющих путь следования продукта: от его замысла до утилизации и переработки отслужившего свой срок продукта.

Жизненный цикл составляют следующие процессы:

- изучение рынка и анализ потребности в продукте;
- проектирование и разработка продукта;
- разработка и внедрение технологии производства продукта;
- материально-техническое снабжение (закупки);
- производство продукта или предоставление услуги;
- упаковка и хранение продукта;
- транспортировка и реализация;
- послепродажная деятельность;
- утилизация и переработка.

Для каждой подсистемы, производящей некоторый вид конечного продукта, можно выделить еще более мелкие подсистемы, соответствующие процессам жизненного цикла.

7. **Виды обеспечивающей деятельности.** Примеры обеспечивающих (вспомогательных) процессов:

- обслуживание оборудования;
- обслуживание зданий и сооружений;
- обеспечение энергоресурсами;
- информационное обеспечение;
- управление персоналом;
- управление документацией;
- охрана труда и техника безопасности;
- PR-деятельность (связь с общественностью);
- обеспечение финансовой поддержки;
- юридическое обеспечение.

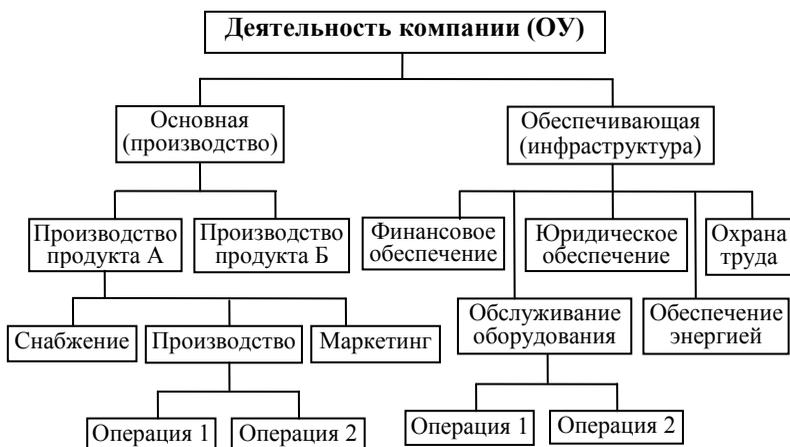
8. **Технологические этапы.** Декомпозиция подсистемы, выполняющей некоторый вид производственной деятельности (основной или обеспечивающей), на подсистемы, соответствующие отдельным этапам деятельности (подпроцессам, работам, операциям), предусмотренным технологией. Например, процесс производства изделия может включать подпроцессы изготовления деталей, сборки, покраски.

9. **Структурные элементы деятельности.** Для любой подсистемы, выполняющей некоторую деятельность (процесс, подпроцесс, операцию), можно выделить типовые структурные элементы деятельности:

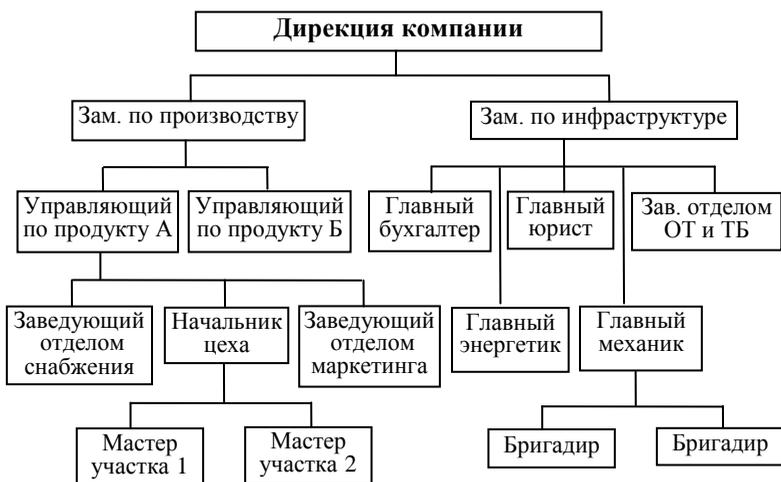
- входы / предметы деятельности (сырье, материалы, комплектующие, информация);
- выходы / результаты деятельности (продукт, услуга, информация);
- кадры / субъекты деятельности (люди, выполняющие деятельность);
- оборудование / средства деятельности (станки, машины, инструменты, средства связи, помещения).

Стандартные основания декомпозиции 4–8 могут использоваться и для системы управления (СУ). Прежде всего, они используются для декомпозиции СУ на подсистемы, в которых осуществляется управление отдельными подсистемами объекта управления (ОУ).

На рис. 2.17, *а* представлена модель деятельности компании, полученная в результате декомпозиции объекта управления, на рис. 2.17, *б* — соответствующая ей модель системы управления.



*a*



*б*

Рис. 2.17. Модели компании:

*a* — модель объекта управления; *б* — модель системы управления

Подсистемам основной и обеспечивающей деятельности ОУ ставятся в соответствие подсистемы СУ: одна включает заместителя по производству и подчиненных ему менеджеров;

вторая — заместителя по инфраструктуре и его подчиненных (см. рис. 2.17).

Каждой из подсистем ОУ, производящей различные конечные продукты, также как и каждой из подсистем жизненного цикла производства некоторого продукта и каждой из подсистем вспомогательного производства, тоже ставится в соответствие своя подсистема управления. Например, подсистеме ОУ «Маркетинг» соответствует подсистема СУ во главе с заведующим отделом маркетинга, подсистеме ОУ «Обслуживание оборудования» соответствует служба главного механика и т. д.

Отдельным технологическим этапам подсистем ОУ тоже могут быть сопоставлены подсистемы управления (как правило, они представлены управляющими нижнего звена — мастерами участков, бригадирами, заведующими лабораториями и группами).

Кроме того, стандартные основания 4–8 могут быть применены и для декомпозиции самого процесса управления. Так, декомпозиция по основанию 4 позволяет выделить основной процесс управления и обеспечивающий. Основным можно считать процесс принятия решений, а к обеспечивающему процессу будем относить систему документооборота, обеспечивающую сбор, передачу, хранение информации.

Декомпозиция по стандартному основанию 6 приводит к вычленению процессов жизненного цикла управления, к которым можно отнести:

- прогнозирование;
- планирование (перспективное, текущее);
- организация;
- оперативное руководство;
- контроль и регулирование.

Каждый из этих процессов может быть декомпозирован на отдельные этапы. Так, процесс планирования включает в себя этапы: анализ ситуации; выбор целей; объемное планирование, календарное планирование. Оперативное руководство включает: координацию действий подчиненных; оценку их труда и воздействие на них (поощрение и наказание); заботу о подчиненных (создание благоприятных условий тру-

да, решение конфликтов и др.). Процесс контроля содержит следующие стадии: измерение результата, сравнение с планом; анализ отклонений и регулирование.

На нижнем уровне декомпозиции представлены операции по переработке информации: регистрация, сбор, передача, обработка, отображение, хранение, защита, уничтожение информации.

К любой из подсистем системы управления может быть применено и стандартное основание 9, предполагающее выделение структурных элементов деятельности.

Так, входом подсистемы СУ является информация, подлежащая некоторой переработке, выходом — переработанная информация. Субъектом деятельности, как правило, является менеджер (управляющий), а средством деятельности — используемое офисное оборудование, компьютер и т. д.

Необходимо подчеркнуть, что разными авторами предлагаются различные наборы оснований декомпозиции и даже одни и те же основания могут отличаться по составу включенных в них подсистем.

Существуют различные методы декомпозиции. Некоторые из них, в частности методы функциональной декомпозиции, декомпозиционные методы построения деревьев целей, будут рассмотрены в третьем разделе. Тем не менее можно выделить общие подходы, характерные для всех методов. В самом общем виде последовательность декомпозиции сложной системы включает следующие шаги:

1) выбор системы (подсистемы) для декомпозиции, являющейся терминальной вершиной дерева и не помеченной как элементарная (в начале работы алгоритма это исходная система). Если все терминальные вершины элементарны, то осуществляется переход на шаг 6;

2) проверка выбранной системы на элементарность с точки зрения целей декомпозиции. Если подсистема элементарна, то она помечается и осуществляется возврат на шаг 1;

3) выбор наиболее подходящего основания декомпозиции;

4) проведение декомпозиции;

5) переход на шаг 1;

6) конец.

Выбор наиболее подходящего основания декомпозиции на шаге 3 данного алгоритма — самая сложная и неоднозначная операция. Для ее упрощения ряд авторов предлагают типовые последовательности оснований декомпозиции.

Более гибкий подход описан в [42]. Полагается, что выбор очередного основания декомпозиции зависит от цепочки ранее примененных оснований. Таким образом, разработчику предлагается выбрать подходящее основание декомпозиции из подмножества стандартных оснований, формируемого с учетом информации о результате предыдущих актов декомпозиции. Для различных допустимых цепочек СОД разработаны подмножества оснований, которые могут быть применены на очередном шаге. Данный подход был реализован в инструментальной системе ДИПОДЕЦ (Диалоговая система Построения Деревьев Целей), автоматизирующей процесс формирования дерева целей [42].

## **2.4.2. Методы композиции**

**Метод морфологического анализа (МА)** разработан в 1930-е гг. швейцарским астрономом Ф. Цвикки для конструирования астрономических приборов. Суть данного метода заключается в следующем. В проектируемом объекте выбирают группу основных признаков, в качестве которых могут быть элементы конструкции, функции, свойства элементов. Для каждого признака предлагаются различные альтернативные варианты его реализации. Затем предложенные варианты *комбинируют* между собой. Из всего множества получаемых комбинаций выбираются допустимые, а затем наиболее эффективные варианты по некоторым критериям качества [45]. Последовательность проведения морфологического анализа включает три этапа.

**Этап 1. Постановка задачи.** Формулируются: проблемная ситуация, требования (ограничения) к проектируемому объекту, критерии оценки качества вариантов.

**Этап 2. Морфологический анализ.** Выделяются признаки и разрабатываются альтернативные варианты для каждого признака. В качестве отдельных альтернатив могут быть ком-

бинации уже предложенных вариантов. Результаты этапа оформляются в виде морфологической таблицы. Пример морфологической таблицы приведен в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Морфологическая таблица

Признаки	Альтернативные варианты			
A1	A11	A12	A13	A14
A2	A21	A22	A23	A24 = A21+ A22
A3	A31	A32	A33	
A4	A41	A42	A43 = A41 +A42	
A5	A51	A52	A53 = A51 +A52	

**Этап 3. Морфологический синтез.** Формируются комбинации по всем признакам и выбираются наилучшие комбинации.

Взяв из каждой строки морфологической таблицы по одному варианту, получим варианты решения:

$$P1 = A11, A21, A31, A41, A51;$$

$$P2 = A11, A21, A31, A41, A52;$$

$$P3 = A11, A21, A31, A41, A53;$$

$$P4 = A11, A21, A31, A42, A51;$$

$$P5 = A11, A21, A31, A42, A52;$$

...

Общее количество возможных решений

$$N = n_1 \times n_2 \times \dots \times n_m,$$

где  $n_i$  — число альтернативных вариантов по  $i$ -му признаку.

Для нашего примера  $N = 4 \times 4 \times 3 \times 3 \times 3 = 432$ .

Сокращение числа решений ведется за счет отбрасывания наихудших комбинаций альтернатив, а именно: несовместимых, наименее эффективных и труднореализуемых, не соответствующих требованиям.

Рассмотрим один из эвристических приемов сокращения комбинаций. Предлагается комбинировать альтернативы не по всем сразу признакам, а сначала рассмотреть комбинации альтернатив по двум признакам и отбросить наихудшие комбинации. Затем оставшиеся комбинации комбинируются с еще одним признаком и т. д.

*Пример.* Берем 2 признака — A1 и A2.

Таблица 2.11

	A21	A22	A23	A24
A11	×		×	
A12	×	×		×
A13		×	×	×
A14	×		×	×

В табл. 2.11 каждая ячейка (пересечение строк и столбцов) соответствует комбинации этих признаков. Наихудшие варианты вычеркнуты (помечены крестиком). Оставшиеся комбинации (A11+A22, A11+A24, A12+A23, A13+A21, A14+A22) далее комбинируются с вариантами еще одного признака — A3.

В табл. 2.12 отображены результаты выбора комбинаций на данном шаге. Процесс продолжается, пока не будут использованы все признаки.

Таблица 2.12

	A11+A22	A11+A24	A12+A23	A13+A21	A14+A22
A31	×		×	×	
A32	×				
A33		×			×

Оставшиеся комбинации образуют множество перспективных решений. Из этого множества в дальнейшем может быть выбрано оптимальное решение, например, с помощью методов выбора, рассмотренных в п. 2.3.2.

Аналогичный механизм комбинирования признаков структуризации используется в *методах порождающих грамматик*. В основе этих методов лежит процедура порождения функций сложной системы путем комбинирования небольшого числа «элементарных действий». Формируется некий язык, алфавит которого составляют «элементарные действия», а синтаксис — правила комбинирования этих действий. Рассмотрим некоторые из этих методов.

#### **Метод формирования структуры целей и функций [1].**

Метод представляет собой пошаговую процедуру формирования иерархии функций сложной системы, каждой из которых затем сопоставляется цель, связанная с соответствующей функцией. В качестве признаков структуризации используются стандартные основания декомпозиции, а в качестве альтернативных вариантов значений признаков — подсистемы (функ-

ции), порождаемые этими СОД. Множество значений одного признака называется классификатором. Таким образом, классификаторы, по сути, являются элементарными функциями.

Для автоматизации данного метода была разработана компьютерная программа АДПАЦФ (Автоматизированная Диалоговая Процедура Анализа Целей и Функций) [1]. На рис. 2.18 приведена схема работы данной программы [1].

Алгоритм работы программы следующий. Пользователь вводит признаки структуризации (основания декомпозиции) и их значения (классификаторы). Затем система автоматически формирует все возможные комбинации значений первых двух признаков и выдает их пользователю. Пользователь отбирает подходящие комбинации, которые затем комбинируются со значениями третьего признака и т. д., пока не будут перебраны все признаки.

На рис. 2.18 показано, что сначала программа комбинирует значения признака «цикл управления (ZU)» (ПР — прогнозирование, ПП — перспективное планирование, ТП — текущее планирование, ...) со значениями признака «объект управления (OU)» (ОП — основное производство, ВП — вспомогательное производство, МТС — материально-техническое снабжение, ...). Полученные комбинации (ПР\_ОП — прогнозирование основного производства, ПР\_ВП — прогнозирование вспомогательного производства, ..., ПП\_ОП — перспективное планирование основного производства, ...) выводятся на дисплей и человек отбирает подходящие варианты (на рис. 2.18 они помечены плюсом).

Затем система комбинирует выбранные сочетания со значениями признака «виды продукции (VP)» (АВТ — автомобили, З/Ч — запасные части, ТНП — товары народного потребления). Полученные комбинации (ПР\_ОП\_АВТ — прогнозирование основного производства автомобилей, ПР\_ОП\_З/Ч — прогнозирование основного производства запасных частей, ..., ПП\_ОП\_ТНП — перспективное планирование основного производства товаров народного потребления, ...) опять выдаются пользователю и т. д.

Процедура заканчивается, когда будут перебраны все признаки.

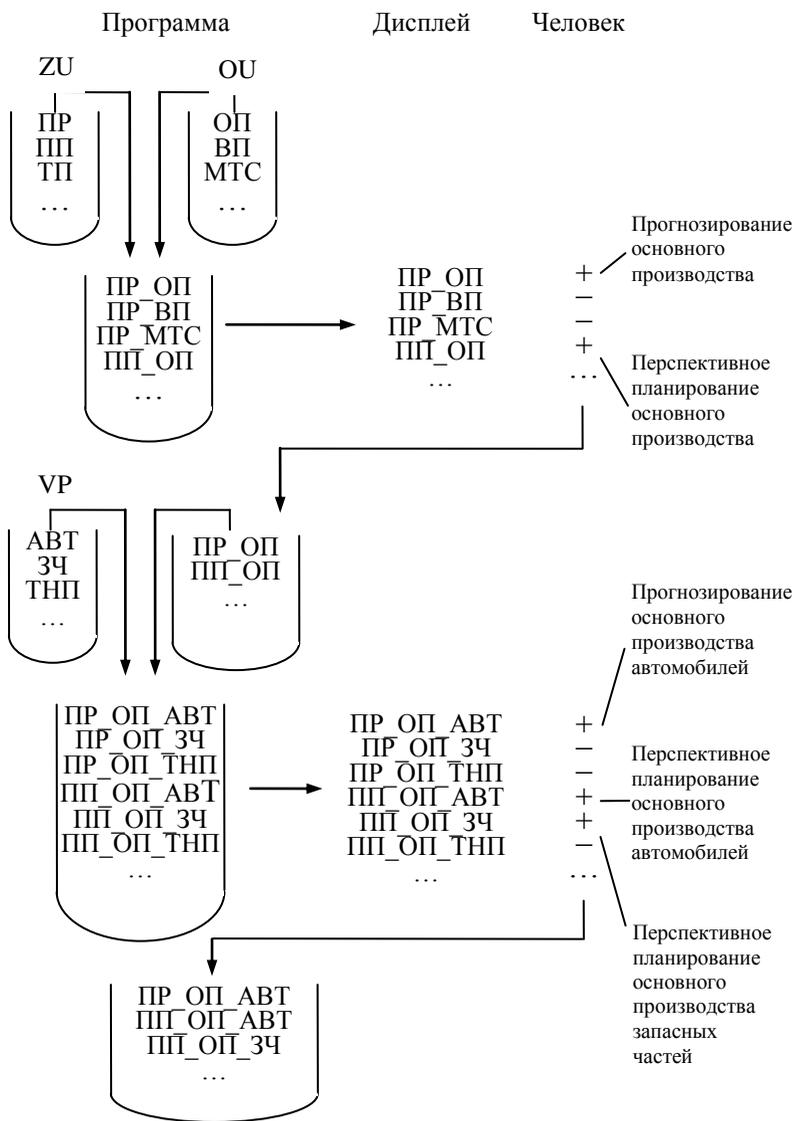


Рис. 2.18. Схема работы программы АДПАЦФ

**Метод структурно-функционального проектирования Казарновского** [33]. Данный метод позволяет порождать управляющие и управляемые функции производственной системы, а также структуры для их реализации путем комбинирования элементарных родов деятельности и структурных элементов деятельности.

Выделяется пять несводимых друг к другу родов деятельности:

$h$  — производство (выпуск продукции, оказание услуг);

$v$  — жизнеобеспечение (поддержание элементов системы);

$p$  — организация (адаптация к внешним воздействиям);

$c$  — управление;

$f$  — обновление (создание новой продукции, услуг, технологий).

Любой из этих родов деятельности можно принять за основной и, используя правило «присоединения слева», получить комбинацию с другим родом деятельности. Например:

$vh$  — жизнеобеспечение производства;

$ph$  — организация производства;

$ch$  — управление производством;

$fh$  — обновление производства;

К каждой из полученной комбинаций также можно присоединить любой род деятельности, например:

$pvh$  — организация жизнеобеспечения производства;

$pfh$  — организация обновления производства;

$cvh$  — управление жизнеобеспечением производства.

Подобным образом могут формироваться и более сложные комбинации:

$cpvh$  — управление организацией жизнеобеспечения производства;

$fcvh$  — развитие управления жизнеобеспечением производства;

$pcfh$  — организация управления обновлением производства.

Кроме того, для каждой функции можно выделить части (подфункции), связанные со стандартными структурными элементами:

$i$  — обеспечение предметами деятельности;

*k* — обеспечение инструментами;

*l* — обеспечение энергией;

*o* — вывод продукции;

*t* — технологическое преобразование.

Эти подфункции также можно комбинировать с любыми элементарными или составными функциями. Например:

*ich* — получение входных данных для управления производством;

*tcfh* — преобразование информации (принятие решения) в процессе управления обновлением производства;

*ocvh* — вывод (передача) решения по управлению жизнеобеспечением производства.

Интерпретация функций (определение их содержания) в значительной мере условна и зависит от соглашений. Например, в деятельности по созданию нового объекта можно условиться считать подфункцию *tf* — проектированием, *of* — внедрением [33].

**Метод последовательного синтеза информационных технологий управления** [46]. В основе данного метода лежит последовательное формирование множества задач управления, функций переработки информации и сопоставление каждой из функций информационных и программно-технических средств их реализации.

На рис. 2.19 представлена схема формирования информационных технологий управления.

Сначала формируются задачи управления путем комбинирования этапов жизненного цикла производства продукта с этапами жизненного цикла управления (см. рис. 2.19). Обозначим множество фаз жизненного цикла получения конечных продуктов через  $P = \{p_i\}$ :  $\{p_1$  — выявление потребности,  $p_2$  — снабжение,  $p_3$  — производство, ... $\}$ , а множество этапов управления через  $Z = \{z_j\}$ :  $\{z_1$  — прогнозирование,  $z_2$  — планирование,  $z_3$  — учет (контроль), ... $\}$ .

Последовательно сопоставляя элементы множества  $P$  и  $Z$ , сформируем множество задач управления по выпуску продуктов [46]:

$$PZ = \{p_1z_1, p_1z_2, \dots, p_iz_j, \dots, p_nz_m\}.$$

Примеры задач управления:

$p_1z_1$  — прогнозирование потребности в продукте;

$p_2z_2$  — планирование снабжения;

$p_3z_2$  — планирование производства;

$p_2z_3$  — контроль снабжения (учет складских запасов);

$p_3z_3$  — контроль производства.



Рис. 2.19. Схема формирования технологий управления

Некоторые комбинации могут быть отброшены как не-  
существенные.

Затем определяется множество функций управления  
комбинированием сгенерированных задач с этапами ЖЦ пе-  
реработки информации (см. рис. 2.19). Обозначим фазы пе-  
реработки информации через  $X = \{x_k\}$ :  $\{x_1$  — регистрация  
информации,  $x_2$  — сбор информации,  $x_3$  — передача инфор-  
мации,  $x_4$  — обработка информации, ... $\}$ .

Последовательно сопоставляя элементы множеств  $PZ$  и  $X$ ,  
определим множество функций переработки информации при  
реализации каждой задачи управления [46]:

$$PZX = \{p_1z_1x_1, p_1z_1x_2, \dots, p_iz_jx_k, \dots, p_nz_mx_l\}.$$

Примеры функций управления:

$p_1z_1x_2$  — сбор исходной информации для прогнозирова-  
ния потребности в продукте;

$p_3z_2x_2$  — сбор исходной информации для планирования  
производства;

$p_2z_2x_3$  — передача информации, используемой для пла-  
нирования снабжения;

$p_3z_2x_4$  — обработка информации в процессе планирова-  
ния производства;

$p_2z_3x_4$  — обработка информации в процессе учета склад-  
ских запасов.

Предложенная схема формирования функций управления  
позволяет перейти к проектированию инструментальных, ма-  
тематических, технических и информационно-программных  
методов и средств по реализации необходимых этапов жиз-  
ненного цикла переработки информации при решении функ-  
циональных задач управления на каждой фазе ЖЦ производ-  
ства материальных конечных продуктов.

В дальнейшем, основываясь на результатах проектиро-  
вания, можно перейти собственно к формированию техноло-  
гии как определенной последовательности управленческих  
действий по получению информационных конечных продук-  
тов системы [46].

## 2.5. Модели иерархических многоуровневых систем

Многоуровневые иерархические структуры сложных систем, имея одинаковую древовидную форму, могут существенно отличаться по содержанию, по типу отношений между подсистемами различных уровней, по принципам формирования иерархии. В [47] описаны три типа многоуровневых иерархий, получивших название «страты», «слои» и «эшелоны». Рассмотрим принципы, лежащие в основе каждого из этих типов иерархий, а также примеры их применения.

**Страты.** Этот вид иерархии позволяет описывать систему на разных уровнях абстрагирования, т. е. детальности описания (рис. 2.20).

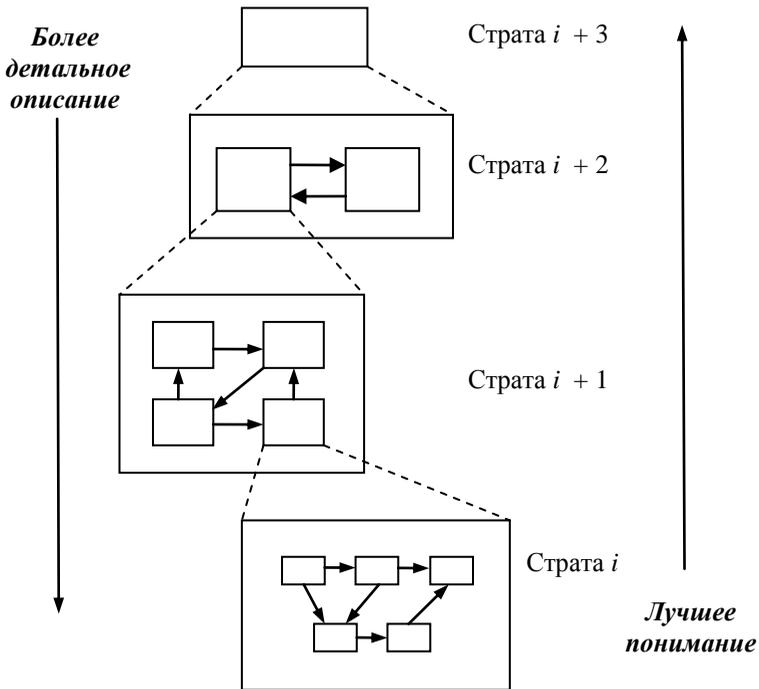


Рис. 2.20. Взаимосвязь между стратами

На каждой страте имеется свой собственный набор терминов, концепций и принципов, с помощью которых описывается поведение системы. Рассмотрим несколько примеров стратифицированных описаний.

Работу ЭВМ можно описать на двух уровнях: уровне физических операций (на языке физических законов управления работой электронных элементов) и уровне математических и логических операций (описание работы программ). Каждая из этих страт представляет модель одной и той же системы, но с различных точек зрения: то, что является объектом рассмотрения на вышестоящей страте (математические и логические операции), более подробно раскрывается на нижестоящей страте (в виде набора физических операций).

Модель хозяйственной организации можно представить в виде трех страт:

- 1) нижней, описывающей технологический процесс производства продукции;
- 2) средней, описывающей процессы управления по отдельным направлениям (сбыт, снабжение и т. д.);
- 3) верхней, описывающей экономику производства в целом.

Структуру компьютерной системы понимания естественного языка можно представить в виде четырех страт (рис. 2.21) [47]:



Рис. 2.21. Структура системы понимания естественного языка

- 1) морфологической, описывающей процедуры анализа слов (выделения основ, аффиксов) и определения грамматических признаков;
- 2) синтаксической, на которой представлены процедуры разбора предложений (поиска связей между словами и т. д.);
- 3) семантической, отражающей процедуры интерпретации на формальный язык;
- 4) ситуационной, представляющей синтез формального описания ситуации.

В стратифицированных иерархиях отношения между подсистемами смежных уровней относятся к типу «целое—часть». На верхних уровнях система представлена укрупненно, на нижних — в виде набора элементов, т. е. иерархия формируется путем последовательной декомпозиции. Чем ниже мы спускаемся по иерархии, тем более детальным становится раскрытие системы, чем выше мы поднимаемся, тем яснее становится смысл и значение всей системы [47].

**Слои.** Данный тип иерархии используется для структуризации процессов принятия сложных решений. Сложную проблему, подлежащую решению, разбивают на множество последовательно расположенных более простых подпроблем, решение которых позволяет решить и исходную проблему. «Решение любой проблемы из этой последовательности определяет и фиксирует какие-то параметры в следующей проблеме, так что последняя становится полностью определенной и можно приступить к ее решению. Решение первоначальной проблемы достигнуто, как только решены все подпроблемы» [47].

Рассмотрим простой пример. Личная цель человека формулируется, как правило, очень расплывчато. Например она заключается в достижении счастья или некоторого уровня удовлетворения. Ее можно разбить на две более конкретные подцели — достижение материального благополучия и духовное развитие. В свою очередь, для достижения первой из этих подцелей могут быть предложены подцели «увеличение доходов» и «снижение расходов». Цель «увеличение доходов» может быть продекомпозирована на подцели «добиться повышения в должности» и «найти дополнительный заработок» и т. д. Подцели нижнего уровня могут рассматриваться как элементарные, если очевиден способ их решения.

Примером многослойной структуры является структура процесса разработки программы развития сложной социально-экономической системы (например, комплексной программы развития региона, программы энергосбережения предприятия, инвестиционной программы и т. д.). Можно выделить следующие уровни (рис. 2.22): слой целей по основным направлениям деятельности, слой стратегий (задач), определяющих курсы



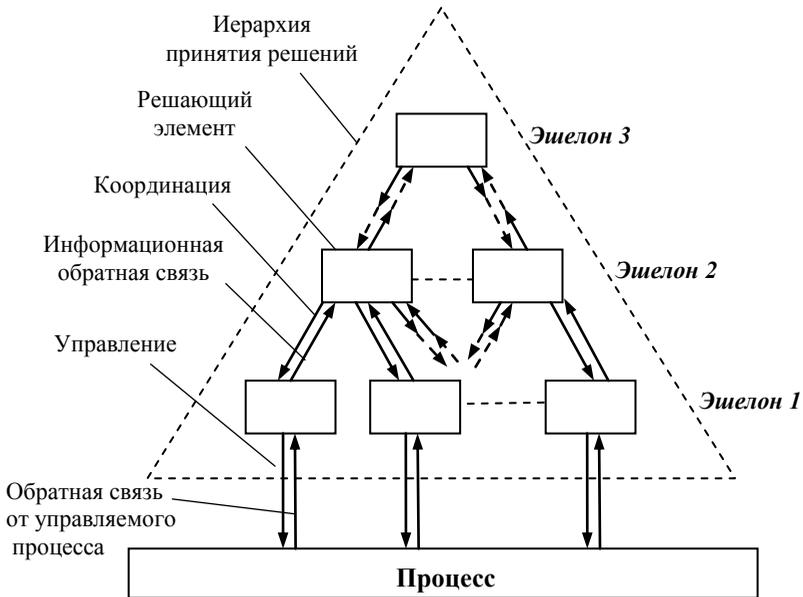


Рис. 2.23. Многоэшелонная система

Наиболее характерный пример систем подобного типа — организационная система управления предприятием. Во главе находится первый руководитель (директор), координирующий принятие решений менеджерами среднего звена, отвечающими за различные сферы управления (снабжение, сбыт, производство, финансы и т. д.). В свою очередь, менеджеры среднего звена координируют деятельность менеджеров нижнего звена, управляющих группами исполнителей (бригадами, участками, лабораториями и др.). Исполнители непосредственно реализуют технологические процессы предприятия.

Отличительной особенностью многоуровневых эшелонных систем является то, что элементы верхнего уровня хотя и обуславливают целенаправленную деятельность элементов нижних уровней, но не полностью управляют ею. Принимающим решения элементам предоставлена некоторая свобода в выборе их собственных решений, т. е. происходит распределение усилий по принятию решений между элементами различных уровней.

Система может иметь одну общую цель, однако у принимающих решения элементов могут быть и свои собственные цели. Эти цели могут конфликтовать друг с другом. В этом случае конфликт разрешается путем вмешательства элемента более высокого уровня. Согласование противоречивых целей является основной проблемой в управлении организационными системами.

Предложенными в [47] тремя типами многоуровневых иерархических систем не исчерпывается все их многообразие. Во-первых, часто встречаются смешанные иерархии, в которых сочетаются рассмотренные выше типы структур. Кроме того, существует, по крайней мере, еще один тип иерархических структур, не сводимый к стратам, слоям и эшелонам, который мы условно назовем «классы».

**Классы.** Данный вид иерархии используется для классификации понятий, относящихся к некоторой предметной области. Элементами иерархии являются классы понятий, связанные отношениями «общее – частное». На верхнем уровне располагается наиболее абстрактное, общее по отношению к другим классам понятие. Класс понятий, лежащий ниже по иерархии, включает в себя декомпозируемый класс (все его свойства), добавляя к нему некоторые дополнительные свойства, т. е. уточняя его, конкретизируя. Перенос свойств классов понятий на подклассы называют *наследованием* по аналогии наследованием ребенком черт своих родителей.

Для иллюстрации принципа наследования можно привести пример декомпозиции общего класса «Автомобиль» (рис. 2.24).

Данный класс определяется как некоторая абстракция всех реально существующих автомобилей. При этом свойствами класса «Автомобиль» могут быть такие общие свойства, как наличие двигателя, трансмиссии, колес, рулевого управления. Если в качестве производного класса рассмотреть класс «Легковой автомобиль», то все выделенные выше свойства будут присущи и этому более узкому классу. Можно сказать, что класс «Легковой автомобиль» наследует свойства родительского класса «Автомобиль».

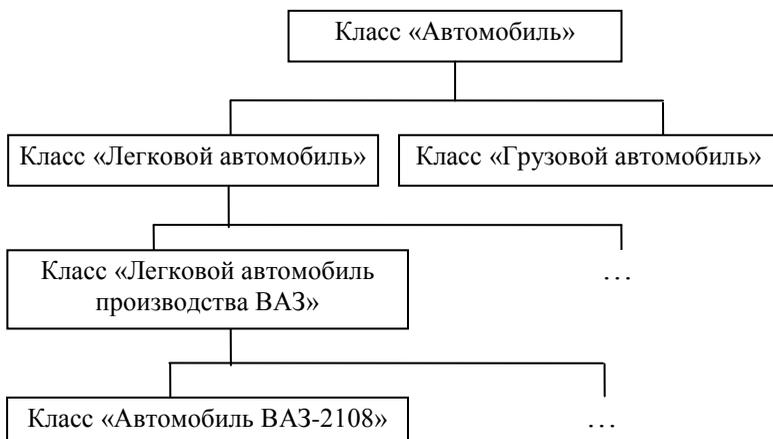


Рис. 2.24. Иерархия классов для примера «Автомобиль»

Однако, кроме перечисленных свойств, класс-потомок будет содержать дополнительные свойства, например такое, как наличие салона с количеством посадочных мест 2–5. В свою очередь, класс «Легковой автомобиль» способен порождать другие подклассы, например, соответствующие моделям конкретных фирм-производителей. Так, это может быть класс «Легковой автомобиль производства ВАЗ». Данный класс наследует свойства всех легковых автомобилей и добавляет свойства, отличающие автомобили Волжского автомобильного завода. Производным от этого класса может быть конкретная модель автомобиля, например, ВАЗ-21083. Наконец, подклассами класса «Автомобиль ВАЗ-2108» могут быть конкретные автомобили этой марки, отличающиеся уникальными заводскими номерами. В последнем случае класс будет состоять из единственного объекта или экземпляра [48].

Иерархии классов широко используются во фреймовой и объектно-ориентированной модели представления знаний, а также в объектно-ориентированном программировании.

## Контрольные вопросы и задания

1. Что такое модель? В чем состоит принцип моделирования?
2. Каковы основные свойства моделей?
3. Охарактеризуйте классы моделей и языки описания моделей.
4. Что отражается в модели «черного ящика»? Охарактеризуйте два подхода к построению моделей этого вида.
5. Что представляет собой модель состава системы? Почему необходимо сочетать анализ и синтез при ее построении?
6. Что отражается в модели структуры? Какие структуры получили наибольшее распространение?
7. Для каждой из основных типов шкал (наименований, порядка, интервалов, отношений, абсолютной) укажите, для чего она применяется, каковы ее основные свойства, какие операции допустимы над шкальными значениями.
8. Какие виды измерений вы знаете?
9. В чем состоит метод ранжирования? Как обрабатываются результаты группового ранжирования?
10. Опишите метод парных сравнений, а также процедуру построения обобщенной матрицы парных сравнений.
11. В чем состоит метод непосредственной оценки? Как обрабатываются данные групповой экспертизы?
12. В чем заключается метод последовательного сравнения (Черчмена – Акоффа)?
13. Какие способы нормирования показателей вы знаете?
14. Опишите методы аддитивной, мультипликативной свертки и метод идеальной точки.
15. Какие виды неопределенности существуют?
16. В чем состоят методы оценки вариантов управления в условиях риска по различным критериям (среднего выигрыша, Лапласа, Вальда, максимакса, Гурвица, Сэвиджа)?
17. Что такое нечеткое множество, лингвистическая переменная? Как осуществляется нечеткий логический вывод?
18. Какие стандартные основания декомпозиции вы знаете? Каковы принципы их формирования и применения?
19. В чем состоит метод морфологического анализа?
20. Какова суть методов порождающих грамматик?
21. В чем отличия различных видов иерархических многоуровневых структур, таких как страты, слои, эшелоны, классы?

## 3. МЕТОДОЛОГИИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

### 3.1. Базовая методология системного анализа

#### 3.1.1. Предмет системного анализа

Системный анализ, как часть общей науки о системах и системности, в отличие от таких ее направлений, как «общая теория систем» или «системная философия», имеет четко выраженную прикладную направленность. Он «заостряет внимание на проблемах, возникающих в промышленности и обществе, которые можно исследовать посредством приложений теории систем» [27].

Системный анализ применяется для разрешения *трудно формализуемых* и *слабо структурированных проблем*. При-  
мерами таких сложных проблем являются:

- низкая эффективность деятельности организационно-технологических объектов (предприятий, компаний, промышленных объединений);
- недостаточный уровень развития региона (его социальной сферы, транспортной системы, энергетики и т. д.);
- наличие угроз безопасности (энергетической, общественной);
- недостаточная отдача от инновационной деятельности.

Основная цель системного анализа — исследование «проблемосодержащей» системы, т. е. системы, в которой возникла проблема, анализ причин ее возникновения и синтез системы мер для ликвидации проблемы. Методы и модели системного анализа в первую очередь используются на ранних этапах проектирования или развития сложных систем, к каковым относятся этапы концептуализации, которые называют также «анализ проблем», «предпроектное обследование», «эскизное проектирование», «этап научно-исследовательских работ» и т. д. К числу работ, выполняемых на этих этапах, относятся: выявление проблем (узких мест) в существующих системах,

выявление целей, направлений проектирования или совершенствования систем, определение перспективных вариантов на разных уровнях, формирование комплексов задач управления и т. д. Эти работы являются слабо формализуемыми, «творческими» и одновременно очень важными, поскольку они формируют основу, «каркас» создаваемой проблеморазрешающей системы, основные направления ее синтеза, которые в дальнейшем прорабатываются, уточняются, детализируются. Решения, принимаемые на ранних этапах, в первую очередь определяют качество конечного результата.

Таким образом, *с практической стороны* системный анализ определяется как «система методов исследования или проектирования сложных систем, поиска, планирования и реализации изменений, предназначенных для ликвидации проблем» [2].

Инструментарием системного анализа являются, прежде всего, системные представления, модели и методы, предлагаемые различными направлениями «науки о системах». Тем не менее, системный анализ не ограничивается только применением методического аппарата дисциплин, занимающихся системными исследованиями. Он привлекает широкий спектр средств различных наук, а также неформальные эвристические методы, здравый смысл и опыт практической деятельности. Как пишут Ф.И. Перегудов и Ф.П. Тарасенко в [2] «*с методической стороны* системный анализ отличается междисциплинарным и наддисциплинарным характером и вовлечением в работу как неформальных, эвристических, экспертных методов, так и эмпирических, экспериментальных методов, а также, при возможности и необходимости, — строгих формальных математических методов».

Использование неформальных знаний во многом объясняется самой природой объекта рассмотрения системного анализа — сложных, неформализованных, неструктурированных проблем. В процессе сведения неформальной задачи к формальной в условиях неполноты информации, ограниченности времени и ресурсов большую и очень важную роль играют этапы, на которых системный аналитик и привлекаемые им эксперты должны выполнить творческую работу.

Вышесказанное не означает, что системный анализ есть просто набор советов и рекомендаций, дополненный методами любых предметных наук, имеющих отношение к рассматриваемой проблеме. Все используемые знания объединены в систему, что и позволяет называть системный анализ *методологией*.

«Методология — учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности. Методологическое знание выступает в форме как предписаний и норм, в которых фиксируются содержание и последовательность определённых видов деятельности (нормативная методология), так и описаний фактически выполненной деятельности (дескриптивная методология). В обоих случаях основной функцией этого знания является внутренняя организация и регулирование процесса познания или практического преобразования какого-то объекта» [21].

*С методологической стороны* системный анализ определяется как *прикладная диалектика* [2]. Диалектический метод познания рассматривает действительность как изменчивую, развивающуюся, совмещающую в себе противоположности. Дуализм самого понятия системы, сочетающего «целостность» и «делимость», определяет необходимость применения редукционизма и холизма, аналитического и синтетического подходов. Динамизм систем, которые могут изменяться как в направлении нарастания энтропии, так и в сторону усложнения структуры, требует выявления и прогнозирования тенденций в их функционировании, а также корректировки принимаемых решений с учетом происходящих изменений.

Основными принципами системного анализа являются комплексность и системность. Принцип комплексности предполагает полноту и всесторонность рассмотрения объекта анализа. Необходимо исследовать все аспекты и все компоненты системы, причем с различных точек зрения, в различные моменты времени, в различных условиях. Однако даже всестороннее и подробное рассмотрение всех частей системы не дает полного понимания сложившейся ситуации, так как разложение системы нарушает ее свойство эмерджентности.

Поэтому принцип комплексности системного анализа дополняется *принципом системности*, который заключается в том, что необходимо рассматривать все элементы системы, а также различные состояния системы и ее элементов не изолированно, а во взаимосвязи и взаимообусловленности. Только так можно понять, как система работает, а также и почему и зачем она это делает [2].

### 3.1.2. Этапы системного анализа

Объектом рассмотрения системного анализа является процесс поиска средств ликвидации некоторой сложной многофакторной проблемы. Декомпозиция по жизненному циклу данного процесса позволяет выделить этапы, так называемой, системной последовательности принятия решений, составляющей основу регламента проведения системного анализа. Имеется множество различных вариантов системной последовательности, в частности регламенты, предложенные С.Л. Оптнером [20], С. Янгом [49], Э. Квейдом [50], Ю.И. Черняком [19], Л. Планкеттом и Г. Хейлом [51], Н.П. Федоренко [52], С.П. Никаноровым [53], коллективом томских ученых под руководством Ф.И. Перегудова [2, 16].

Анализ существующих регламентов показывает, что можно выделить пять укрупненных этапов, представленных практически во всех вариантах системной последовательности в том или ином виде (рис. 3.1):

1) **анализ ситуации** — выявление проблемы, определение актуальности проблемы, анализ проблемы, выявление изменений, выявление причин);

2) **постановка целей** — формулирование целей, формирование критериев и ограничений;

3) **выработка решений** — разработка альтернатив, оценка и выбор альтернатив, согласование решений;

4) **реализация решений** — утверждение решений, подготовка к внедрению, управление процессом реализации;

5) **оценивание результатов** — оценка реализации и ее последствий, проверка эффективности.

Последний этап замыкает цикл и возвращает процесс к первому этапу, но для следующей итерации.

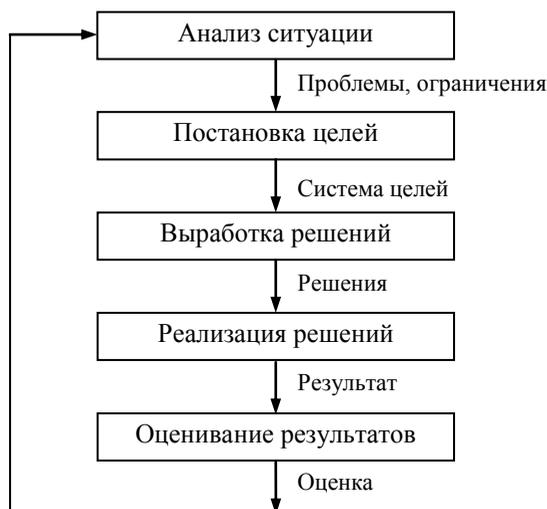


Рис. 3.1. Основные этапы системного анализа

В табл. 3.1 приведены для примера три варианта системной последовательности — по С.Л. Оптнеру, С.П. Никанорову и С. Янгу — с распределением работ по укрупненным этапам.

Различные варианты регламента предлагают различную детализацию основных этапов. Некоторые авторы отделяют анализ собственно проблемы от анализа системы, в которой она возникла. Причем анализ системы иногда относят не к этапу анализа ситуации, а к этапу выработки решений. В системную последовательность добавляются также подэтапы, связанные с созданием проектирующей системы, которая занимается ликвидацией проблемы. Ряд авторов выделяют подэтапы для анализа (синтеза) отдельных составляющих сложной системы. Например, в регламенте, предложенном коллективом томских ученых, в этап выработки решения включены последовательно подэтапы анализа функций системы, ее структуры

и ресурсов (внешних условий), необходимых для разрешения проблемы, а в этап реализации – аналогичные подэтапы, но в обратном порядке [16] (рис. 3.2).

Таблица 3.1

Различные варианты системной последовательности

Укрупненные этапы	Варианты системной последовательности		
	По С.Л. Оптнеру	По С.П. Никанорову	По С. Янгу
Анализ ситуации	1. Идентификация симптомов 2. Определение актуальности проблемы	1. Обнаружение проблемы 2. Оценка актуальности проблемы 3. Анализ ограничений проблемы	1. Определение цели организации 2. Выявление проблемы 3. Диагноз
Постановка целей	3. Определение целей	4. Определение критериев	(п.1)
Выработка решений	4. Определение структуры системы 5. Определение возможностей 6. Нахождение альтернатив 7. Оценка альтернатив 8. Выработка решения	5. Анализ существующей системы 6. Поиск возможностей (альтернатив) 7. Выбор альтернативы	4. Поиск решения 5. Оценка и выбор альтернативы 6. Согласование решения
Реализация решений	9. Признание решения 10. Запуск процесса решения 11. Управление процессом реализации решения	8. Обеспечение признания 9. Принятие решения (признание формальной ответственности) 10. Реализация решения	7. Утверждение решения 8. Подготовка к вводу в действие 9. Управление применением решения
Оценивание результатов	12. Оценка реализации и ее последствий	11. Определение результатов решения	10. Проверка эффективности

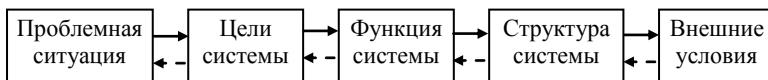


Рис. 3.2. Последовательность проектирования и реализации системы: → — анализ; ← - — реализация

При анализе многоуровневых систем встает вопрос о выборе стратегии иерархического принятия решения. Различают следующие основные стратегии: «сверху – вниз», «снизу – вверх», «смешанная стратегия». Выбор наиболее предпочтительной стратегии решается в разных регламентах по-разному.

Довольно часто встречается перестановка этапов анализа ситуации и постановки целей, так как нет однозначного понимания, что чему должно предшествовать. Вопрос о том, что первично — проблема или цель, подобен вопросу о курице и яйце. С одной стороны, цель ставится при наличии проблемы (для ее ликвидации) с учетом сложившейся ситуации, иначе цель будет оторвана от реальности и слишком расплывчата. С другой стороны, проблема – это расхождение между желаемым (целью) и реальным состоянием, т. е. для выявления проблемы нужна цель. Как правило, эта дилемма решается следующим образом. Системный аналитик первоначально имеет некое, возможно расплывчатое, приблизительное представление о проблеме и о цели. В ходе анализа ситуации появляется дополнительная информация о проблеме, позволяющая ставить конкретные и достижимые цели. Причем после постановки целей может быть уточнена и проблема. Может даже понадобиться дополнительный анализ ситуации.

Необходимо отметить тенденцию к уменьшению жесткости регламента. Так, в [1] предлагается по окончании любого этапа (подэтапа) осуществлять оценку результата его выполнения, по итогам которой может быть принято решение о повторном выполнении этапа с целью корректировки полученных решений или о возврате на предыдущие этапы. Может быть выполнено несколько итераций для каждого из этапов. Такая нелинейность является неизбежным следствием сложности процесса: «Алгоритм решения конкретной проблемы

не будет линейным, будет содержать циклы, возвраты. По сути, это другое представление метода проб и ошибок: решение проблемы есть преодоление сложности» [54].

Несмотря на все различия в существующих регламентах системного анализа, назначение и сущность основных этапов, а также основные принципы их выполнения остаются неизменными. Рассмотрим подробнее содержание основных этапов системной последовательности принятия решений.

**Анализ ситуации.** Цель данного этапа — выявление, формулирование проблемы. Поскольку проблемой называется разрыв между желаемым и действительным состояниями, то для ее выявления необходимо описать существующую ситуацию и сравнить ее с «идеальной», т. е. с требованиями, стандартами, целями. Требования могут выдвигаться различными заинтересованными сторонами — участниками проблемы. Их называют также акторами, стейкхолдерами (от англ. *stakeholders* — «держатели ставок»). К ним могут относиться субъекты, входящие как в проблемосодержащую систему, так и во внешнюю среду. Так, при анализе положения дел в производственной системе необходимо проанализировать соответствие процессов требованиям со стороны клиентов, поставщиков, партнеров, вышестоящих организаций.

Для выявления проблем полезно оценить уровень развития исследуемой системы в сравнении с аналогичными системами. Например, при оценке уровня компании осуществляется сравнение показателей ее деятельности с показателями других фирм-лидеров, имеющих аналогичные процессы. Метод улучшения текущей деятельности организации посредством изучения того, как другие выполняют похожие операции, называется бенчмаркинг (*benchmarking*). В его основе лежит сравнение ключевых бизнес-процессов компании с лучшими эквивалентными процессами. Основываясь на сравнительном анализе, определяют несколько организаций, имеющих наилучшие показатели. После чего процессы выбранных организаций изучаются для того, чтобы определить, почему они функционируют лучше [55].

Важно проанализировать не только достигнутое текущее состояние исследуемой системы, но и динамику изменения ее

состояний, установить тенденции, закономерности в функционировании системы на основе обобщения прошлого опыта. Исходной информацией для ретроспективного анализа являются данные об изменении основных показателей деятельности системы за определенный предшествующий период (по годам, кварталам, месяцам и т. д.). Для наглядности подобную информацию можно представить в виде графиков. Тип графика (полученной аппроксимирующей кривой или прямой линии) наглядно характеризует процесс: его устойчивость, тенденцию, наличие резких колебаний. Полезно на основе выявленных тенденций спрогнозировать будущее развитие ситуации при условии, если не будут предприняты действия по ее изменению.

Еще один вид анализа — причинный (каузальный) — используется для выявления причин возникновения текущей ситуации. В процессе анализа могут быть построены причинно-следственные цепочки или обратные сценарии, показывающие, какие условия могли привести к возникновению проблемы. Для выявления закономерностей развития ситуации зачастую используются статистические методы, позволяющие определить наличие причинных связей между показателями, степень влияния показателей друг на друга и т. д. Этот вид анализа называется факторным.

Анализ проблемосодержащей системы может осуществляться на разных уровнях абстрагирования. Декомпозиция системы на составляющие и анализ отдельных подсистем (сравнительный, ретроспективный, причинный) помогает локализовать проблему. При этом разложение системы может быть основано на выделении не только составных частей, но и различных аспектов, точек зрения на систему. Так, для производственных систем могут быть выделены: экономический аспект, технологический, организационный. Описание того или иного аспекта осуществляется на соответствующем языке. Например, экономический аспект отражается с помощью языка экономики, технологический — с помощью профессионального языка технолога, организационный — с помощью понятий теории менеджмента. Таким образом, одна и та же проблемосодержащая система может быть представлена

множеством моделей на различных профессиональных языках, составляющих так называемый конфигуратор. *Конфигуратором* называется «набор различных языков описания изучаемой системы, достаточный для проведения системного анализа данной проблемы» [2]. Он определяется природой проблемосодержащей и проблеморазрешающей систем.

**Постановка целей.** На данном этапе определяется, к чему должно привести устранение проблемы. Если на этапе анализа определяется, что именно не устраивает в текущей ситуации, то здесь выявляется представление, что должно быть достигнуто.

При формировании целей необходимо учитывать **закономерности целеобразования**. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Расплывчатость, изменчивость целей.* Цели никогда не удастся сформулировать сразу окончательно ясно. Дело в том, что цель – это описание желаемого будущего, и поэтому в нем легко допустить неточности, а то и ошибиться [2]. Как правило, первоначально цель формулируется очень расплывчато. По мере исследования проблемосодержащей системы, накопления информации цели постепенно уточняются, детализируются. Нужно отметить, что зачастую стремление сразу сформулировать цель предельно четко несет в себе ту опасность, что она подменяется средствами, т. е. в формулировке заранее фиксируется способ достижения цели, что значительно сужает пространство поиска решений, фиксирует только один путь решения проблемы. Например, цель «разработать информационную систему проверки пользовательского кредита для сокращения сроков обслуживания клиентов» содержит предположение, что темпы обслуживания могут быть увеличены только за счет автоматизации операции проверки. На самом деле, возможно, проверка вообще не нужна. Изначально цель должна определять только конечный результат, а не способ его достижения.

Не только недостаток информации является причиной неизбежности корректировки целей с течением времени, но и изменение условий, а также требований — как со стороны элементов внешней среды, так и со стороны элементов самой системы. Некоторые цели, запланированные в начале, могут

оказаться нереалистичными, так как для их достижения недостаточно времени или имеющихся ресурсов.

Существует противоречие между сложностью точного описания целей и необходимостью оценки степени достижения целей при использовании того или иного решения. Для конкретизации целей используют критерии — измеримые индикаторы. Например, цель «повысить качество продукции» может быть конкретизирована с помощью критериев «срок годности», «ремонтпригодность», «безопасность» и др. Критерии позволяют сравнивать альтернативные варианты достижения целей, упорядочивать их по степени предпочтительности. После того как решение уже будет выбрано, плановые значения критериев могут использоваться для контроля хода выполнения решения и оценки того, достигнута ли цель.

2. *Множественность целей.* Как правило, одна единственная цель не может дать представление о желаемом будущем. Даже если и формулируется глобальная цель, она должна быть конкретизирована через подчиненные цели. Например, цель «повысить эффективность деятельности компании» слишком абстрактна, чтобы быть отправной точкой для поиска способов ее достижения. Желательно сформулировать цели, раскрывающие понятие эффективности.

Причиной множественности целей зачастую является множественность проблем, составляющих проблематику. Необходимость решения совокупности разнообразных проблем неизбежно приводит к постановке множества целей. Так, если при анализе проблемы низкого уровня развития энергосбережения было выявлено, что причинами являются: недостаточная информированность компаний об энергосберегающих технологиях, отсутствие нормативно-правовой базы и низкая заинтересованность в экономии энергии, то и цели должны определять желаемое состояние по соответствующим направлениям.

Другая причина кроется в разнообразии интересов заинтересованных сторон, связанных с решаемой проблемой. Необходимо учитывать требования со стороны субъектов внешней среды, связанных с системой, а также со стороны субъектов, входящих в систему. Например, при создании программы

развития фирмы необходимо учитывать цели таких групп людей, как акционеры, работники по найму, покупатели, поставщики, а также интересы вышестоящих и подведомственных организаций. Игнорирование целей и требований заинтересованных сторон может привести к тому, что они будут препятствовать реализации принятых решений.

3. *Взаимовлияние целей.* Множественность целей приводит к необходимости учитывать их взаимное влияние. Взаимоотношения между целями могут быть различными.

Во-первых, одни цели могут являться подцелями, т. е. средствами решения других, более общих целей. Выявление и формулировка подчиненных целей — весьма эффективный способ поиска средств достижения исходной цели. Этот подход лежит в основе методологий построения деревьев целей, которые будут рассмотрены ниже (п. 3.3).

Во-вторых, цели могут как противоречить друг другу, так и, наоборот, усиливать друг друга, обеспечивать эффект эмерджентности. Так, цель «улучшить условия труда» затрудняет достижение цели «увеличить прибыль», так как ведет к увеличению издержек, а цель «увеличить оборот», наоборот, способствует. В случае конфликтности целей необходимо их согласование, нахождение компромисса, установление приоритетов.

**Выработка решений.** Данный этап является наиболее сложным и «творческим». Необходимо сгенерировать возможные альтернативные варианты достижения целей, выполнить сравнение и оценку вариантов и выбрать оптимальный вариант, обеспечивающий наилучшие значения критериев и удовлетворяющий ограничениям.

Наибольшую трудность представляет *генерирование альтернатив*. Используются различные подходы. Это может быть логический поиск, в частности выстраивание причинно-следственных цепочек, связывающих решения с целями. Данный подход используется в методологиях деревьев целей, анализа иерархий и др.

Для формирования вариантов могут использоваться методы композиции, например, метод морфологического анализа. При этом в качестве комбинируемых признаков выби-

раются атрибуты системы, однозначно определяющие способ ее реализации. Например, если речь идет о некотором технологическом процессе, то это могут быть параметры, характеризующие технологию, используемые технические средства и материалы, исполнителей, способы управления, время и место выполнения процесса и т. д. Комбинируя различные значения параметров, можно получить множество вариантов организации процесса. Используются также методы активизации мышления, позволяющие экспертам формировать новые неожиданные решения, которые невозможно сгенерировать комбинаторными или логическими методами. Ряд подобных методов рассмотрен ниже (см. п. 3.1.3). Детальная проработка каждого из сформированных альтернативных вариантов может осуществляться с помощью методов той предметной области, к которой принадлежит проблемосодержащая система.

В случае сложных систем синтез, как и анализ, может осуществляться на разных уровнях абстрагирования, т. е. для каждого варианта реализации системы может быть построена иерархическая модель. Варианты могут быть описаны на разных языках конфигуратора. Наибольшую сложность при этом составляет согласование вариантов, описанных на различных языках.

Для *оценки альтернатив и выбора оптимальных вариантов* существует множество методов — от формальных (например, методов математического программирования, методов исследования операций) до экспертных (некоторые из них были описаны в разделе 2 — см. п. 2.3). В случае, когда выбор осуществляется не одним лицом, а группой лиц, возникает проблема согласования индивидуальных предпочтений. Для ее решения разработаны различные методы группового выбора — принцип де Кондорсе, принцип Курно, принцип Парето и др. [2, 38, 54].

При поиске решений для сложных систем возникают вопросы, связанные с *иерархическим принятием решений*. Необходимо увязать решения, принятые для отдельных подсистем, друг с другом и с целями системы в целом. Локальные оптимальные решения не всегда обеспечивают достижение

глобального оптимума. Ситуация еще более усложняется, если объектом является социальная, организационная система, так как у отдельных людей и групп, входящих в систему, имеются собственные цели, которые могут противоречить общим целям системы. При выработке решений приходится согласовывать локальные и глобальные цели.

Существуют различные подходы к решению задач координации. Используют три основных стратегии: восходящую, нисходящую и смешанную.

*Восходящая* стратегия предполагает прохождение иерархии подсистем снизу вверх. Для каждой подсистемы нижнего уровня выбирается оптимальный вариант. Затем происходит согласование выбранных вариантов и их агрегация в варианты вышестоящих подсистем. Полученные агрегированные варианты также обобщаются до тех пор, пока не будет сформирован вариант всей системы в целом. Недостаток данной стратегии состоит в том, что при выборе вариантов учитываются только локальные критерии эффективности и результирующее решение может быть слишком далеко от глобального оптимума.

При использовании *нисходящей* стратегии сначала выбирается оптимальный обобщенный вариант всей системы в целом. Затем осуществляется выбор оптимальных вариантов для подсистем второго уровня с учетом выбранного варианта первого уровня. Аналогичным образом выбираются варианты следующих уровней. Основным недостатком данной стратегии является то, что на верхнем уровне может быть выбран нереализуемый обобщенный вариант, для которого не удастся найти варианты подсистем, удовлетворяющие ограничениям, накладываемым этим вариантом.

Более гибкой является *смешанная* стратегия, в соответствии с которой происходит прохождение иерархии «сверху вниз с возвратом». В случае если для какой-либо подсистемы не удастся найти вариант, удовлетворяющий ограничениям материнской подсистемы, осуществляется возврат на предыдущий уровень и выбирается вариант, накладывающий менее жесткие ограничения на дочерние подсистемы. Если этот, более «мягкий», вариант материнской системы нарушает ограничения подуровня, в который она входит, то осуществля-

ется переход к еще более высокому уровню с тем, чтобы «ослабить» ограничения подуровня и т. д.

**Реализация решений и оценивание результатов.** Данный этап начинается с организации выполнения принятых решений. Это не менее важная часть проекта, чем выработка решений. Необходимо разработать обеспечивающие комплексы. Результатом создания нормативно-правового обеспечения являются документы, которые создадут правовую основу для внедрения решений. Создание организационного обеспечения заключается в разработке системы управления реализацией проекта. В ходе создания финансового обеспечения выявляется потребность в финансовых ресурсах, определяются источники их покрытия, разрабатывается инвестиционный план.

Следует разработать план мероприятий по внедрению решений с учетом имеющихся ресурсов и сроков внедрения. В ходе его разработки требуется: распределить весь процесс на этапы; распределить обязанности (ответственность) и назначить исполнителей на каждом этапе; определить состав и количество необходимых ресурсов; распределить ресурсы по этапам; установить даты начала и завершения каждого этапа, принимая в расчет их согласованность между собой и возможность поступления ресурсов.

Немаловажной частью подготовки к реализации плана работ является выявление потенциальных рисков, составляющих угрозу его срыва или ненадлежащего выполнения. Управление рисками включает в себя: идентификацию предполагаемых рисков (технических, правовых, организационных и т. д.); оценку рисков по критериям вероятности и значимости; классификацию по степени терпимости; разработку мер по снижению или нейтрализации рисков.

В ходе реализации разработанной программы мероприятий необходимо осуществлять мониторинг с тем, чтобы в случае отклонения от плана, вовремя внести коррективы. По окончании выполнения программы необходимо дать оценку последствий ее реализации.

Рассмотренная базовая методология системного анализа не накладывает никаких ограничений на используемые методы

и модели. На ее базе разрабатываются различные прикладные методологии, в основе которых лежит некоторая модель предметной области, вокруг которой и организуется весь процесс системного анализа. Прикладные методологии более детальны и конкретны по сравнению с базовой, однако, как правило, они охватывают не все этапы системной последовательности, акцентируя внимание лишь на некоторых. Все прикладные методологии можно условно разделить на две группы: структурного анализа и логического анализа. Ниже (в пп. 3.2, 3.3) будут рассмотрены наиболее яркие представители обеих групп методологий.

### **3.1.3. Методы организации экспертиз**

Базовая методология системного анализа оставляет за системным аналитиком выбор методов, используемых на том или ином этапе. Могут быть привлечены любые методы, в том числе описанные в разделе 2. При этом большинство методов предполагает выявление мнений экспертов. Это могут быть не только экспертные оценки систем (подсистем) или вариантов их реализации, но и идеи, предложения, используемые для выработки решений. Сама процедура выявления мнений экспертов может быть организована по-разному. Разработан ряд методов организации экспертиз — от методов экспертного опроса, таких как анкетирование, интервьюирование, организация дискуссий, до *методов активизации мышления*, использующихся для выработки новых, нестандартных решений. Некоторые из этих методов рассматриваются ниже.

Нужно подчеркнуть, что методы активизации мышления не связаны ни с какими конкретными методологиями, в них делается акцент на способы организации группового или индивидуального поиска решений, т. е. определяется не *что* должны оценивать или предлагать эксперты, а *как*, каким образом они должны это делать. Например, метод мозговой атаки может быть использован и для построения дерева целей, и для анализа причин возникновения проблем, и для формирования структуры проектируемой системы, и для разработки сценариев развития ситуаций и др.

**Мозговая атака (мозговой штурм)** представляет собой групповое обсуждение с целью получения новых идей, вариантов решений проблемы. Характерная особенность этого метода — использование в трудных тупиковых ситуациях, когда известные пути и способы решения оказываются непригодными. Суть метода состоит в том, что при коллективном поиске решения некоторой задачи в условиях благоприятного для творчества микроклимата происходит как бы цепная реакция идей, приводящая к интеллектуальному взрыву.

При использовании метода мозговой атаки целесообразно использовать следующие принципы [37, 45, 56]:

- сознательное генерирование как можно большего количества вариантов. Предпочтение отдается количеству идей, а не качеству (идеи высказываются кратко — без обсуждения);
- запрет критики любой идеи, какой бы дикой она ни казалась. Не рекомендуется отбрасывать альтернативы, кажущиеся, на первый взгляд, абсурдными, надуманными;
- предпочтительное использование не систематического логического мышления, а фантазии, ассоциаций, образного мышления;
- комбинирование или усовершенствование идей, предложенных участниками мозговой атаки.

При организации работ на этапе генерации альтернатив необходимо помнить о существовании факторов, как тормозящих работу, так и способствующих ей. К числу негативных факторов можно отнести психологическую несовместимость экспертов, инертность мышления, эмоциональные преграды, плохое физическое состояние, неблагоприятные условия и т. д. Продуктивному мышлению способствует юмор, смех, свободные дружеские отношения.

Наиболее эффективное число участников для проведения сеанса мозговой атаки 5–12 человек. При этом число специалистов по решаемой задаче должно быть не более половины. Желательно участие в группе женщин, так как они не только оригинально мыслят, но и повышают дух соревнования среди мужчин. Результативность совещания в большой мере зависит от ведущего. Он должен обеспечить соблюдение участниками правил проведения мозговой атаки, следить, чтобы обсуждение

не прерывалось и не шло в слишком узком направлении. Фиксирование идей осуществляется либо стенографистом, либо с помощью диктофона или магнитофона.

Полная продолжительность сеанса мозговой атаки составляет 1,5–2 часа. Рекомендуется следующий порядок: ознакомление участников с правилами (5–10 минут); постановка задачи ведущим (10–15 минут); проведение мозговой атаки (20–30 минут); перерыв (10 минут); составление отредактированного списка идей (30–45 минут).

При оформлении результатов все идеи желательно разделить на три группы: наиболее приемлемые (легко реализуемые); наиболее эффективные (перспективные); прочие.

Существуют различные модификации метода мозговой атаки, в частности: обратная атака, целью которой является выявление в существующих системах максимального числа недостатков; комбинированная атака (сначала обратная, потом прямая или сначала обратная, потом прямая); мозговая атака с оценкой идей; письменные варианты, например, метод анкетирования Кроуфорда, метод номинальных групп [57]. Письменные варианты мозговой атаки предполагают изложение участниками своих идей в письменной форме. Преимущество такой процедуры заключается в том, что отсутствует доминирование наиболее активных участников группы. Как правило, после того, как каждый анонимно выскажет свое мнение, составляется общий перечень идей, которые затем обсуждаются, дополняются, ранжируются.

**Метод Дельфи** может использоваться как для генерирования вариантов решения задачи, так и для экспертного оценивания вариантов на качественном уровне. Метод предполагает анонимность и физическое разделение членов группы, созданной для решения некоторой проблемы. Цель такого разделения — избежать некоторых потенциальных «ловушек» группового принятия решений, таких как присоединение к мнению наиболее авторитетного специалиста, следование за мнением большинства, нежелание отказаться от публично выраженного мнения. Устранение подобных психологических трудностей дает возможность свободно высказываться и прислушиваться к критике, не связанной с персональной конфронтацией.

Метод Дельфи предполагает проведение нескольких туров. *На первом туре* членам творческой группы (экспертам) раздаются анкеты с вопросами, касающимися решаемой задачи. После того как каждый эксперт анонимно выскажет свое мнение, ответив на вопросы предложенной ему анкеты, суждения экспертов обрабатываются с целью выделения среднего (медианы) и крайних значений. *На втором туре* экспертам сообщаются результаты обработки первого тура опроса с указанием расположения мнений каждого эксперта относительно среднего. Если мнение эксперта сильно отклоняется от среднего значения, то его просят аргументировать свое мнение или изменить. Собранные результаты второго тура обрабатываются. Если разброс оценок слишком велик, может быть принято решение о проведении следующего тура. Такая процедура повторяется несколько раз до достижения приемлемой сходимости оценок экспертов. Хотя теоретически число циклов не ограничено, на практике обычно выполняется три-четыре итерации [54]. Работа проводится под руководством отдельной управляющей группы, в которую входят системные аналитики и лицо, принимающее решения. Анонимность экспертов сохраняется до конца работы. Недостатками метода Дельфи являются: длительность экспертизы, связанная с организацией повторных опросов; необходимость неоднократного пересмотра экспертом своих ответов, что иногда вызывает отрицательную реакцию [37].

Существуют модификации метода Дельфи. В некоторых из них экспертам присваиваются весовые коэффициенты значимости их мнений, вычисляемые на основе предшествующих опросов и уточняемые от тура к туру, они учитываются при получении обобщенных результатов. В последние годы создано программное обеспечение, поддерживающее процедуру Дельфи в сетевой конфигурации персональных компьютеров [54].

**Эвристические приемы.** Большинство эвристических приемов изобретательской деятельности разработано для проектирования технических систем в рамках таких научных дисциплин, как системотехника, методы инженерного творчества. Однако они могут быть использованы для синтеза систем любой природы.

В методе «*Десятичная матрица Повилейко*» [58] предлагается к каждой из десяти групп показателей проектируемого изделия (геометрических, конструктивно-технологических, эксплуатационных, экономических, показателей надежности и т. д.) применить десять эвристических приемов:

1) неология — использование уже созданной системы (компонента, процесса, формы, конструкции), используемой в других отраслях, применительно к проектируемому изделию;

2) адаптация — приспособление известной системы для конкретных условий (характеристики исходной системы изменятся не более чем вдвое);

3) мультипликация — гиперболизация или миниатюризация, т. е. умножение параметров исходной системы в несколько раз;

4) дифференциация — разделение функций и элементов системы в пространстве, во времени;

5) интеграция — объединение, совмещение (технологическое, пространственное, временное) функций и элементов;

6) инверсия — переворачивание, обращение функций, конструкции и расположения элементов;

7) импульсация — организация прерывистых процессов (периодических, аperiodических);

8) динамизация — проектирование системы с изменяющимися параметрами;

9) аналогия — отыскание сходства, подобия с различными системами;

10) идеализация — представление идеального решения.

На использовании приема аналогии основан *метод синектики* [2, 54].

Суть данного метода состоит в систематическом направленном обсуждении группой специалистов любых аналогий (спонтанно возникающих в беседе) с подлежащей решению проблемой. При этом используются различные виды подобия — прямое, косвенное, условное. Предлагается даже экспертам «поставить себя на место проектируемого механизма». Результатом поиска аналогии является метафора, «отвечающая» на поставленный вопрос.

## **3.2. Методологии структурного анализа систем**

### **3.2.1. Сущность структурного анализа**

Сущность структурного подхода заключается в построении многоуровневой иерархической структуры исследуемой системы на основе использования отношений «целое-часть», что позволяет рассматривать систему на разных уровнях абстрагирования (по типу страт<sup>7</sup>). Анализируется не проблема, т. е. не причины ее возникновения или способы ее решения, а сама проблемосодержащая система. Декомпозиция системы позволяет подробно рассмотреть, как она устроена, из чего состоит, как работает. Главное здесь — наглядность представления структуры системы. Неслучайно для ее отражения используются схемы, графы, диаграммы, построенные с использованием некой графической нотации. Системному аналисту, имеющему в своем распоряжении подобную модель, проще уяснить проблему, локализовать ее.

В контуре системной последовательности принятия решений методологии структурного анализа используются, прежде всего, на этапе анализа ситуации. Дескриптивная модель существующей системы (модель «Как есть», *As is*, объяснительная) может выступать в качестве основы для сравнительного, ретроспективного и других видов анализа. Однако структурный подход может использоваться и на этапе выработки решений системной последовательности — для построения модели проектируемой проблеморазрешающей системы (модели «Как должно быть», «*To be*», нормативной). Причем стратифицированное представление позволяет формировать структуру системы методом последовательного приближения — от общей концепции к детальному представлению. При этом может быть построено несколько моделей,

---

<sup>7</sup> Здесь понятие страты трактуется широко: используется главный принцип — на разных стратах представлена одна и та же система, но с разной степенью детальности. Однако языки описания, используемые на разных стратах, не обязательно должны принципиально различаться.

отражающих различные варианты структуры проектируемой системы. Построенные структуры могут выступать в качестве основы для сравнения и оценки вариантов реализации создаваемой системы.

Тем не менее способы перехода от модели «Как есть» к модели «Как должно быть», как правило, в методологиях структурного анализа либо вообще не определены, либо слабо формализованы. Поэтому для поиска путей решения проблем и достижения поставленных целей необходимо привлекать другие методы и методологии (например, методологии логического анализа).

Большинство методологий структурного анализа, в частности описываемые ниже ИСМ и IDEF0, используют функциональную декомпозицию. Система и ее подсистемы при этом рассматриваются как процессы (работы, операции), осуществляющие некоторые преобразования. Формируемое дерево процессов представляет собой модель функционального состава системы, так как выделение той или иной подсистемы осуществляется в соответствии с тем, какую функцию она должна выполнять, *что* она должна делать. То, *как*, каким образом, с помощью каких ресурсов подсистема выполняет свою функцию, представляется в виде структурированного описания. Как правило, при этом используется некий шаблон (классификатор). Так, в методологии ИСМ для каждой подсистемы определяются структурные элементы — предметы деятельности, средства деятельности, субъекты деятельности и конечные продукты. В методологии IDEF0 используются четыре группы элементов, составляющих интерфейс функциональных блоков, — вход, выход, механизм и управление.

Существенным элементом формируемых моделей структуры являются взаимосвязи между подсистемами. В различных методологиях вопрос о типе связей, включаемых в модель, решается по-разному. Так, модель ИСМ отражает материальные, энергетические и информационные потоки между подсистемами, в том числе между подсистемами исследуемой системы и окружающей среды. В модели IDEF0 связи между функциональными блоками носят характер ограниченный на деятельность блока, в том смысле, что они показыва-

ют, какие элементы необходимы для его деятельности, при этом эти элементы необязательно должны передаваться извне с некоторым потоком. В любом случае, какие бы связи в модели не отражались, общим является то, что степень детальности их описаний, так же, как и описаний подсистем, возрастает при переходе от верхних уровней к нижним. По сути, происходит декомпозиция не только подсистем, но и связей.

Модели структурного анализа могут отражать не только статический, но и динамический взгляд на систему. Так, методология IDEF3 позволяет отражать последовательность выполнения работ, составляющих некоторый сложный процесс, включая всевозможные варианты ветвления и слияния потоков работ.

Основным преимуществом методологий структурного анализа является наглядность представления структуры существующей либо проектируемой системы, основным недостатком – отсутствие выразительных средств отражения причинно-следственных связей между проблемой (целью) и средствами ее разрешения.

### **3.2.2. Методология ИСМ**

Теория иерархических содержательных моделей (ИСМ) [42–44] разработана одним из авторов данного пособия в 1970–80-е гг. Основная идея состоит в использовании декларативной иерархической модели исследуемой системы (предприятия) в качестве основы для формирования моделей принятия решений — дерева целей, дерева вариантов, дерева решений. Декларативная модель формируется путем декомпозиции предметной области, включающей помимо объекта моделирования (системы) и окружающую среду, с помощью стандартных оснований декомпозиции. Между выделяемыми системами устанавливаются связи (материальные, энергетические, информационные потоки).

Рассмотрим основные шаги процесса декомпозиции.

1. Выделяются объект моделирования (ОМ) и окружающая среда (ОС), а также четыре агрегированных связи:

OM→OC, OC→OM, OM→OM и OC→OC (рис. 3.3, а). Последняя связь (помеченная на рисунке пунктиром) является несущественной для целей моделирования и поэтому в дальнейшем не рассматривается.

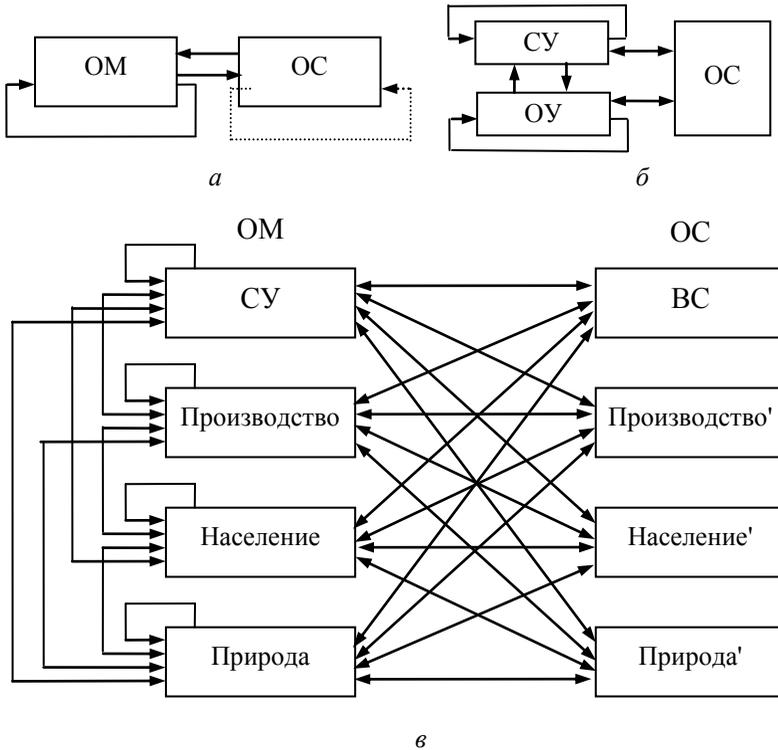


Рис. 3.3. Связи подсистем: а — объекта моделирования и среды; б — объекта управления, системы управления и среды; в — подсистем социальной деятельности объекта моделирования и среды

2. В объекте моделирования выделяются: объект управления (ОУ) и система управления (СУ), обменивающиеся с друг другом, с самими собой и с окружающей средой информацией, материей (продукцией, сырьем, материалами и т. д.) и энергией (см. рис. 3.3, б).

3. Объект моделирования и среда декомпозируются на так называемые подсистемы социальной деятельности (см. рис. 3.3, в). В ОУ выделяются подсистемы «Производство», «Население» (социальная деятельность, направленная на персонал), «Природа» (природоохранная деятельность). В окружающей среде выделяются: «Вышестоящие системы управления (ВС)», «Производство'» (поставщики, потребители), «Население'» (социальное окружение), «Природа'» (географическое окружение). Между выделенными подсистемами устанавливаются связи. Примеры связей:

«Производство → Производство'» — продукция, услуги;

«Производство' → Производство» — сырье, материалы;

«СУ → Производство» — приказы, распоряжения;

«СУ → ВС» — отчетная документация, запрашиваемые данные;

«Производство → Природа'» — выбросы, загрязнения;

«Население' → Население» — нанимаемые работники.

4. Подсистема ОМ «Производство» декомпозируется на «Основное производство» и «Вспомогательное производство», а подсистема среды «Производство'» — на «Потребители» и «Поставщики». Устанавливаются связи между полученными подсистемами.

5. Основное производство декомпозируется на подсистемы, соответствующие производству различных конечных продуктов, а вспомогательное производство — на подсистемы, соответствующие различным видам обеспечивающей деятельности (снабжение, сбыт, техническое обслуживание, обеспечение энергоресурсами и т. д.). Кроме того, в рамках подсистем среды «Потребители» и «Поставщики» выделяются конкретные организации. Связи между ОМ и средой, а также между подсистемами ОМ также конкретизируются.

6. Выделяются для ранее полученных подсистем ОУ технологические стадии производства (технологические операции) и определяются связи между стадиями. На рис. 3.4 приведены типовые структуры технологической сети.

7. Система управления декомпозируется на подсистемы, осуществляющие управление выделенными подсистемами ОУ.

8. Выделяются подсистемы СУ, соответствующие различным функциям управления (планирование, оперативное управление, контроль) и этапам переработки информации (сбор, передача, хранение, обработка, выдача информации), описываются их связи.

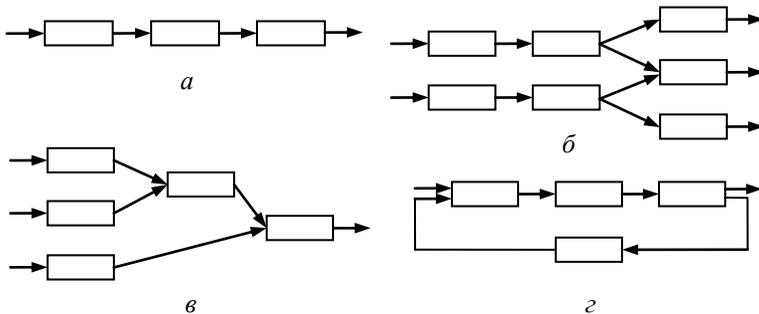


Рис. 3.4. Типовые технологические структуры:  
*a* — последовательная; *б* — расходящаяся («дерево»);  
*в* — сходящаяся; *г* — структура с реверсом

Помимо описанных оснований декомпозиции могут быть использованы и следующие: выделение пространственно обособленных подсистем; выделение этапов жизненного цикла; выделение различных способов производства; выделение частей, соответствующих функционированию и развитию. Эти основания могут быть применены как для объекта управления, так и для системы управления.

Подсистемы, выявленные в результате декомпозиции ОМ, могут быть представлены в виде иерархии (дерева). Следующим этапом является создание содержательного описания для каждой из подсистем. При этом любая подсистема рассматривается как некоторый *процесс*, деятельность, преобразующая предметы деятельности в конечные продукты. Содержательное описание подсистемы включает в себя перечень структурных элементов, участвующих в процессе, а также описание свойств элементов и процесса в целом. Таким образом, элементный состав как бы «накладывается» на каждую из подсистем дерева.

Выделяется четыре группы структурных элементов (рис. 3.5):

- 1) предметы деятельности (ПД) — сырье, материалы, информация;
- 2) конечные продукты (КП) — товары, услуги, информация;
- 3) средства деятельности (СД) — здания, оборудование, инструменты;
- 4) субъекты деятельности или кадры (К) — работники, исполнители.

Каждый элемент характеризуется множеством содержательных параметров (атрибутов). Весь процесс в целом также характеризуется множеством параметров (параметров процесса), описывающих эмерджентные (целостные) свойства.

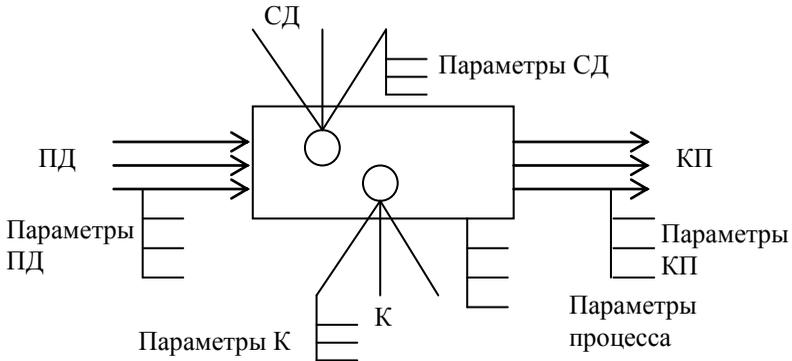


Рис. 3.5. Структура содержательного описания подсистемы

На верхнем уровне дерева формируется описание высокого уровня абстракции с использованием агрегированных структурных элементов и обобщенных параметров, характеризующих систему в целом. Для подсистем нижних уровней описания более детализированы — выделяются конкретные элементы (по сути, они являются результатом декомпозиции соответствующих элементов материнской системы), описываемые более подробными параметрами, выделяются подробные параметры процесса.

Сформированное описанным способом иерархическое содержание деятельности системы называется декларативной моделью системы. Данную модель предлагается рассматривать как основу для формирования дерева целей, дерева задач управления или дерева вариантов. При этом каждой подсистеме декларативной модели соответствует одна или несколько подсистем производной модели.

Рассмотрим, как формируется дерево целей на примере Управления магистральным нефтепроводом Центральной Сибири (УМНЦС). На рис. 3.6 представлен фрагмент дерева.



Рис. 3.6. Фрагмент дерева целей УМНЦС

На верхнем уровне находится глобальная цель, относящаяся ко всей системе в целом. На следующем уровне расположены подцели, сопоставленные подсистемам социальной деятельности, т. е. управленческой деятельности, производственной, социальной (управлению персоналом) и природоохранной. Цель производственной деятельности декомпозируется на подцели, соответствующие основному и вспомогательному производству. Цель основной производственной деятельности конкретизируется через подцели, соответствующие основным стадиям технологического цикла, которые, в свою очередь, также детализируются через подцели, сопоставленные технологическим операциям.

Для формирования дерева целей в автоматизированном режиме была разработана компьютерная программа ДИПОДЕЦ [42, 43]. Дерево целей с помощью этой системы строится последовательно, шаг за шагом в диалоге с экспертом — разработчиком дерева целей. Система выбирает подсистему объекта моделирования (соответствующую цель) для декомпозиции из очереди подсистем, сформированных на предыдущих шагах. Если эксперт считает подсистему элементарной, ему предлагаются на выбор основания декомпозиции, которые могут быть применены к данной подсистеме. При осуществлении акта декомпозиции по выбранному основанию у эксперта может запрашиваться уточняющая информация (признаки, параметры подсистем). Например, запрашиваются названия, идентифицирующие конечные продукты, и параметры (количественные и качественные) этих продуктов.

Каждой из подсистем, получающихся в результате декомпозиции, ставится в соответствии цель, формируемая на основе готового шаблона, в который подставляются заданные экспертом признаки. При этом если возникает необходимость просклонять признаки, т. е. поставить их в определенный падеж в соответствии с правилами русского языка, программа делает это автоматически.

Примеры шаблонов целей:

«Обеспечить производство [наименование продукта] [наименование подсистемы] с параметрами [список параметров продукта]»;

«Обеспечить потребности производства [наименование продукта] на стадии [название стадии] в [наименование средства производства] с параметрами [список параметров]».

Помимо режима построения дерева целей в ДИПОДЕЦ реализованы режимы проверки дерева, корректировки, вывода на печать или терминал и т. д. [42, 43]. Максимальное число уровней построенного с помощью системы дерева целей равно 20 (не считая уровня глобальной цели). Максимальное число целей с параметрами около 40000.

Методология ИСМ предусматривает также построение модели вариантного выбора на основе иерархической декларативной модели. Модель позволяет формировать и выбирать варианты подсистем на разных уровнях иерархии.

Для каждой подсистемы (в том числе системы в целом) может быть сформировано множество вариантов, характеризующихся определенной комбинацией значений параметров. Задача иерархического выбора решается с использованием стратегии «сверху – вниз». Сначала на верхнем уровне иерархии формируются обобщенные варианты реализации всей системы в целом и выбирается оптимальный вариант. Этот вариант является ограничением («рамками») для подсистем нижестоящих уровней. Затем аналогичным образом принимаются решения на более низких уровнях (рис. 3.7). Тем самым выбранный на верхнем уровне вариант как бы уточняется, детализируется на уровне подсистем.

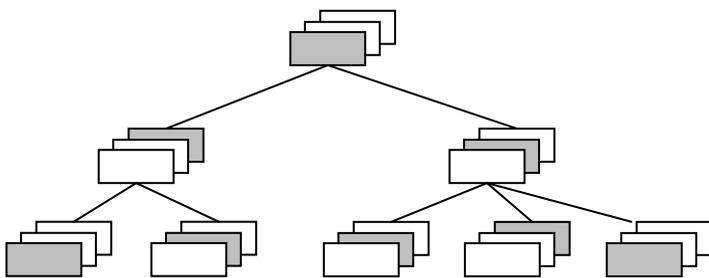


Рис. 3.7. Дерево вариантов системы:  
□ — вариант подсистемы; ■ — оптимальный вариант

Для согласования вариантов подсистем друг с другом используются координационные модели. Поскольку при переходе от верхних уровней к нижним число подсистем резко возрастает, предлагается строить координационные модели отдельно для каждого подуровня — совокупности подсистем, полученных в результате декомпозиции одной и той же подсистемы предыдущего уровня (материнской системы).

Таким образом, каждому подуровню дерева подсистем ставится в соответствие двухуровневая модель, на нижнем уровне которой находятся частные модели отдельных подсистем, на верхнем — координационная модель (рис. 3.8).

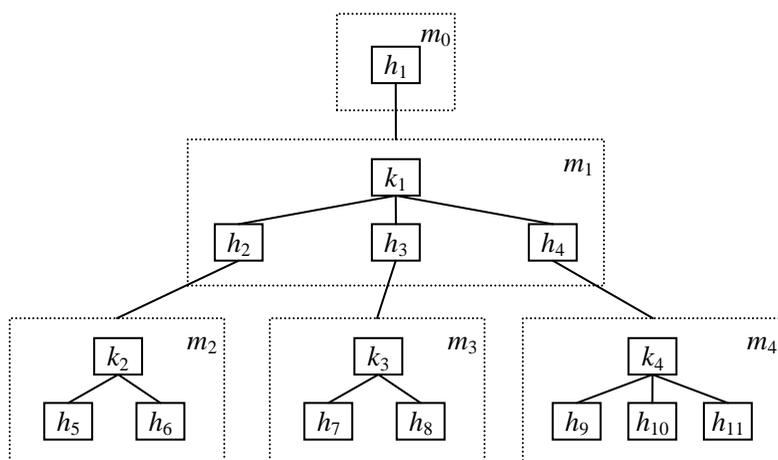


Рис. 3.8. Иерархия моделей подуровней:  $h_i$  — модель подсистемы;  $k_j$  — координационная модель;  $m_l$  — модель подуровня

Частные модели используются для выбора оптимальных вариантов подсистем и включают в себя локальные критерии эффективности и локальные ограничения (внутренние, ограничения от других подсистем того же уровня и ограничения от материнской системы). Координационная модель используется для согласования вариантов подсистем подуровня между собой и с выбранным вариантом материнской системы.

Она включает: критерий эффективности подуровня, совпадающий с критерием материнской системы; ограничения, накладываемые на параметры, являющиеся функцией параметров дочерних подсистем (например, ограничения на совокупные затраты подсистем); ограничения, отражающие связи дочерних подсистем друг с другом (баланс входов-выходов подсистем).

Нахождение оптимального варианта подуровня может осуществляться путем полного перебора всех возможных сочетаний вариантов подсистем подуровня. Однако этот способ требует большого объема вычислений и, кроме того, не позволяет учитывать локальные критерии эффективности. Поэтому более предпочтительным является использование процедур координации. В частности, в [42] описаны две процедуры: координация «от безусловно оптимального варианта», «волновой» метод координации.

### **3.2.3. Методология IDEF0**

Начало разработке семейства методологий структурного анализа IDEF (Integration DEFinition) положил проект ICAM (Integrated Computer-Aided Manufacturing), предложенный в конце 1970-х гг. ВВС США. Целью проекта была разработка подходов, обеспечивающих повышение эффективности производства благодаря систематическому внедрению компьютерных технологий. В соответствии с проектом ICAM было разработано три самостоятельные методологии — IDEF0, IDEF1 и IDEF2 для создания соответственно функциональной, информационной и динамической модели производственной системы.

Методология IDEF0 является одной из самых известных и широко используемых методологий моделирования. Системные аналитики всего мира используют ее для решения широкого спектра проблем, включая разработку программного обеспечения, бизнес-анализ, проектирование, планирование и управление производственными системами, управле-

ние финансами и материально-техническими ресурсами, обучение персонала и др.

Методология IDEF0 базируется на методе SADT (Structured Analysis and Design Technique) Росса, предназначенном для структурированного представления функций системы и анализа системных требований. При создании новых систем IDEF0 может применяться как для определения требований и функций, так и для разработки системы, которая удовлетворяет этим требованиям и реализует эти функции. При исследовании уже существующих систем IDEF0 может использоваться для анализа функций и механизмов их исполнения.

IDEF0-модель использует графический язык для отражения информации о конкретной системе. Модель состоит из диаграмм и фрагментов текста. На диаграммах все функции системы и их взаимодействия представлены как блоки (функции) и дуги (отношения) [59].

Основной конструкцией модели является функциональный блок (activity — активность), представленный в виде прямоугольника и отображающий некоторую функцию (действие, процесс, операцию).

Внутри блока записывается его наименование. Оно должно содержать глагол или отглагольное существительное, например, «разработать проект», «изготовление продукта», «планирование».

Дуги, изображаемые на диаграмме в виде линий со стрелками на конце, играют роль связей блоков с внешней для них средой. Каждая из дуг имеет характеризующую ее метку.

Назначение дуг зависит от стороны блока, в которую стрелка входит или выходит (рис. 3.9) [59]:

- «вход» (*I* — input) — дуги, входящие слева от блока. Они представляют собой предметы или данные, необходимые для выполнения функции блока (сырье, материалы, исходная информация);

- «выход» (*O* — output) — дуги, выходящие справа из блока. Они показывают предметы или данные, полученные в результате выполнения функции (продукция, услуга, выходные данные);

- «управление» (*C* — control) — дуги, входящие сверху блока, — описывают условия или данные, которые управляют выполнением функции (инструкции, требования, стандарты);
- «механизм» (*M* — mechanism) — дуги, входящие снизу блока. Они обозначают исполнителей или средства, выполняющие функцию (персонал, подразделения фирмы, оборудование, инструменты, информационная система).



Рис. 3.9. Функциональный блок IDEF0-диаграммы

Выход и вход показывают, что и из чего делается функциональным блоком, управление показывает, как и почему это делается, а механизм показывает, кем и с помощью чего это делается.

Необходимо подчеркнуть, что дуги — это необязательно входные или выходные потоки. Входящие дуги — это необходимые условия (ограничения) для того, чтобы действие могло произойти, выходящие — результат действия. Например, оборудование, инструменты необходимы для изготовления изделия, однако они необязательно должны поступать в систему, производящую изделие, так как уже могут находиться в системе.

Функциональный блок может быть декомпозирован, т. е. представлен в виде совокупности других взаимосвязанных функциональных блоков, которые детально описывают исходный блок. Блоки, полученные в результате декомпозиции, вместе со связанными с ними дугами размещаются на отдельной диаграмме декомпозиции. При необходимости каждый из этих блоков также может быть декомпозирован, т. е. может породить свою «дочернюю» диаграмму декомпозиции.

Таким образом, IDEF0-модель состоит из набора иерархически связанных диаграмм (рис. 3.10).

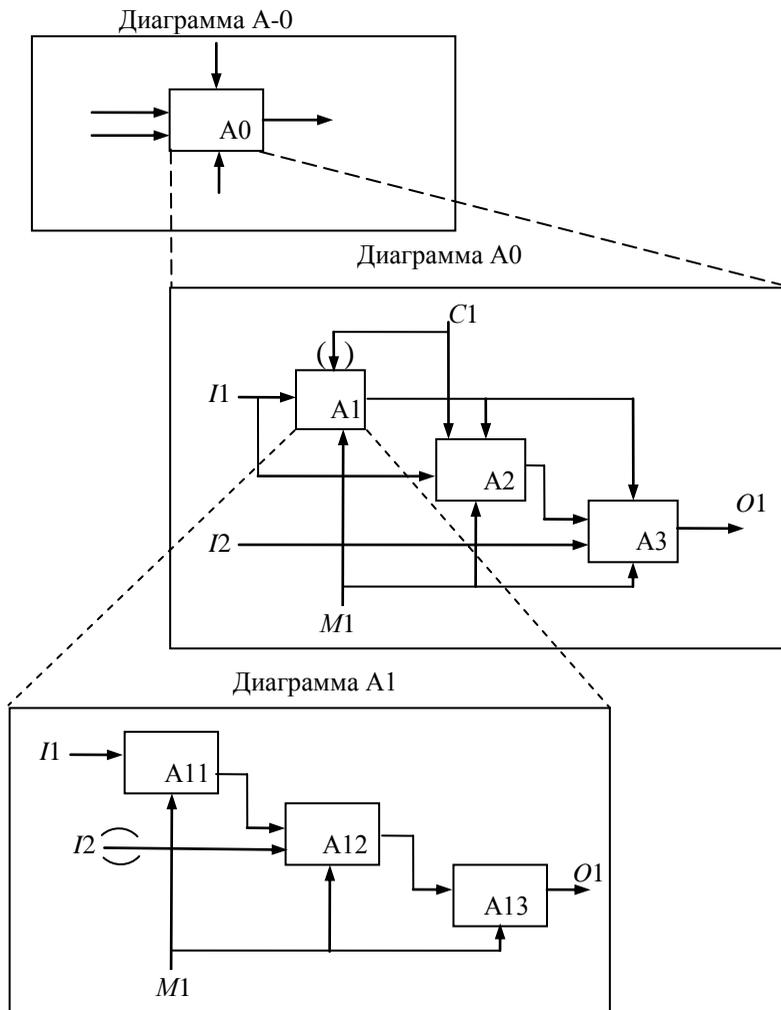


Рис. 3.10. Иерархия диаграмм IDEF0-модели

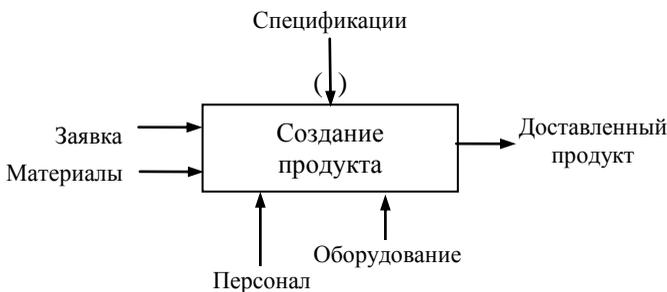
На диаграмме корневого уровня представлена вся система в виде одного блока и дуг, изображающих связи с внешним окружением. На диаграмме декомпозиции первого уровня

система представлена более детально в виде совокупности блоков-подмодулей, соединенных дугами друг с другом и с окружением. На диаграммах декомпозиции следующего уровня детализируются блоки диаграммы первого уровня и т. д. [59].

Для того чтобы указать положение любой диаграммы или блока в иерархии, используются номера узлов. Например, блок А0 на диаграмме верхнего уровня А–0 детализируется на диаграмме А0 совокупностью блоков А1, А2, А3, .... В свою очередь, блок А1 детализируется на диаграмме А1 совокупностью блоков А11, А12, А13, ..., блок А2 детализируется на диаграмме А2 совокупностью блоков А21, А22, А23, ... и т. д. Каждая диаграмма обычно содержит от трех до шести блоков, размещаемых по «ступенчатой» схеме в соответствии с их доминированием, которое понимается как влияние, оказываемое одним блоком на другие.

Построение модели начинается с диаграммы верхнего уровня А–0, называемой контекстной диаграммой. Помимо единственного блока, отображающего систему в целом, и дуг, связывающих систему с внешним окружением, контекстная диаграмма содержит описание цели моделирования и точки зрения, с которой разрабатывается модель. Цель указывает, для чего создается модель, а точка зрения — для кого (для какого должностного лица или подразделения организации).

Пример контекстной диаграммы приведен на рис. 3.11.



Цель: описать процесс создания продукта на заказ  
Точка зрения: аналитик

Рис. 3.11. Пример контекстной диаграммы

После разработки контекстной диаграммы проводят декомпозицию. Например, блок «Создание продукта», представленный на рис. 3.11, может быть расчленен на блоки «Прием заявки», «Изготовление продукта» и «Доставка продукта». Блоки, полученные в результате декомпозиции, размещаются на диаграмме декомпозиции первого уровня (рис. 3.12).

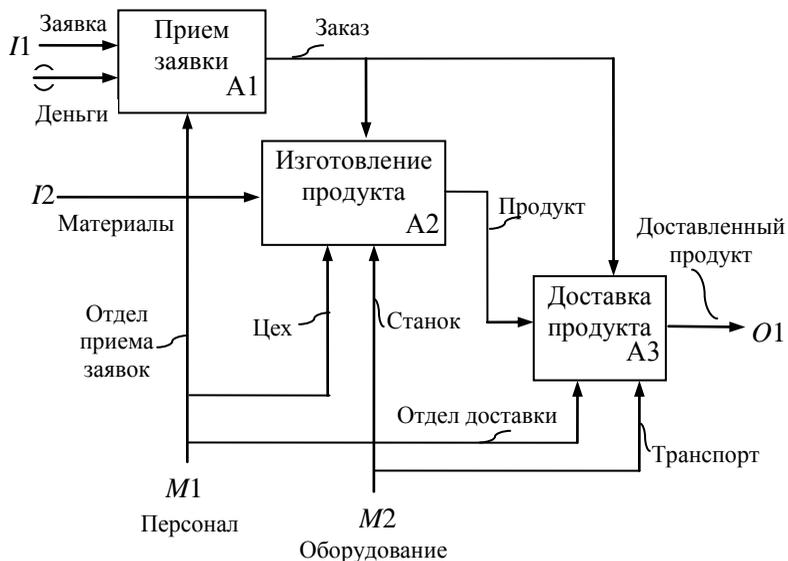


Рис. 3.12. Пример диаграммы декомпозиции

Кроме того, на диаграмму декомпозиции с родительской (контекстной) диаграммы переносятся и дуги, связывающие родительский блок с окружением. Это внешние дуги, имеющие источник или получатель вне диаграммы. Источники или получатели внешних дуг называются портовыми узлами. Для их обозначения используются специальные коды. В зависимости от того, является ли дуга, связанная с потовым узлом, входом, выходом, управлением или механизмом, код содержит одну из четырех букв: *I* (Input), *C* (Control), *O* (Output), *M* (Mechanism). Эти буквы сопровождаются номером (позиции дуг нумеруются слева направо или сверху вниз).

Процесс перенесения дуг с родительской диаграммы на диаграммы декомпозиции (диаграммы-потомки) называется ICOM-кодогенерацией. С его помощью поддерживается связь между диаграммами-родителями и диаграммами-потомками и обеспечивается непротиворечивость модели [59].

На диаграмме декомпозиции можно отобразить внешнюю дугу, для которой на родительской диаграмме нет соответствующей дуги, и, наоборот, можно на родительской диаграмме отобразить дугу, которая не будет отображаться на дочерней диаграмме. Такие дуги называются «туннельными». Вокруг одного из концов такой дуги изображаются круглые скобки («туннель»).

Туннель возле свободного конца дуги показывает, что этой стрелки нет на диаграмме-родителе, т. е. на верхнем уровне декомпозиции эта стрелка не важна.

Туннель у блока говорит о том, что эта стрелка не важна на диаграмме-потомке, и там она не отобразится.

Рассмотрим перенос внешних дуг на примере моделей, приведенных на рис. 3.11 и 3.12. Блок А0 на контекстной диаграмме (см. рис. 3.11) связан с шестью дугами — двумя входами, одним выходом, одним управлением и двумя механизмами. Но дуга управления помещена в туннель. На диаграмме декомпозиции (см. рис. 3.12) дугам родительского блока соответствуют внешние дуги, связанные с узлами *I1*, *I2*, *O1*, *M1*, *M2*. Дуга управления не была перенесена на дочернюю диаграмму (портового узла *C1* на диаграмме декомпозиции нет). Зато появилась новая дуга входа с меткой «Деньги», которой не было на родительской диаграмме (у данной дуги туннель размещен возле свободного конца).

Помимо внешних дуг на диаграммах декомпозиции отображаются дуги, связывающие блоки друг с другом. Выходные дуги одних блоков могут являться либо входами, либо управлением, либо механизмом других. Нужно подчеркнуть, что внутренние дуги — это отражение взаимовлияния блоков, а не последовательности выполнения блоков. Блоки могут выполняться и параллельно. Таким образом, ни последовательность выполнения функций, ни время не указаны явно на IDEF0-диаграммах.

Различают следующие типы связей между блоками [59]:

1) связь по входу — выход вышестоящего блока направляется на вход нижестоящего для дальнейшего преобразования;

2) связь по управлению — выход вышестоящего блока направляется на управление нижестоящего (например, один блок вырабатывает план, предписывающий, что и как должен делать другой блок);

3) обратная связь по входу — выход нижестоящего блока направляется на вход вышестоящего (например, результатом функции контроля качества может быть отбракованный продукт, который передается на вторичную переработку);

4) обратная связь по управлению — выход нижестоящего блока направляется на управление вышестоящего (например, результат корректировки проекта может передаваться на повторную реализацию проекта);

5) связь «выход-механизм» — выход одного блока направляется на механизм другого (например, один блок подготавливает ресурсы, необходимые для работы другого блока).

На диаграмме декомпозиции (см. рис. 3.12) присутствуют первые два типа связей.

Пример связи по входу — дуга «Продукт», являющаяся результатом блока А2 «Изготовление продукта» и предметом деятельности для блока А3 «Доставка продукта».

К связи по управлению относится дуга «Заказ», являющаяся результатом блока А1 «Прием заявки» и управлением для блоков А2 и А3, так как она показывает соответственно, каким должен быть изготавливаемый продукт (в заказе должны быть указаны тип, цвет, размеры и другие характеристики продукта) и кому готовый продукт должен быть доставлен (в заказе указывается имя, адрес, телефон клиента).

Дуги (как внешние, так и внутренние) могут разветвляться в случае, если одни и те же данные или объекты могут использоваться сразу в нескольких функциональных блоках либо разные части выходных данных (объектов) направляются разным блокам. Каждая из ветвей может представлять один и тот же объект или различные объекты одного и того же типа. Например, на диаграмме, приведенной на рис. 3.12, дуга, идущая от портового узла М1 «Персонал», разветвляется на три

ветви — «Отдел приема заявок», «Цех» и «Отдел доставки», являющиеся соответственно механизмами блоков A1, A2 и A3.

Кроме того, дуги могут сливаться. Например, разные блоки могут вырабатывать одинаковые или однородные данные (объекты), которые в дальнейшем используются или перерабатываются в одном месте.

После того как будет построена модель декомпозиции первого уровня, каждый из блоков этой диаграммы также может быть декомпозирован.

Пример иерархии функциональных блоков («деревя узлов») приведен на рис. 3.13.

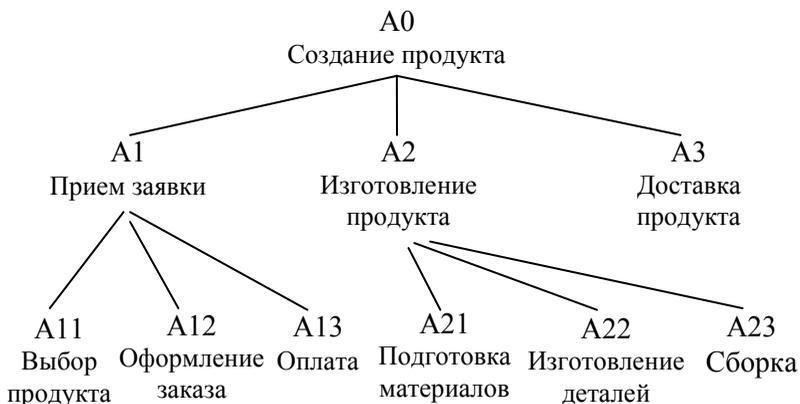


Рис. 3.13. Пример дерева узлов

Построение диаграмм нижестоящих уровней осуществляется аналогично процедуре построения диаграммы первого уровня.

На конечном этапе разработки модели к каждой диаграмме может быть приложена страница с сопроводительным текстом и глоссарий. Глоссарий содержит подробную информацию об элементах модели [59].

### **3.3. Методологии логического анализа систем**

#### **3.3.1. Сущность логического анализа**

Логический анализ акцентирует внимание на поиске причинно-следственных связей между проблемами и их причинами (или следствиями), между целями и средствами их достижения. В его основе лежит модель типа слоев. Анализу при этом подвергается не проблемосодержащая система, а непосредственно проблема — каковы логические причины ее возникновения, к каким последствиям она может привести, каковы пути ее устранения. Аналогично при проектировании проблеморазрешающей системы анализу подвергается не воплощаемая проектируемая система, а цель системы — с помощью каких средств она может быть достигнута, какие решения могут привести к цели и к разрешению проблемы.

К методологиям логического анализа относятся, прежде всего, методологии, основанные на построении дерева целей<sup>8</sup>. В [1] приводится обзор методик построения дерева целей, базирующихся на различных концепциях (концепции деятельности, концепции стремления к идеалу, концепции, учитывающей среду целеполагания и т. д.). В основном, они отличаются используемыми основаниями декомпозиции и последовательностью их применения. Ряд методик предполагают, помимо собственно построения дерева, его анализ с помощью различных процедур сравнения и оценки целей (подцелей), например: метод PATTERN, метод анализа иерархий Т. Саати, метод решающих матриц Г.С. Поспелова.

В динамическом варианте логический анализ отражает последовательности событий, проистекающих из того или иного решения (действия), которые могут произойти в будущем с исследуемой системой. По сути, строится сценарий. При этом

---

<sup>8</sup> Тот факт, что методология ИСМ также позволяет формировать дерево целей, тем не менее, не означает, что она относится к методологиям логического анализа, т. к. изначально формируется иерархическая структура системы, дерево целей же «накладывается» на структуру.

множество альтернативных решений, которые могут быть приняты при наступлении определенного события, и множество возможных последствий любого решения приводят к разветвленному по типу «дерева» сценариям. Один из вариантов построения подобного сценария, включающий оценку возможных исходов (их вероятности и полезности), реализован в методике, получившей название «дерева решений».

Ниже будет рассмотрена методика построения дерева целей, разработанная томскими учеными, а также метод анализа иерархий. Здесь необходимо оговориться, почему эти методы (методики) причисляются к методологиям. Выше (п. 3.1.1) уже указывалось, что методологией называется учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности. Поэтому наличие в методике таких составляющих, как характеристики деятельности (принципы, условия), логическая структура (субъект, объект, средства, методы, результат деятельности), временная структура (стадии, этапы деятельности), позволяет считать ее методологией.

Деление прикладных методологий системного анализа на структурные и логические не означает, что, с одной стороны, методологии логического анализа не используют модели структуры, а, с другой стороны, методологии структурного анализа не могут опираться на модели, отражающие логику. Просто модели логического анализа представляют структуру не исследуемой проблемосодержащей или проблеморазрешающей системы, а самого процесса рассуждений эксперта, поиска логических цепочек решений, которые позволяют решить исходную проблему. Модели структурного анализа могут также отражать логику, но не логику системного аналитика, а, например, логику последовательности функционирования подсистем, составляющих структуру проблемосодержащей или проблеморазрешающей системы (как это делается, в частности, в методологии IDEF3).

Основным преимуществом методологий логического анализа является наглядность отражения причинно-следственных связей между проблемой (целью) и средствами ее разрешения. Основным недостатком можно считать то, что в явном виде целиком вся структура исследуемой системы (сущест-

вующей или создаваемой) не отображается. Используются лишь отдельные фрагменты структуры (основания декомпозиции) для сопоставления целей соответствующим структурным элементам.

Методологии логического и структурного анализа целесообразно сочетать, чтобы достоинства одних дополняли достоинства других. Так, можно для одной и той же системы формировать разные деревья целей на различных уровнях абстрагирования, для различных подсистем, составляющих структуру системы. Попытки же формирования единого дерева целей для действительно сложной системы, состоящей из множества подсистем (к тому же, вероятно, описанных на различных языках конфигулятора), могут приводить к тому, что дерево получится очень громоздким, запутанным, а процесс его построения – весьма неоднозначным.

### **3.3.2. Методологии построения дерева целей**

Идея метода дерева целей состоит в декомпозиции глобальной цели системы на отдельные подцели, достижение которых обеспечивает достижение глобальной цели. Подцели в свою очередь могут разбиваться на более мелкие подцели и т. д. Процесс заканчивается, если подцели нижнего уровня могут считаться элементарными, т. е. способ их достижения достаточно очевиден. Несмотря на простоту концепции построения дерева целей, при его формировании возникают большие трудности, связанные с декомпозицией. Процедура формирования иерархии целей в значительной мере является процессом эвристическим и мало формализованным. Для облегчения данного процесса было предложено использовать типовые основания декомпозиции. На рис. 3.14 представлена обобщенная схема построения дерева целей с использованием типовых оснований (детальная блок-схема алгоритма построения дерева приведена в [2]).

1. Определение области анализа. Формулируется глобальная цель в виде некоторого высказывания, подлежащего анализу. От правильности формулировки во многом зависит, получим ли мы в результате анализа то, что хотели.

2. Определение целевой системы (точки зрения), в интересах которой выполняется весь анализ. Этот блок определяет, зачем нужно то, что мы будем делать [2].

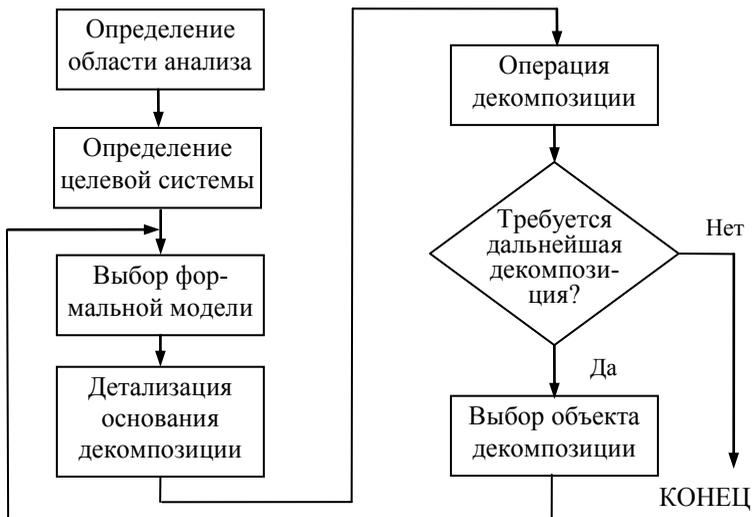


Рис. 3.14. Обобщенная схема построения дерева целей

3. Выбор формальной модели. Из набора типовых оснований декомпозиции, являющихся формальными моделями системы, эксперт выбирает наиболее подходящее основание. Примеры формальных моделей: «Жизненный цикл», «Структурные элементы деятельности», «Управленческий цикл». Нужно уточнить, что система, с которой связан объект анализа, и система, по модели которой проводится декомпозиция, необязательно совпадают. Например, одна из этих систем может являться подсистемой или надсистемой для другой [2].

4. Детализация основания декомпозиции. Формальную модель необходимо наполнить содержанием с учетом выбранной области анализа и целевой системы. Например, необходимо конкретизировать этапы жизненного цикла производства продукта или цикла управления, составить конкретные классификаторы структурных элементов для рассматриваемого вида деятельности.

5. Операция декомпозиции. Для каждой подсистемы, выделяемой в соответствии с выбранным основанием декомпозиции, формулируется подцель, связанная с данной подсистемой и обеспечивающая достижение декомпозируемой цели.

6. Проверка. Полученные подцели нижнего уровня проверяются на элементарность. Если все «листья» дерева можно считать элементарными (простыми, понятными, реализуемыми), то построение дерева целей заканчивается.

7. Выбор объекта декомпозиции. Выбирается одна из подцелей, нуждающихся в дальнейшей декомпозиции (из множества неэлементарных подцелей), и осуществляется переход на шаг 3.

Итеративность приведенного алгоритма придает ему вариабельность, возможность пользоваться моделями различной детальности на разных ветвях, углублять детализацию сколь угодно [2].

Наиболее сложным и, пожалуй, наиболее важным является вопрос, какие из типовых оснований декомпозиции и в каком порядке следует использовать. Порядок следования должен быть логичным, обеспечивать последовательное уточнение способов достижения глобальной цели. В [2] предлагается следующая последовательность уровней дерева: «глобальная цель» – «конечные продукты» – «целеполагающие системы» – «жизненный цикл производства» – «состав системы (ресурсы)» – «управленческий цикл». Логика здесь такова. Так как конечные продукты являются основным результатом деятельности предприятия, то глобальная цель определяется, прежде всего, через цели, связанные с различными продуктами системы. В свою очередь, цели по продуктам достигаются, если выполняются требования к ним всех целеполагающих систем (вышестоящих систем, систем среды, исследуемой системы, подведомственных систем). Для достижения этих целей требуется, чтобы выполнялись цели на всех этапах жизненного цикла производства продуктов (снабжение, производство, сбыт и т. д.). Каждая из целей на любом этапе производства детализируется через цели, связанные с используемыми ресурсами (предметами деятельности, средствами деятельности, кадрами). Наконец, реализация этих целей предполагает

выполнение целей на всех этапах управленческого цикла (планирования, организации, контроля).

На рис. 3.15 приведен пример дерева целей, сформированного в соответствии с описанным порядком следования оснований декомпозиции.

Необходимо подчеркнуть, что в отличие от методики ИСМ (п. 3.2.2), где декомпозируется сама исследуемая система, а затем уже каждой из подсистем сопоставляется цель, в методологии дерева целей декомпозируются именно цели. Если бы декомпозировалась сама система, то, например, за выделением подсистем, соответствующих различным конечным продуктам, не могло следовать выделение целеполагающих систем. Но поскольку декомпозируется цель системы, то такое вполне допустимо. Например, в дереве целей, приведенном на рис. 3.15, цель по продукту «Повысить эффективность производства барометров» декомпозирована на подцели: «Минимизировать инвестиции» (цель вышестоящей организации), «Повысить качество продукции» (цель клиентов), «Сократить расходы» (цель исследуемой системы).

Основное достоинство методологии дерева целей заключается в том, что она позволяет связать сложную многофакторную цель со средствами ее достижения, т. к. «элементарные» подцели на нижнем уровне, по сути, определяют пути достижения глобальной цели.

Основной недостаток методологии — сложность и неоднозначность процесса построения дерева целей. Применение стандартных оснований декомпозиции, с одной стороны, облегчает построение иерархии целей, с другой стороны — «уводит в сторону» от поиска логически обоснованной цепочки, связывающей цели со средствами их достижения.

Кроме того, при использовании типовых оснований декомпозиции сохраняется неоднозначность процесса формирования дерева. Чередуя различные основания в различной последовательности, можно построить огромное количество всевозможных иерархий. Поэтому качество сформированного дерева сильно зависит от квалификации его разработчика.



Рис. 3.15. Пример дерева целей

Следует отметить, что методика не содержит критериев оценки качества формируемого дерева. Предлагаются лишь некоторые эвристические рекомендации (принципы) [2, 16]:

- принцип полноты: проблема должна быть рассмотрена максимально всесторонне и подробно;
- принцип простоты: все дерево должно быть максимально компактным «вширь» и «вглубь»;
- принцип существенности: в модель основания декомпозиции включаются только компоненты, существенные по отношению к цели анализа.

К недостаткам методики дерева целей можно отнести и неоднородность формируемой иерархии. При ее построении могут перемежаться основания декомпозиции, отражающие различные способы расчленения как самой системы и ее подсистем, так и окружающей среды. Причем к различным подцелям на одном уровне могут применяться различные основания декомпозиции. Отсутствие процедур согласования различных подцелей приводит к тому, что иерархия целей может содержать противоречивые цели.

Методология дерева целей может быть использована не только на этапах целеполагания и выработки решения для поиска способов достижения целей, но и на этапе анализа ситуаций для поиска причин возникновения проблемы. В этом случае вместо причинно-следственных связей между целями и средствами их достижения в дереве фиксируются причинно-следственные связи между проблемами и их причинами. Исходная проблема декомпозируется на ряд подпроблем, являющихся причинами ее появления. Каждая из выделенных подпроблем, в свою очередь, также может быть декомпозирована и т. д.

Процедура повторяется, пока не будут достигнуты коренные причины. Дерево необязательно должно иметь вид строгой иерархии, так как разные проблемы могут иметь одну и ту же причину.

На рис. 3.16 приведен пример дерева причин, описанный в [57] и отражающий причины неудовлетворенности клиентов работой сети пунктов проката видеокассет.



Рис. 3.16. Пример дерева причин

Как видно из рисунка, на втором уровне были выделены четыре причины недовольства клиентов: слишком долгое оформление; плохой ассортимент фильмов; невежливый и недружелюбный персонал; неудачное размещение пункта проката, плохая планировка помещения. Дальнейший поиск причин привел к определению коренных причин, которых оказалось всего две: низкая зарплата персонала и малый опыт менеджеров [57].

При построении дерева причин, как и при формировании дерева целей, также могут использоваться типовые основания декомпозиции. На использовании типовых категорий возможных причин возникновения рассматриваемой проблемы основан, в частности, метод построения диаграммы «рыбий скелет». Структура диаграммы действительно напоминает рыбий скелет (рис. 3.17). При этом анализируемая проблема изображается справа, у острия большой стрелки.



Рис. 3.17. Пример диаграммы «рыбий скелет»

Категории возможных причин представляются в виде ветвей, похожих на кости рыбьего скелета. Наименование категории помещается на конце «кости». Наиболее часто при анализе производственных процессов используются категории: исполнители (персонал); машины и оборудование; материалы, сырье и комплектующие; используемые методы и технологии; окружающая среда; управление и др. В рамках каждой категории выявляются все возможные причины, вызвавшие иссле-

дуюмую проблему. На диаграмме они размещаются вдоль соответствующей «кости».

На рис. 3.17 приведен пример диаграммы «рыбий скелет», описанной в [57] и отражающей причины дефектов в партиях насосов, обусловленных неточностью размеров двух валов, которые входят в конструкцию насоса. Для сложных систем может быть построено несколько подобных диаграмм, соответствующих разным подсистемам. В частности, в [57] описывается построение так называемой карты процесса, в которой для каждого этапа процесса формируется своя диаграмма причин.

### **3.3.3. Методология анализа иерархий**

Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Томасом Саати, использует методологию дерева целей, т. е. также основан на формировании иерархии целей и средств по типу слоев. Данный метод предназначен для выбора средств решения сложной многофакторной проблемы и состоит в декомпозиции цели на все более простые составляющие (подцели и средства) и дальнейшей оценке этих составляющих путем парных сравнений. В результате определяется численная оценка приоритетности элементов иерархии, используемая для выбора наилучших альтернатив решения исходной проблемы [27].

Основные этапы метода анализа иерархии:

- 1) иерархическое представление проблемы;
- 2) построение множества матриц парных сравнений;
- 3) определение векторов локальных приоритетов;
- 4) проверка согласованности полученных результатов;
- 5) вычисление глобальных приоритетов.

Рассмотрим подробнее содержание этапов.

**Иерархическое представление проблемы.** Как правило, иерархия строится с вершины — глобальной, с точки зрения решения проблемы, цели — через промежуточные уровни, от которых зависит цель, к нижнему уровню, который обычно является перечнем альтернатив. Предлагается следующий порядок следования уровней [27]:

- глобальная цель (фокус);
- акторы — группы лиц, заинтересованных в решении проблемы;
- цели акторов;
- политики акторов, с помощью которых могут достигаться выдвинутые ими цели;
- альтернативные сценарии, каждый из которых в той или иной мере реализует политики акторов.

На рис. 3.18 приведена иерархия для проблемы недостаточного развития технопарка — организации, занимающейся формированием современной инновационной среды. На первом уровне представлена глобальная цель — совершенствование деятельности технопарка; на втором — акторы (клиенты (организации и предприятия, пользующиеся услугами технопарка), органы власти, руководство технопарка и базовых предприятий, партнеры); на третьем — цели (требования) акторов, уровень политик которых в данной иерархии не представлен; на нижнем — альтернативные сценарии развития технопарка. Было разработано четыре сценария:

1) «Статус-кво», предполагающий, что деятельность технопарка не претерпит сколько-нибудь существенных изменений;

2) «Экспансия», предусматривающий резкое увеличение количества дочерних предприятий и ассортимента услуг, сопровождающееся увеличением материальной базы и численности персонала. Этот вариант требует крупных инвестиций. При этом неизбежен рост цен;

3) «Рост без существенных расходов», предполагающий в первую очередь увеличение объема услуг, не требующих существенных затрат. Упор делается на углубление маркетинга собственных услуг и активную рекламную политику. При этом происходит выравнивание в расходовании финансов: увеличение расходов на маркетинг и рекламу должно компенсироваться сокращением расходов на другие виды деятельности;

4) «Сокращение расходов», предполагающий сокращение уровня расходов и штатов, что должно привести к сокращению стоимости услуг. Однако при этом несколько сократится ассортимент услуг и число дочерних предприятий.



Рис. 3.18. Иерархия целей технопарка

В построенной иерархии связь между элементами прилежащих уровней означает, что элемент нижнего уровня влияет (воздействует) на элемент вышестоящего уровня. При этом элемент вышестоящего уровня называется *направляемым* по отношению к элементам нижестоящих уровней. Каждый элемент может влиять на несколько направляемых элементов. Так, в примере с развитием технопарка сценарии влияют на каждую из целей, представленных на предыдущем уровне.

### **Построение множества матриц парных сравнений.**

Элементы любого уровня сравниваются друг с другом относительно их воздействия на направляемый элемент. Для каждой совокупности элементов, связанных с одним вышестоящим элементом, строится матрица парных сравнений. В вышеописанном примере необходимо построить: одну матрицу, соответствующую второму уровню иерархии, для сравнения влияния акторов на глобальную цель; четыре матрицы, соответствующие третьему уровню, для сравнения различных целей каждого из четырех акторов; двенадцать матриц, соответствующих четвертому уровню, для оценки влияния сценариев на каждую из целей акторов.

Парные сравнения проводятся в терминах доминирования одного элемента над другим. Для проведения субъективных парных сравнений разработана шкала (табл. 3.2 [27]).

Помимо целых чисел от 1 до 9 используются и дроби. Если при сравнении одного элемента с другим получено одно из вышеуказанных чисел (например, 3), то при сравнении второго элемента с первым получим обратную величину (т. е.  $1/3$ ). По соглашению оценивается относительное превосходство элемента, соответствующего строке матрицы, над элементом, соответствующим столбцу. При этом если первый элемент оказывается важнее, то в ячейку матрицы заносится положительное целое (от 1 до 9); в противном случае — обратное число (дробь), т. е. симметричные ячейки заполняются обратными величинами. Относительная важность любого элемента, сравниваемого с самим собой, равна 1; поэтому диагональ матрицы содержит только единицы. Таким образом, для матрицы парных сравнений  $\|a_{ij}\|$  должны выполняться следующие условия:

1)  $1 \leq a_{ij} \leq 9$ , если  $i$ -й элемент важнее  $j$ -го или эквивалентен ему;

2)  $a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1$ .

Таблица 3.2

Шкала относительной важности

Оценка важности	Определение	Объяснения
1	Равная важность	Равный вклад двух элементов в цель
3	Умеренное превосходство	Опыт и суждения дают легкое превосходство одному элементу над другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство одному элементу над другим
7	Значительное превосходство	Одному элементу дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного элемента над другим подтверждается наиболее сильно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения	Применяются в компромиссном случае

На рис. 3.19 приведены матрицы парных сравнений, построенные для второго и третьего уровней иерархии целей технопарка (см. рис. 3.18). Матрицы составлены в соответствии с субъективными суждениями экспертов, оценивших относительную силу влияния различных акторов на глобальную цель и относительные важности целей каждого актора.

**Определение векторов локальных приоритетов.** На основе каждой из построенных матриц парных сравнений формируются наборы локальных приоритетов, отражающие относительные приоритеты (ценность, важность, силу влияния) сравниваемых элементов по отношению к направляемому элементу. Для этого нужно вычислить множество собственных векторов для каждой матрицы, а затем нормализовать результат к единице, получая тем самым вектор приоритетов.

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
$a_1$	1	2	1/2	4
$a_2$	1/2	1	1/3	3
$a_3$	2	3	1	6
$a_4$	1/4	1/3	1/6	1

$a$

	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$
$a_8$	1	1/3	2	4
$a_9$	3	1	5	7
$a_{10}$	1/2	1/5	1	3
$a_{11}$	1/4	1/6	1/3	1

$b$

	$a_5$	$a_6$	$a_7$
$a_5$	1	1/2	3
$a_6$	2	1	5
$a_7$	1/3	1/5	1

$v$

	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$
$a_{12}$	1	5	8
$a_{13}$	1/5	1	3
$a_{14}$	1/8	1/3	1

$z$

	$a_{15}$	$a_{16}$
$a_{15}$	1	5
$a_{16}$	1/5	1

$d$

Рис. 3.19. Матрицы парных сравнений:

$a$  — подцелей глобальной цели;  $b$  — целей органов власти;  
 $v$  — целей клиентов;  $z$  — целей руководства технопарка;  
 $d$  — целей партнеров

Задача вычисления собственных векторов довольно трудоемка, поэтому на практике часто используют приближенные методы. Одним из наилучших путей вычисления является *геометрическое среднее*. Его можно получить, перемножив элементы в каждой строке и извлекая корни  $n$ -й степени, где  $n$  — число элементов. Полученный таким образом столбец чисел нормализуется делением каждого числа на сумму всех чисел. Например, на основе матрицы, представленной на рис. 3.19,  $a$ , получим следующие компоненты собственного вектора для каждой из строк:

$$a_1 \text{ (клиенты)} — \sqrt[4]{1 \cdot 2 \cdot (1/2)} \approx 1,414;$$

$$a_2 \text{ (органы власти)} — \sqrt[4]{(1/2) \cdot 1 \cdot (1/3) \cdot 3} \approx 0,841;$$

$$a_3 \text{ (руководство технопарка)} — \sqrt[4]{2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 6} \approx 2,45;$$

$$a_4 \text{ (партнеры)} — \sqrt[4]{(1/4) \cdot (1/3) \cdot (1/6) \cdot 1} \approx 0,34.$$

Если теперь поделить каждую из полученных компонент на их сумму равную 5,045, то получим следующие нормали-

зованные приоритеты:  $a_1$  (клиенты) — 0,28,  $a_2$  (органы власти) — 0,167;  $a_3$  (руководство технопарка) — 0,485,  $a_4$  (партнеры) — 0,068.

Необходимо подчеркнуть, что если элемент иерархии влияет на несколько направляемых элементов, то он представлен в нескольких матрицах парных сравнений (по одной для каждого направляемого элемента) и для него будут рассчитаны приоритеты по каждой из этих матриц. Так, в примере с технопарком для сценариев, представленных на нижнем уровне, необходимо определить двенадцать локальных приоритетов по отношению к каждой из целей третьего уровня.

### **Проверка согласованности полученных результатов.**

При составлении матриц парных сравнений экспертные суждения не должны нарушать аксиомы упорядоченности. В частности, если один элемент лучше другого, а тот, в свою очередь, лучше третьего, то первый также должен быть лучше третьего, причем сила предпочтения первого элемента над третьим должна быть больше, чем первого над вторым и второго над третьим. Однако людям свойственно ошибаться. Поэтому матрицы парных сравнений, основанные на субъективных суждениях, могут быть несогласованными. Для оценки степени отклонения от согласованности используется так называемый индекс согласованности (ИС).

Индекс согласованности обратносимметричной матрицы парных сравнений вычисляется по формуле

$$\text{ИС} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1),$$

где  $n$  — размерность матрицы (число сравниваемых элементов);  $\lambda_{\max}$  — наибольшее собственное значение матрицы.

Наибольшее собственное значение может быть вычислено следующим образом. Сначала суммируется каждый столбец матрицы, затем сумма первого столбца умножается на величину первой компоненты нормализованного вектора приоритетов, сумма второго столбца — на вторую компоненту и т. д., затем полученные числа суммируются.

Чтобы судить о согласованности матрицы по вычисленному для нее индексу согласованности, нужно сравнить этот ИС с индексом, вычисленным для абсолютно не согласован-

ной матрицы, полученной при случайном выборе суждений. В табл. 3.3 приведены средние значения случайной согласованности для матриц различной размерности.

Таблица 3.3

Индексы согласованности для случайных матриц  
разного порядка

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка, будет получено отношение согласованности (ОС). Величина ОС должна быть порядка 10 % или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях допускается 20 %, но не более. Если ОС выходит из этих пределов, то следует проверить суждения и пересмотреть их.

Рассчитаем индекс согласованности и отношение согласованности для матрицы, приведенной на рис. 3.19, *a*. Наибольшее собственное значение матрицы:

$$\lambda_{\max} = (1 + \frac{1}{2} + 2 + \frac{1}{4}) \cdot 0,28 + (2 + 1 + 3 + \frac{1}{3}) \cdot 0,167 + (\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + 1 + \frac{1}{6}) \cdot 0,485 + (4 + 3 + 6 + 1) \cdot 0,068 = 4,028.$$

Тогда ИС =  $(4,028 - 4) / (4 - 1) = 0,009$ . Случайная согласованность для матрицы с размерностью 4 составляет 0,9 (табл. 3.3). Теперь можно определить отношение согласованности:  $ОС = 0,009 / 0,9 = 0,01$ . Величина  $ОС < 0,1$ . Таким образом, можно сделать вывод, что матрица согласована.

**Вычисление глобальных приоритетов.** На последнем шаге анализа локальные приоритеты пересчитываются с учетом приоритетов направляемых элементов.

Глобальные приоритеты рассчитываются, начиная со второго уровня вниз. Локальные приоритеты элементов второго уровня умножаются на приоритет глобальной цели. Однако, учитывая, что вес единственной цели самого верхнего уровня всегда равен единице, глобальные приоритеты элементов

второго уровня равны их локальным приоритетам. Для определения глобального приоритета элемента третьего уровня его локальный приоритет «взвешивается», т. е. умножается на глобальный приоритет направляемого элемента. Если направляемых элементов несколько, то находится сумма взвешенных приоритетов по всем направляемым элементам. Аналогичным образом определяются глобальные приоритеты элементов следующего уровня. Процедура продолжается до самого нижнего уровня.

В табл. 3.4 приведены данные для расчета глобальных приоритетов сценариев развития технопарка и результаты расчетов.

Таблица 3.4

Глобальные приоритеты направляемых элементов		Локальные приоритеты сценариев			
Элемент	Приоритет	«Статус-кво» ( $a_{17}$ )	«Экспансия» ( $a_{18}$ )	«Рост без существенных расходов» ( $a_{19}$ )	«Сокращение расходов» ( $a_{20}$ )
Ассортимент услуг ( $a_5$ )	0,0865	0,1066	0,5438	0,2921	0,0573
Качество и удобство ( $a_6$ )	0,1629	0,1333	0,5333	0,2666	0,0666
Низкие цены ( $a_7$ )	0,0306	0,2332	0,0506	0,1277	0,5883
Новые рабочие места ( $a_8$ )	0,0383	0,1212	0,5806	0,2317	0,0663
Рост налогооблагаемой базы ( $a_9$ )	0,096	0,1177	0,5265	0,3049	0,0508
Закрепление на рынках ( $a_{10}$ )	0,0222	0,1469	0,5136	0,2807	0,0586
Имидж региона ( $a_{11}$ )	0,0099	0,2009	0,5204	0,2009	0,0775
Прибыль ( $a_{12}$ )	0,3599	0,2224	0,1250	0,5761	0,0763
Снижение риска ( $a_{13}$ )	0,0887	0,5136	0,0586	0,2807	0,1469
Адаптивность ( $a_{14}$ )	0,0364	0,1093	0,2089	0,5723	0,1093

Окончание табл. 3.4

Глобальные приоритеты направляемых элементов		Локальные приоритеты сценариев			
Элемент	Приоритет	«Статус-кво» ( $a_{17}$ )	«Экспансия» ( $a_{18}$ )	«Рост без существенных расходов» ( $a_{19}$ )	«Сокращение расходов» ( $a_{20}$ )
Надежность ( $a_{15}$ )	0,0566	0,5261	0,1099	0,3010	0,0628
Стабильность ( $a_{16}$ )	0,0113	0,5806	0,0663	0,2317	0,1212
		Глобальные приоритеты сценариев			
		0,2253	0,2898	0,3919	0,0928

Для расчета глобального приоритета сценария его локальные приоритеты по отношению к каждому из направляемых элементов умножаются на соответствующие глобальные приоритеты этих элементов, затем полученные числа складываются. Например, для сценария «Статус-кво» производятся следующие расчеты:

$$0,1066 \cdot 0,0865 + 0,1333 \cdot 0,1629 + 0,2332 \cdot 0,0306 + \\ + 0,1212 \cdot 0,0383 + 0,1177 \cdot 0,096 + 0,1469 \cdot 0,0222 + \\ + 0,2009 \cdot 0,0099 + 0,2224 \cdot 0,3599 + 0,5136 \cdot 0,0887 + \\ + 0,1093 \cdot 0,0364 + 0,5261 \cdot 0,0566 + 0,5806 \cdot 0,0113 = 0,2253.$$

Как видно из табл. 3.4, наилучшим сценарием, получившим наибольший глобальный приоритет, стал «Рост без существенных расходов».

### Контрольные вопросы и задания

1. Каково назначение системного анализа, его основная цель?
2. Как определяется системный анализ с практической, методической и методологической сторон?
3. Каковы основные принципы системного анализа?
4. Перечислите и охарактеризуйте основные этапы системной последовательности принятия решений.
5. Чем отличаются различные варианты системной последовательности?
6. Какие виды анализа выполняются на этапе анализа ситуации?

7. Каковы закономерности целеобразования? Каким образом они учитываются на этапе постановки целей?
8. Какие методы, используемые на этапе выработки решений для генерирования альтернатив, их оценки и выбора, вы знаете?
9. Каковы основные стратегии иерархического принятия решений?
10. Какие виды работ выполняются на этапах реализации решений и оценивания результатов?
11. В чем суть метода мозговой атаки (мозгового штурма)? Каковы принципы ее проведения?
12. В чем состоит метод Дельфи?
13. Какие эвристические приемы изобретательской деятельности вы знаете?
14. В чем сущность структурного анализа?
15. Перечислите основные шаги процесса декомпозиции, предусмотренные методологией ИСМ.
16. Как составляется содержательное описание подсистем в методологии ИСМ?
17. Каким образом в методологии ИСМ на основе декларативного дерева системы формируются дерево целей и дерево вариантов?
18. Каковы основные элементы IDEF0-модели?
19. Что содержит контекстная IDEF0-диаграмма? Как формируется диаграмма декомпозиции? Как связаны диаграммы в рамках одной IDEF0-модели?
20. Какие существуют типы связей между блоками одной IDEF0-диаграммы?
21. В чем сущность, достоинства и недостатки логического анализа?
22. Как формируется дерево целей с помощью стандартных оснований декомпозиции?
23. Каковы основные принципы построения дерева целей?
24. Как формируются дерево причин и диаграмма «рыбий скелет»?
25. Каковы основные этапы метода анализа иерархий?
26. Каковы типовые уровни иерархического представления проблемы в методе МАИ?
27. Каким образом формируются матрицы парных сравнений в методе МАИ? Как определяется согласованность матриц?
28. Как рассчитываются локальные и глобальные приоритеты в методе МАИ?

## 4. ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

### 4.1. Понятие технологии системного анализа

Системный анализ можно рассматривать как процесс проектирования проблеморазрешающей системы, создаваемой для решения некоторой сложной проблемы. Данный процесс включает этапы анализа проблемосодержащей системы, выявления целей всех заинтересованных сторон, синтеза системы мер для устранения проблем и достижения целей, а также создания комплексов (нормативно-правового, организационного, информационного и т. д.), обеспечивающих реализацию разработанных мер [60, 61].

Несмотря на общепризнанную целесообразность применения системного анализа для разрешения сложных проблем, масштабы реального, а не просто декларируемого использования аппарата системного подхода невелики [62]. Основной причиной является *сложность* самого процесса системного анализа. Выделяют три группы факторов сложности, связанные с тремя составляющими — объектом системного анализа, средой и субъектом. Объектом в данном случае является исходная проблематика, средой — условия возникновения проблем и их разрешения, субъектом — разработчик, осуществляющий анализ и поиск средств разрешения проблем (рис. 4.1).

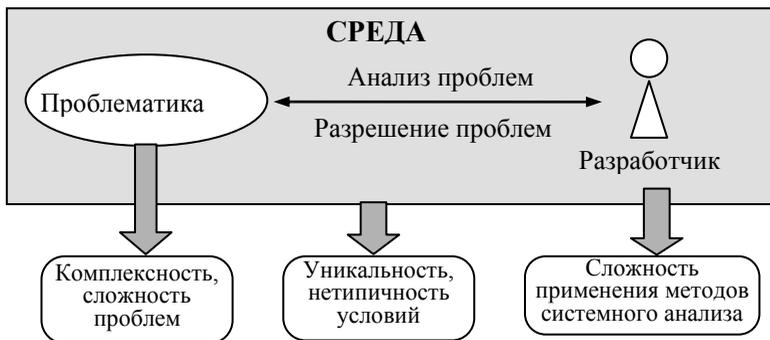


Рис. 4.1. Факторы сложности процесса системного анализа

**Факторы, связанные с объектом.** Это, прежде всего, комплексность, сложность проблем. Большинство проблем, разрешаемых с помощью системного анализа, затрагивают различные аспекты деятельности — технический, экономический, социальный, экологический и т. д. Заметной тенденцией последнего времени является усложнение проблем, перерастание их в проблематику, т. е. в сплетение, клубок неразрывно связанных проблем [2].

**Факторы, связанные со средой.** Это уникальность, нетипичность условий. Многообразие проблем обусловлено разнообразием условий их возникновения и целей, выдвигаемых заинтересованными сторонами, имеющихся ресурсов, используемых инструментальных программных средств и др.

Предположение о возможности создания технологии синтеза проблеморазрешающих систем, применимой к достаточно широкому кругу проблем, базируется на том основании, что при их проектировании, особенно на начальных стадиях, на первый план выходят общесистемные задачи, в которых «главенствующими являются информационные, реляционные и структурные аспекты, в то время как тип сущностей, образующих систему, имеет значительно меньшее значение» [12].

**Факторы, связанные с субъектом.** Это сложность применения методов системного анализа. Трудности, испытываемые разработчиком, прежде всего связаны со слабой формализованностью, «рыхлостью» методов системного анализа, требующих творческого осмысления и применения. Эффективность использования методов во многом зависит от опыта и квалификации разработчика, которому приходится сочетать множество различных методов, имеющихся в арсенале системного анализа, привлекать методы из других отраслей науки. и кроме того, оперировать нечеткой и неполной информацией, использовать экспертные знания, накопленные системными аналитиками, и собственный опыт и интуицию.

Системная технология призвана **стандартизировать и регламентировать** процесс выработки средств решения сложной проблемы и в конечном итоге облегчить данный процесс, уменьшить трудозатраты на его осуществление и повысить качество принимаемых решений.

Термин «*технология*» (от греч. *techné* — «искусство, мастерство, умение» и *logos* — «понятие, учение») широко используется в производственной сфере. При этом под технологией понимается последовательность согласованных технологических операций в процессе производства продукции. Системная технология является *информационной технологией*, т. е. организованной совокупностью методов обработки информации. В отличие от теории, она основана на четко организованных процессах и предполагает наличие конкретных рекомендаций относительно последовательности этапов разработки, состава работ и используемых процедур, методов и моделей [62]. Особую роль при этом играет автоматизация. Использование компьютерных инструментальных систем поддержки может значительно повысить эффективность разработки за счет автоматизации рутинных операций, контроля ошибок, использования типовых фрагментов моделей, систематизации накапливаемой в процессе разработки информации, возможности проведения экспериментов на моделях и т. д.

Таким образом, можно выделить три основных составляющих информационной технологии: регламент (руководящие указания по составу этапов и их последовательности); методы (методы формирования моделей и поиска оптимальных решений), используемые на различных этапах системного анализа; инструментальные средства сопровождения.

И хотя, по признанию многих авторов, универсальная общесистемная технология для проектирования сложных систем любой природы, еще не создана, основы такой технологии, несомненно, фактически уже существуют [62]. Кроме того, создаются и находят широкое применение специализированные системные технологии, ориентированные на конкретные виды систем. В настоящее время наиболее развиты автоматизированные технологии разработки информационных систем (CASE-технологии), бизнес-систем (технологии реинжиниринга бизнес-процессов) и технических систем (САПР-технологии). Идеи и принципы, заложенные в эти технологии, а также конкретные методы и модели, несомненно, могут быть использованы при создании общесистемной информационной технологии.

## 4.2. Специализированные технологии системного анализа

### 4.2.1. CASE-технологии разработки информационных систем

CASE-технологии представляют собой совокупность методологий проектирования и сопровождения информационных систем (ИС) на всем их жизненном цикле, поддерживаемую комплексом взаимосвязанных CASE-средств. В основе регламента различных технологий разработки ИС лежит понятие жизненного цикла системы, отражающее укрупненные этапы ее создания и эксплуатации. Традиционно выделяются следующие основные этапы жизненного цикла: анализ требований; проектирование; реализация (программирование); тестирование и отладка; эксплуатация и сопровождение. В разное время и в разных «школах» разрабатывались более детальные технологии. При этом разбиение работ на этапы и их названия менялись. Соответствующие технологии организации работ рекомендовались официально, фиксировались в стандартах (ГОСТы, ANSI, ISO) и во многих отраслях широко использовались. Несмотря на все различия технологий можно выделить этапы, общие для большинства методик [63]: формирование требований; разработка концепции; техническое задание; эскизный проект; технический проект; рабочая документация; ввод в действие; сопровождение.

Если состав этапов и их назначение в течение последних десятилетий менялись незначительно, то схема их применения, порядок следования этапов и организация работ менялись кардинально. Традиционная схема, используемая в 1970-е и в начале 1980-х гг., называемая **каскадной (водопадной) моделью**, предполагает строгое детерминированное следование этапов анализа, проектирования, реализации, внедрения и эксплуатации ИС по единому, заранее разработанному плану (рис. 4.2, а) [63, 64]. Такая схема, обладая определенными преимуществами (детерминированность, логичность, простота), имеет и существенные недостатки, главный из которых заключается в

том, что схемой не предусмотрена корректировка ранее принятых решений. Зачастую заказчики и будущие пользователи не могут сразу определить полный список требований к будущей системе. Отсутствие возможности уточнения требований по мере получения результатов приводит к тому, что цели автоматизации не достигаются в полной мере.

Существенно сглаживает недостатки каскадной модели **спиральная схема**, получившая распространение в 1980-х гг. [63, 64]. Характерной особенностью данной модели является непрерывный процесс разработки и развития ИС с планируемыми точками передачи в эксплуатацию новых версий и новых функциональных блоков. Разработка проекта ведется как бы по спирали, на каждом витке которой создается очередная версия. Виток спирали представляет собой законченный проектный цикл по типу каскадной схемы, т. к. предполагает последовательное выполнение всех этапов от анализа до внедрения (рис. 4.2, б). Такой подход обеспечивает на каждом витке уточнение требований к системе, однако сроки разработки готового продукта по сравнению с каскадной схемой удлиняются, а затраты существенно возрастают.

В конце 1980-х гг. сложился новый подход, названный **макетной схемой**, или **схемой быстрого прототипирования** (rapid prototyping) [63, 64]. Последовательность этапов в данной модели внешне выглядит как каскадная, однако содержание технологических этапов таково, что многие проектные решения в процессе разработки ИС подвергаются многократным уточнениям и корректировкам, как это предусмотрено спиральной моделью. Такой компромисс достигается за счет создания на различных этапах разработки системы вместо законченных прототипов макетов, представленных хотя бы и на бумаге, оперативно проверяемых и обсуждаемых со всеми заинтересованными сторонами (будущими пользователями, заказчиками и т. д.). По результатам обсуждений макетов при необходимости принимается решение о возврате на любой из предыдущих этапов с целью корректировки принятых решений (рис. 4.2, в). Макеты, представленные на ранних этапах в виде грубых концептуальных моделей, постепенно уточняются, детализируются.

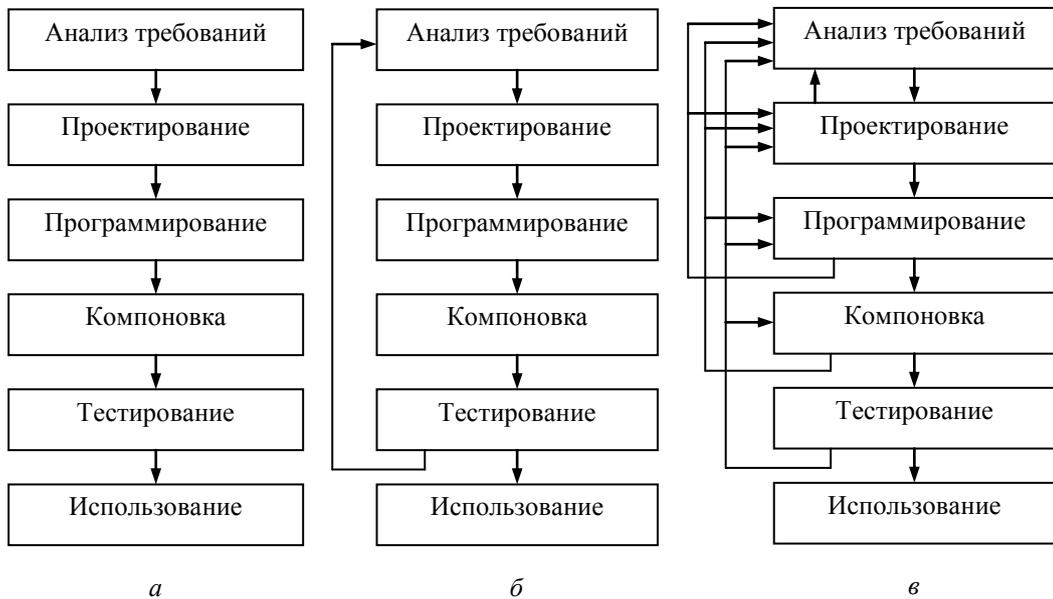


Рис. 4.2. Схемы разработки информационных систем:  
*а* — каскадная; *б* — спиральная; *в* — макетная

По мере развития технологий разработки ИС изменялись не только технологические схемы выполнения процесса, но и используемые методы и процедуры. Первоначально создание программных продуктов сводилось к разработке алгоритмов и кодированию их в виде программных строк. Постепенно с усложнением задач автоматизации появился целый ряд новых принципов разработки крупномасштабных систем: нисходящее проектирование, структурное программирование, модульное конструирование, сквозной структурный контроль и др. Появилось множество методологий структурного анализа и проектирования. Наибольшее распространение получили следующие методы: SADT (Structured Analysis and Design Technique), DFD (Data Flow Diagrams), ERD (Entity-Relationship Diagrams), STD (State Transition Diagrams) [65]. Наиболее существенным обстоятельством явилось осознание того факта, что процесс написания программы (кодирование) может быть отделен от процесса проектирования структуры программы. На первый план выходят методы моделирования, используемые на ранних этапах проектирования — от разработки концептуальных представлений и основных принципов построения будущей системы до определения способов ее программной реализации.

Эта тенденция еще более усилилась с появлением и широким распространением объектно-ориентированного программирования (ООП). В ООП программа строится на основе объектов. *Объект* (object) объединяет в одну структуру совокупность данных (атрибутов, описывающих характеристики объекта) и процедур (операций, выполняемых объектом). Может быть создано множество объектов одинакового типа, поэтому описание типа однородных объектов (состава атрибутов и процедур) называется *классом*. Каждый конкретный объект является экземпляром класса и отличается собственными значениями атрибутов.

Самым замечательным свойством классов является возможность на основе одних классов создавать другие (наследовать) путем добавления новых атрибутов и методов, а также переопределения методов. В определении класса-потомка приводятся только новые атрибуты/методы и переопределен-

ные методы, атрибуты и методы предка наследуются «автоматически». Таким образом, классы никогда не переписываются, они только расширяются и переопределяются. Это произвело революцию в программировании, так как позволило создавать программу из готовых «кирпичиков» — библиотечных объектов. Для различных языков программирования были созданы библиотеки стандартных классов, содержащие классы стандартных визуальных компонентов — окон, меню, списков выбора, командных кнопок, кнопок выбора и т. д. Библиотечные классы компонентов, построенные на принципах прямого манипулирования, «умеют» в ответ на манипуляции пользователя мышью или ввод с клавиатуры совершать стандартные действия — вызывать соответствующие методы.

Появились средства «визуального» программирования или средства быстрой разработки приложений (RAD — Rapid Application Development), с помощью которых программист создает большую часть программы путем манипулирования мышью (передвигая на экране визуальные компоненты) и ввода свойств компонентов — соответствующий программный код генерируется автоматически. Внимание программистов переключилось с непосредственного написания программного кода на предшествующие этапы — анализ требований к будущей программе, анализ конкретной предметной области, для которой разрабатывается программа, построение концептуальной модели системы.

Эти обстоятельства привели к появлению специальной методологии проектирования информационных систем, получившей название объектно-ориентированного анализа и проектирования (ООАП), основная тенденция развития которой состоит в интеграции различных методов, обусловившей создание унифицированного языка моделирования UML (Unified Modeling Language) [48, 66]. Использование UML наиболее соответствует макетной схеме разработки программы, так как позволяет формировать совокупность связанных моделей (диаграмм), отражающих различные представления о системе, начиная от исходной диаграммы, представляющей собой наиболее общую концептуальную модель системы, заканчивая диаграммой,

отражающей представление физических компонентов. Регламентирующая процедура проектирования ИС на основе UML получила название Rational Unified Process — RUP.

Эволюция инструментальных средств проектирования ИС явилась естественным продолжением эволюции всей отрасли средств разработки программного обеспечения. Современный рынок CASE-средств насчитывает сотни продуктов, обеспечивающих автоматизацию практически всех этапов жизненного цикла от анализа предметной области и определения требований до программирования и сопровождения. Так, средства верхнего уровня (Upper) позволяют формировать функциональную модель предметной области и проектируемой системы. Средние (Middle) CASE поддерживают проектирование спецификаций и структуры информационной системы. Средства нижнего (Lower) уровня поддерживают разработку программного обеспечения, включая автоматическую генерацию программного кода, тестирование, управление конфигурацией и т. д.

Для современных CASE-средств характерно стремление к объединению традиционных и новейших средств моделирования, используемых на разных этапах и разными специалистами, для обеспечения тесного взаимодействия всех участников проекта — менеджеров, бизнес-аналитиков, системных аналитиков, администраторов баз данных, разработчиков. С этой целью создаются системы групповой разработки крупных проектов — хранилища моделей, к которым открыт доступ для участников проекта. Кроме того, подобные системы позволяют формировать библиотеки стандартных решений, включающие наиболее удачные фрагменты реализованных проектов, накапливать и использовать типовые модели, объединяя их при необходимости «сборки» больших систем.

#### **4.2.2. Технологии реинжиниринга бизнес-процессов**

Идеи CASE-технологий проектирования программных продуктов оказали значительное влияние на технологии проектирования и перепроектирования бизнес-систем. Это свя-

зано с тем, что процесс создания автоматизированной системы управления предприятием предусматривает в качестве предварительного этапа создание модели деятельности данного предприятия. Поэтому в рамках CASE-технологий активно развивались средства моделирования бизнес-процессов. Формируемая с помощью данных средств модель бизнеса, однако, может рассматриваться не только как реализация начальных шагов для проекта ИС, но и как основа для перепроектирования самого бизнеса.

Термин «реинжиниринг бизнес-процессов» (BPR — Business process reengineering) трактуется в настоящее время двояко. Узкое определение ввел М. Хаммер, который определил реинжиниринг как «фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование деловых процессов для достижения резких, скачкообразных улучшений в решающих современных показателях деятельности компании, таких как стоимость, качество, сервис и темпы» [67]. При более расширенном толковании под реинжинирингом понимается не только радикальное перепроектирование, но и постепенная реорганизация деятельности предприятия. Технология BPR включает четыре основных этапа (рис. 4.3):

- 1) визуализацию — разработку образа будущей компании, создание спецификации целей реинжиниринга;
- 2) обратный инжиниринг — создание модели существующего бизнеса, анализ построенной модели;
- 3) прямой инжиниринг — разработку модели нового бизнеса и систем поддержки (системы управления, информационной системы);
- 4) внедрение перепроектированных процессов.

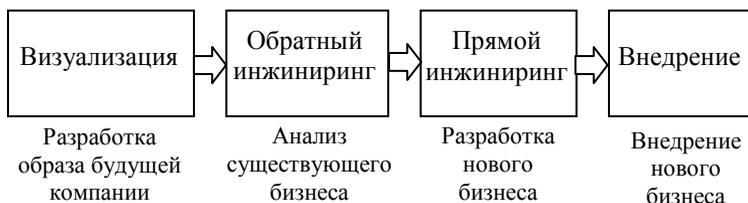


Рис. 4.3. Последовательность проведения реинжиниринга

Кроме перечисленных основных этапов предусматривается и подготовительный этап — создание системы управления процессом реинжиниринга.

В основном регламент проведения реинжиниринга соответствует системной последовательности принятия решений: визуализация соответствует этапу постановки целей; обратный инжиниринг — этапу анализа ситуации; прямой инжиниринг — этапу выработки решений; внедрение — этапу реализации решений системной последовательности.

Для проекта по реинжинирингу рекомендуется использовать спиральную или макетную схему. Необходимость итеративной разработки обусловлена сложностью реинжиниринга. Основной причиной корректировки решений, принимаемых в ходе выполнения реинжиниринга, является то, что цели проекта до начала разработки никогда не удается сформулировать окончательно ясно. Кроме того, некоторые цели, запланированные в начале работы над проектом, оказываются нереалистичными и не могут быть достигнуты [68].

Основным средством реинжиниринга является моделирование бизнес-процессов. На этапе обратного инжиниринга строится модель существующего бизнеса — модель «как есть» («As is»), отражающая текущее состояние системы. На этапе прямого инжиниринга строится модель нового бизнеса — модель «как должно быть» («To be»), отражающая проектируемое состояние.

В процессе создания модели существующего или нового бизнеса, как правило, формируется не одна, а целая серия взаимосвязанных моделей. Сначала строится так называемая внешняя (прецедентная) модель, описывающая основные бизнес-процессы, функции (шаги процессов), окружающую среду и взаимодействие процессов с этой средой. На основе внешней модели строится внутренняя (объектная) модель, описывающая структурные элементы, участвующие в реализации бизнес-процессов (ресурсы, средства деятельности, продукцию, исполнителей), а также их взаимодействие [68, 69].

Спектр методов моделирования довольно широк. Выделяют классы методов функционального, функционально-стоимостного, информационного и динамического (имитационного)

моделирования [68, 69]. Наиболее распространенными методами формирования функциональных моделей являются IDEF0, DFD. К методам функционально-стоимостного анализа, прежде всего, относятся ABC, ABB, ABM, ARP. Из средств информационного моделирования выделяются IDEF1X, ERD. Среди методов динамического моделирования можно выделить CPN (раскрашенные сети Петри), STD (диаграммы переходов состояний). Все большую популярность приобретают объектно-ориентированные методы моделирования благодаря предоставляемым ими возможностям повторного использования типовых элементов, объединения в одном описании статических и поведенческих свойств, простоте внесения изменений. Среди объектно-ориентированных методов имеются методики и функционального, и информационного, и динамического моделирования.

Одной из заметных тенденций последнего времени является стремление к интеграции различных методов моделирования в единую методологию, позволяющую последовательно строить связанные друг с другом модели, отражающие различные аспекты проектируемой системы. Примером может служить и методология IDEF, объединяющая методы моделирования функций системы, структур данных и поведения системы, и уже упоминавшийся язык объектного моделирования UML, объединяющий методики построения восьми видов диаграмм (вариантов использования, классов, деятельности, кооперации, последовательности и т. д.), и методология ARIS, объединяющая методы построения четырех типов моделей (организационной, функциональной, информационной и модели управления).

Тенденция к интеграции прослеживается и в разработке инструментальных средств поддержки. Все большую популярность приобретают многофункциональные интегрированные средства, предоставляющие широкий спектр возможностей от построения статических функциональных диаграмм до имитационного моделирования и использования методов инженерии знаний. Примерами таких средств являются системы ARIS (IDS Scheer), SPARKS (Coopers & Lybrand), G2 (Gensym) [68]. Как правило, они построены по «каркасной»

технологии и включают базовое инструментальное средство, на основе которого создается множество проблемно-ориентированных расширений.

### **4.2.3. Технологии проектирования технических систем**

Современные технологии проектирования сложных технических объектов на основе систем автоматизированного проектирования (САПР) охватывают весь цикл разработки изделий — от выработки концепции до создания опытного образца и запуска его в производство. Как правило, выделение проектных работ связано с использованием блочно-иерархического подхода [70]. При этом выделяют уровни, связанные с различными аспектами проектирования (функциональным, конструкторским, технологическим), каждый из которых подразделяется на уровни, связанные с иерархией описаний объекта по степени детальности отражения его свойств. Переход от уровня к уровню может осуществляться по двум основным направлениям — нисходящему или восходящему. Соответственно используется либо нисходящая (top-down, дедуктивная) стратегия с последовательной детализацией свойств объекта, либо восходящая (bottom-up, индуктивная) с последовательным агрегированием свойств. Однако наиболее эффективной стратегией, как отмечается в [70], является дуальная концепция, синтезирующая обе основные стратегии, включающая возможности итеративных возвратов на предыдущие уровни и предоставляющая конструктору широкую палитру возможностей по выбору методов решения задачи проектирования. Процесс проектирования, таким образом, представляется как совокупность итерационных циклов анализа и синтеза.

Еще одна современная тенденция — интеграция модельных представлений об объекте проектирования. В 1980-е гг. САПР основывались на обработке геометрических моделей с использованием специальных средств, основу которых составляли методы начертательной и аналитической геометрии.

В настоящее время информация, описывающая объект, должна включать в себя данные не только о пространственно-размерных связях, но и об информационных, временных, экономических связях. Сегодня акцент ставится на компьютерное сохранение и использование полной информации об объектах на протяжении всего цикла проектирования и изготовления. Информация базируется на электронной модели объекта, возможности которой позволяют получать как комплект традиционных чертежей, так и применять ее для компьютерного моделирования сборки, обработки деталей и т. д. [71, 72].

Такой подход позволил изменить и архитектуру современных САПР, сделав ее более гибкой. САПР все чаще стали называть системами автоматизации поддержки инженерных решений (САПИР). В традиционных системах автоматизированного проектирования все ноу-хау сконцентрированы в программах, а не в данных, с которыми они работали. Для того чтобы решить новую задачу следовало разработать новое приложение с новой моделью данных. Согласно современным воззрениям центральное место САПИР занимает база данных, вокруг которой средствами компьютерного моделирования реализуются функциональные действия. Структуры данных должны быть открытыми и способными к эволюции. При этом обработка данных зачастую осуществляется не на основе готовых алгоритмов, а на основе правил и рекомендаций, в которых зафиксирован достигнутый промышленный опыт проектирования на уровне конструкций объектов в целом, на уровне отдельных узлов и деталей [72].

Характерными особенностями решения задач компьютерного проектирования сложных технических объектов в настоящее время являются: использование знаний и опыта пользователя и экспертов-проектировщиков; привлечение разнородной справочной информации из разнообразных источников; принятие решений на основе неполных, а иногда и противоречивых сведений. Анализ этих особенностей показывает, что создание промышленно тиражируемых САПИР с учетом пожеланий пользователя средствами традиционной технологии программирования, ориентированной в основном на работу с алгоритмами и множествами данных в терминах универсальных

языков программирования, практически достигло своего предела. Важнейшим достижением новой информационной технологии является переход от использования универсальных языков программирования к языкам спецификаций, к принципам объектно-ориентированного подхода [71, 72].

Архитектура систем нового поколения должна быть открытой с тем, чтобы пользователь мог самостоятельно адаптировать САПИР под свои цели. Эта адаптация может подразумевать различные корректировки в системе — пополнение базы данных новой нормативно-справочной информацией, расширение функциональных возможностей, пополнение понятийной модели. Именно пользователь отбирает типовые решения, формирует словари понятий, специфицирует действия в типовых ситуациях, реализует графические прототипы чертежей к ним для многократного использования. «Каркас» системы в виде некоторой инвариантной программной оболочки предоставляет базовые средства для разработки и развития приложений, ориентированных на проектирование конкретных технических объектов. Наличие такой повторно используемой оболочки позволяет резко снизить себестоимость создания прикладной системы [71, 72].

### **4.3. Объектно-ориентированная технология системного анализа**

#### **4.3.1. Принципы разработки технологии**

Такие факторы сложности процесса системного анализа, как комплексность и сложность решаемых проблем, многообразие и нетипичность условий проведения анализа (целей заинтересованных сторон, имеющихся ресурсов и инструментальных средств, опыта разработчиков), слабая формализуемость используемых методов, определяют требования, предъявляемые к основным компонентам системной технологии.

##### **Требования к регламенту:**

- гибкость, простота адаптации, настройки на конкретную предметную область;

- универсальность и высокая степень обобщенности, создающие возможность применения для разрешения разнообразных проблемных ситуаций.

#### **Требования к методологии моделирования:**

- наглядность и обозримость формируемой модели проблемосодержащей (проблеморазрешающей) системы;
- использование при построении моделей опыта экспертов.

#### **Требования к инструментальным средствам:**

- открытость и интегрируемость;
- возможность расширения, а также сопряжения с другими приложениями, реализующими различные методики.

Для удовлетворения перечисленных требований предлагаются следующие принципы создания системной технологии.

**1. Принцип декларативности:** регламент должен предписывать вид декларативной модели, формируемой на каждой стадии, и совокупность методов, используемых для ее построения и принятия решений на модели. Выдвижение данного принципа обусловлено требованием универсальности, обобщенности регламента, вызванным многообразием исходной проблематики и проблеморазрешающей системы. Эти особенности не позволяют представить регламент в виде подробного и исчерпывающего алгоритма, на каждом шаге которого предписывается выполнение однозначно определенной операции. Даже если удастся для некоторой узкой проблемной области создать такой алгоритм, очевидно, что он будет очень сложным, громоздким, содержащим множество проверок, условных переходов, рекурсий. Изменение, настройка такого алгоритма потребует значительных усилий.

Для описания процесса разработки предлагается вместо алгоритма использовать последовательность указаний о видах представления результатов каждого этапа и процедурах, которые могут быть при этом использованы. Причем для различных классов проблеморазрешающих систем может быть рекомендован свой набор процедур. Такой подход более гибок и адаптивен. Вместо единой процедуры аналитику предлагается широкий арсенал различных самостоятельных процедур, которые он может применять в зависимости от того, какая методика для данной конкретной системы (подсистемы)

является наиболее подходящей с учетом ранее полученных результатов. Разработчик сам строит сценарий выработки решений, руководствуясь лишь достаточно общим регламентом. При этом декларативная модель, с одной стороны, представляет в наглядной обозримой форме результат применения процедур, с другой стороны, служит исходной информацией для применения процедур. Различные методики используют модель как своего рода доску объявлений, с которой они считывают необходимую информацию и добавляют новую.

Принцип декларативности существенно облегчает автоматизацию. Представление декларативных знаний в виде модели, т. е. без преобразования в алгоритм, программу, более компактно, наглядно. Модель, в отличие от программы, достаточно легко изменять, настраивать. Модельное представление позволяет использовать слабо формализуемые, «рыхлые» методики, поскольку вся «рыхлость», семантика отображается в моделях, процедуры при этом не содержат никакой семантики, они просто умеют работать с моделями, представленными на специальном языке.

На рис. 4.4 приведены три схемы автоматизированной разработки проблеморазрешающей системы. Алгоритмическая схема (рис. 4.4, *а*) предполагает, что последовательность преобразований исходной информации  $I$  в конечное описание  $R$  воплощена в некоторый единый универсальный алгоритм  $F$ , выполняемый ИС. Разработчику необходимо реализовать лишь процедуру сбора информации  $D$  и реализации готового проекта  $W$ . Схема идеальна с точки зрения снижения трудоемкости процесса разработки, однако при сложных многофакторных проблемных ситуациях практически нереализуема.

Модельная схема (рис. 4.4, *б*) предполагает формирование декларативной модели  $M$  проектируемой системы с помощью инструментального средства. Инструментарий содержит процедуры построения модели  $F_M$ , используемые разработчиком в интерактивном режиме для формирования модели системы «как есть» (*As is*) или «как должно быть» (*To be*). Непосредственно же принятие решений (с помощью соответствующих процедур  $F_P$ ) осуществляется самим разработчиком.

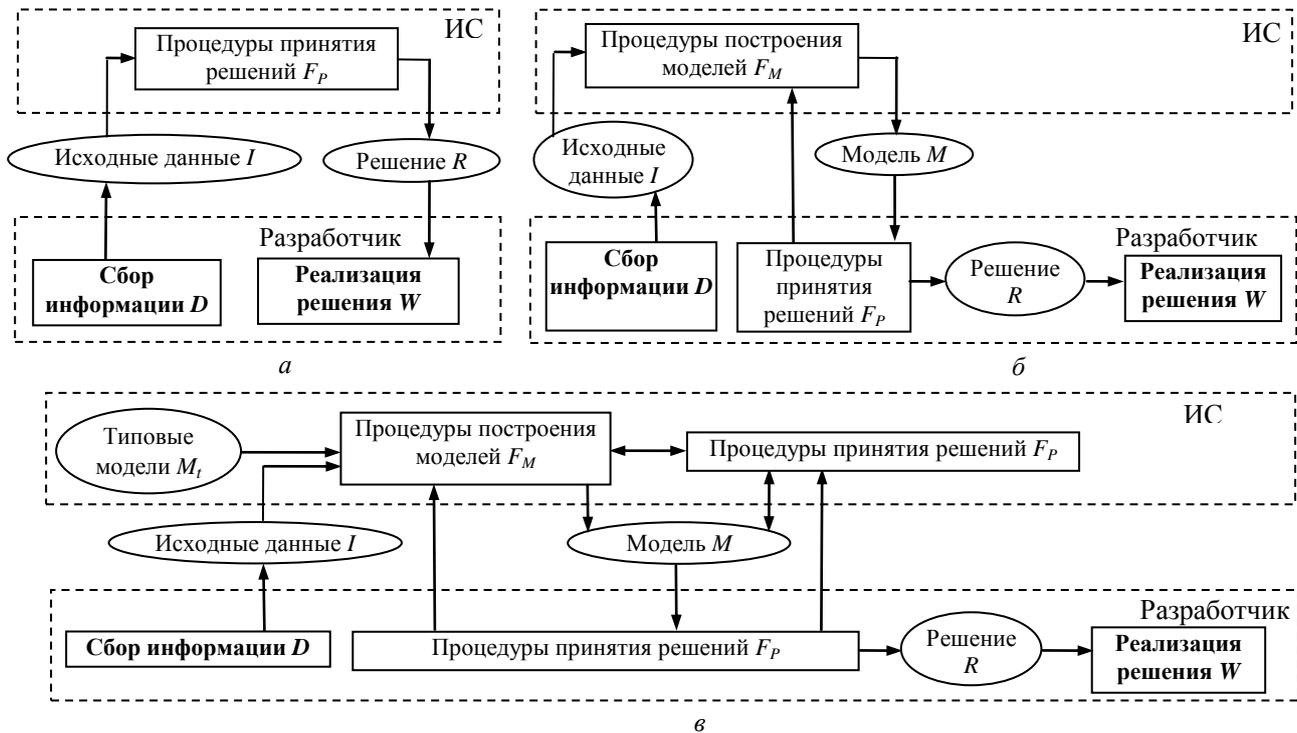


Рис. 4.4. Схемы автоматизированной разработки проекта: *а* — алгоритмическая; *б* — модельная; *в* — гибридная

При использовании данной схемы трудоемкость разработки для разработчика снижается не столь уж существенно, так как информационная система содержит лишь средства представления (описания, визуализации) модели, реализованные, как правило, в виде некоторого редактора.

Компромиссом между стремлением максимально автоматизировать процедуру разработки и сложностью ее алгоритмизации является использование гибридной схемы (рис. 4.4, в). Инструментальная система, построенная по принципу систем поддержки, вместо единой процедуры содержит библиотеку процедур, которые наряду с неавтоматизированными процедурами принятия решений из общей совокупности процедур  $F_P$  могут использоваться на различных этапах разработки проблеморазрешающей системы. Декларативная модель  $M$  служит интегрирующим звеном для множества процедур. Подсистема моделирования  $F_M$  инструментального средства позволяет разработчику формировать модель, используя при этом библиотеку типовых моделей  $M$ , и библиотеку процедур  $F_P$ .

**2. Принцип иерархичности:** разработка проблеморазрешающей системы должна осуществляться на разных уровнях абстрагирования с использованием иерархического подхода.

Традиционной для задач проектирования сложных систем является проблема выбора между холизмом и редуccionизмом. При большом количестве подсистем и сложности взаимосвязей между ними детальная разработка всех элементов сложной системы без предварительного принятия обобщенных решений на уровне системы в целом делает процесс проектирования чрезвычайно длительным. Учитывая множественность вариантов каждой из подсистем, задача согласования вариантов и выбора оптимальной комбинации, удовлетворяющей ограничениям, становится слишком сложной.

Принцип иерархичности предполагает рассмотрение системы и любой ее подсистемы, с одной стороны, как некоего целостного объекта, описываемого набором свойств, характеристик и выполняемых им действий, а с другой стороны, как совокупности более мелких компонентов (подсистем, элементов), взаимодействующих между собой. Таким образом, мы можем говорить о двух модельных представлениях сис-

темы (подсистемы): в виде объектной (атрибутивной) модели, представляющей собой описание эмерджентных свойств и поведения, и в виде компонентной модели, отражающей состав более мелких компонентов и отношений между ними. Первое представление соответствует модели «черного ящика», второе — модели структуры. Таким образом, модель системы должна представлять собой множество иерархически связанных объектных моделей отдельных компонентов.

В качестве основы, каркаса модели системы предлагается использовать стратифицированную иерархию в виде дерева подсистем. Выделение подсистемы осуществляется в соответствии с тем, *что* (какую функцию) она должна выполнять. *Как*, т. е. каким способом подсистема выполняет данную функцию, определяется моделью подсистемы, которая включает в себя отдельные элементы, участвующие в процессе, описание свойств, характеристик этих элементов и описание признаков и свойств всего процесса. Для каждой подсистемы таким образом формируется классификатор атрибутов. Данный подход позволяет объединить два типа моделей, называемых в CASE-технологиях соответственно функциональной и информационной, а в реинжиниринге бизнес-процессов — прецедентной и объектной.

Множество атрибутов модели подсистемы образует пространство поиска решений. Различным комбинациям значений атрибутов соответствуют различные состояния или варианты реализации подсистемы. Зависимости между атрибутами могут быть отражены в виде графа типа дерева целей, когнитивной карты, сценария. Для генерации альтернативных вариантов, их оценки и выбора оптимального варианта могут использоваться методы теории выбора, различные сценарные методы, а также методы инженерии знаний.

Организация иерархического принятия решений предусматривает согласование решений, принимаемых на уровне отдельных подсистем, друг с другом и решениями на модели материнской системы. На верхнем уровне иерархии выбирается стратегия достижения глобальной цели, рассматриваемая как обобщенный вариант реализации проблеморазрешающей системы в целом. Выбранный вариант выступает ограничением

(рамками) для нижестоящих уровней. Далее каждая из подсистем разрабатывается независимо на разных уровнях детальности. Таким образом, система разрабатывается методом последовательного приближения, т. е. через постепенную детализацию, уточнение решений, принятых на предыдущем этапе. Такой подход позволяет существенно сократить размерность задачи выбора оптимальной комбинации вариантов отдельных подсистем, сводя ее к множеству отдельных задач выбора локальных вариантов и задач координации локальных вариантов в интересах достижения глобальной цели. Тем самым удовлетворяется требование наглядности, обозримости модели проблеморазрешающей системы.

Принцип последовательного приближения можно проиллюстрировать на примере выбора маршрута туристической поездки (рис. 4.5). Сначала на карте крупного масштаба определяется оптимальный по выбранным критериям (стоимость, время и т. д.) маршрут. Затем отдельные участки выбранного маршрута уточняются на картах более мелкого масштаба.

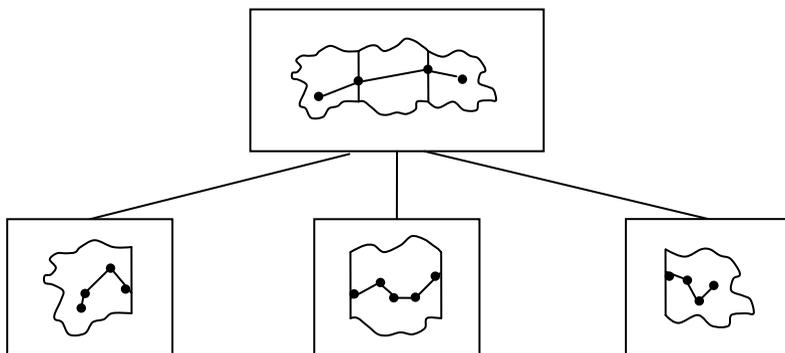


Рис. 4.5. Выбор маршрута на картах различного масштаба

**3. Принцип итеративности:** схема применения этапов системного анализа должна быть итеративной.

Данный принцип выдвигается исходя из требования гибкости регламента. Общий регламент, безусловно, должен соответствовать системной последовательности принятия решений, включающей в себя этапы анализа, постановки целей,

выработки решений, реализации и оценки. При этом для отдельных классов систем могут быть предложены адаптированные к конкретной предметной области и более подробные последовательности этапов. Однако схема применения этапов, определяющая порядок их следования, не может быть жесткой, она должна быть итеративной — по типу спиральной схемы или макетной (схемы быстрого прототипирования). Необходимость итеративного регламента, допускающего возможность возврата на предыдущие этапы и корректировки ранее принятых решений, обусловлена сложностью и многоаспектностью работ, выполняемых в процессе разработки проблеморазрешающей системы. На рис. 4.6 представлена итеративная схема выполнения системного анализа.

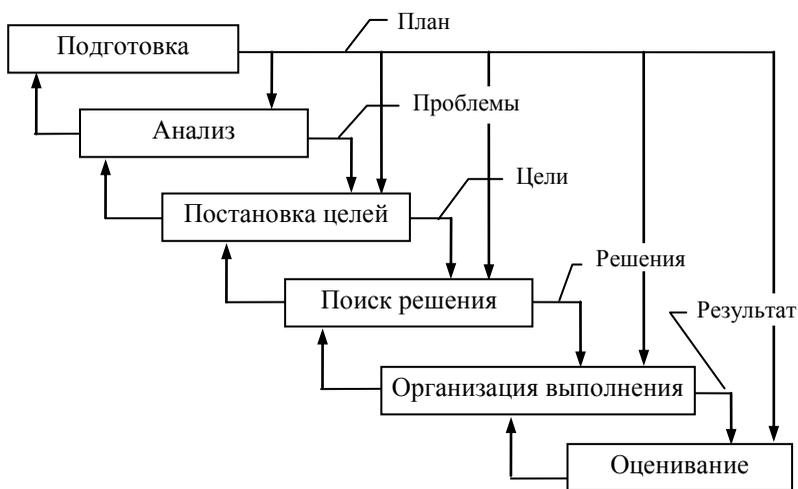


Рис. 4.6. Схема взаимосвязей этапов системного анализа

Принцип итеративности может быть распространен и на выполнение циклов принятия решений применительно к подсистемам на разных уровнях стратифицированной иерархии. Необходимо обеспечить возможность возврата к предыдущим уровням, т. е. выполнения итераций между принятием решений на различных уровнях с целью лучшего согласования локальных целей и решений между собой и глобальной целью.

**4. Принцип типизации:** при поиске решений для устранения сложной проблемы следует использовать типовые знания. Один из очевидных способов снижения сложности системного анализа — типизация. Она заключается не только в применении типового регламента и стандартизированного набора процедур, но и в использовании готовых типовых модельных сущностей, накапливаемых в виде библиотек. Такие типовые модели отражают общие свойства, структуры для отдельных классов проблеморазрешающих систем. Примерами типовых модельных сущностей могут служить типовые шаблоны описания характеристик подсистем, а также стандартные основания декомпозиции, используемые во многих методиках системного анализа. При решении конкретной задачи разработчик выбирает из библиотеки подходящую типовую модель и «настраивает» ее на свой объект, заполняя типовую структуру конкретными данными (рис. 4.7).

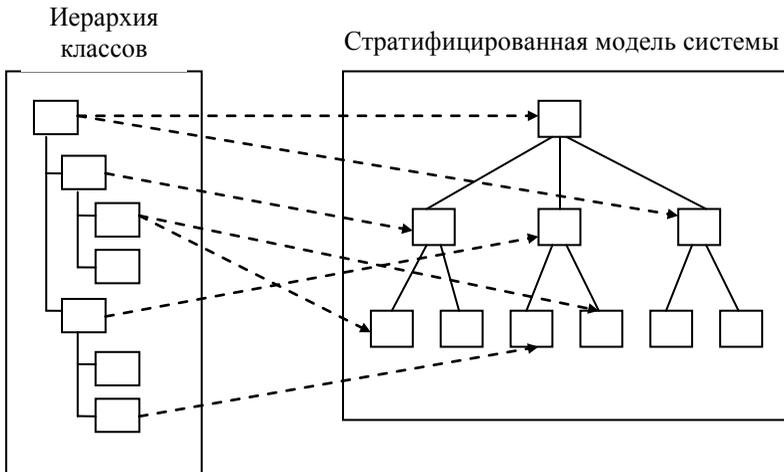


Рис. 4.7. Схема сопоставления подсистемам модели типовых описаний

Множество типовых моделей может быть структурировано по типу «от общего к частному» в виде иерархии классов, основанной на отношении наследования. В такой иерархии детальные шаблоны, описывающие узкие классы систем

и их компонентов, базируются на описаниях более широких классов, дополняя и конкретизируя их. Разработчику должна быть предоставлена возможность изменять типовые шаблоны, т. е. создавать свои описания, наследуя их от типовых.

В библиотеке типовых моделей могут храниться не только типовые описания компонентов систем и типовые фрагменты структур, но и закономерности, отражающие знания о логических, причинно-следственных связях между характеристиками систем. Для фиксирования таких закономерностей применяются языки представления знаний, разрабатываемые в рамках теории инженерии знаний, например, язык предикатов первого порядка, продукционный язык. С помощью дедуктивного вывода на основе общих закономерностей, характерных для определенного класса систем, могут быть выведены некоторые свойства, характеристики для конкретных систем.

Данный подход соответствует принципам технологии экспертных систем, он позволяет осуществлять разработку конкретных проблеморазрешающих систем на основе экспертных знаний о структурах, свойствах различных классов систем и их составляющих. Информационная система поддержки при этом выступает не столько как машина дедуктивного вывода, сколько как инструмент для приобретения, выявления знаний. С одной стороны она предоставляет разработчику «готовые» экспертные знания, а с другой стороны, помогает «развивать» их, выявлять новые знания. Библиотека типовых моделей может пополняться на основе накопления и обобщения опыта с использованием методов машинного обучения и индуктивного вывода.

**5. Принцип комплексированности:** должна быть предусмотрена возможность сочетания, интегрирования разнообразных методов и процедур принятия решений и соответствующих программных компонентов.

Как уже указывалось, разработчик некоторой конкретной системы должен иметь возможность использовать разнообразные процедуры системного анализа и принятия решений. Мало того, он должен иметь возможность воспользоваться не только универсальными методами из заранее сформированного

набора. В процессе решения некоторой сложной проблемы ему могут понадобиться вспомогательные средства и знания из любых предметных наук. «Системный аналитик готов привлечь к решению проблемы любые необходимые для этого знания и методы» [2]. Возникает проблема сочетаемости различных методов и процедур, их интегрируемости в единый процесс. Единственным объединяющим элементом может выступить декларативная модель предметной области. Единую модель или семейство согласованных моделей, основанных на одной парадигме и использующих общий язык представления знаний, можно рассматривать, как «каркас», интегрирующую «надстройку» над множеством различных процедур, как своего рода «метазнание».

Особенно важно использование данного подхода при создании инструментального средства поддержки технологии. Требование открытой архитектуры, допускающей возможность добавления, «встраивания» различных программных компонентов, вызвано трудностями, связанными с созданием крупной интегрированной информационной системы. Дело в том, что автономная разработка «с нуля» полностью законченных больших информационных систем с заранее спроектированной архитектурой оказывается неприемлемой. Сложность и длительность процесса разработки информационных систем, бурное развитие информационных технологий приводят к тому, что проектируемая система успевает устаревать еще в процессе ее создания. Другая крайность — создание больших информационных систем путем соединения различных, часто не согласованных «покупных» приложений — также не оправдывает себя, т. к., как правило, не позволяет строить действительно целостные интегрированные системы.

Решение дилеммы, заключающейся, с одной стороны, в необходимости частого обновления отдельных компонентов ИС и добавления, по мере необходимости, новых, а с другой стороны, сохранения целостности системы, видится в «скелетной» архитектуре. Этот подход предполагает наличие единого каркаса — интегрирующего компонента, допускающего присоединение различных приложений, отвечающих определенным требованиям (по интерфейсу, по форме вход-

ных и результирующих данных и т. д.). Вот что пишет по этому поводу Зиндер Е.З. в [63]: «Единственным достаточно стабильным интегрирующим элементом современной ИС может являться ... только понятийная модель предметной области». И там же: «В настоящее время слияние средств представления знаний с технологией обобщенных объектов и стандартизацией в области объектно-ориентированных представлений реально ведет на следующий, качественно новый уровень в технологии системного проектирования».

Таким образом, для реализации принципа комплексности целесообразно использовать объектно-ориентированный подход. Однако существующие языки ООАП, в частности UML, не совсем приемлемы для принятия решений при анализе и проектировании сложных систем различного назначения. Во-первых, они в основном предназначены для проектирования ИС, в связи с чем оперируют собственным понятийным аппаратом, ориентированным на данную область. Во-вторых, ООАП-методы и средства используются лишь для декларативного описания структуры и свойств системы. Как правило, они не содержат процедур генерации и выбора вариантов реализации систем. Поэтому для целей анализа и синтеза сложных систем различной природы была специально разработана объектно-ориентированная методология моделирования OMSD, описанная ниже.

#### **4.3.2. Объектно-ориентированная методология моделирования**

В качестве методологии моделирования предлагается использовать объектно-ориентированную методологию OMSD (Object Model for System Design) [60, 61], разработанную для принятия решений при анализе и проектировании сложных систем различного назначения. В соответствии с этой методологией модель сложной системы может включать пять видов моделей: компонентов, классов, объектов, зависимостей атрибутов и координационную (рис. 4.8).

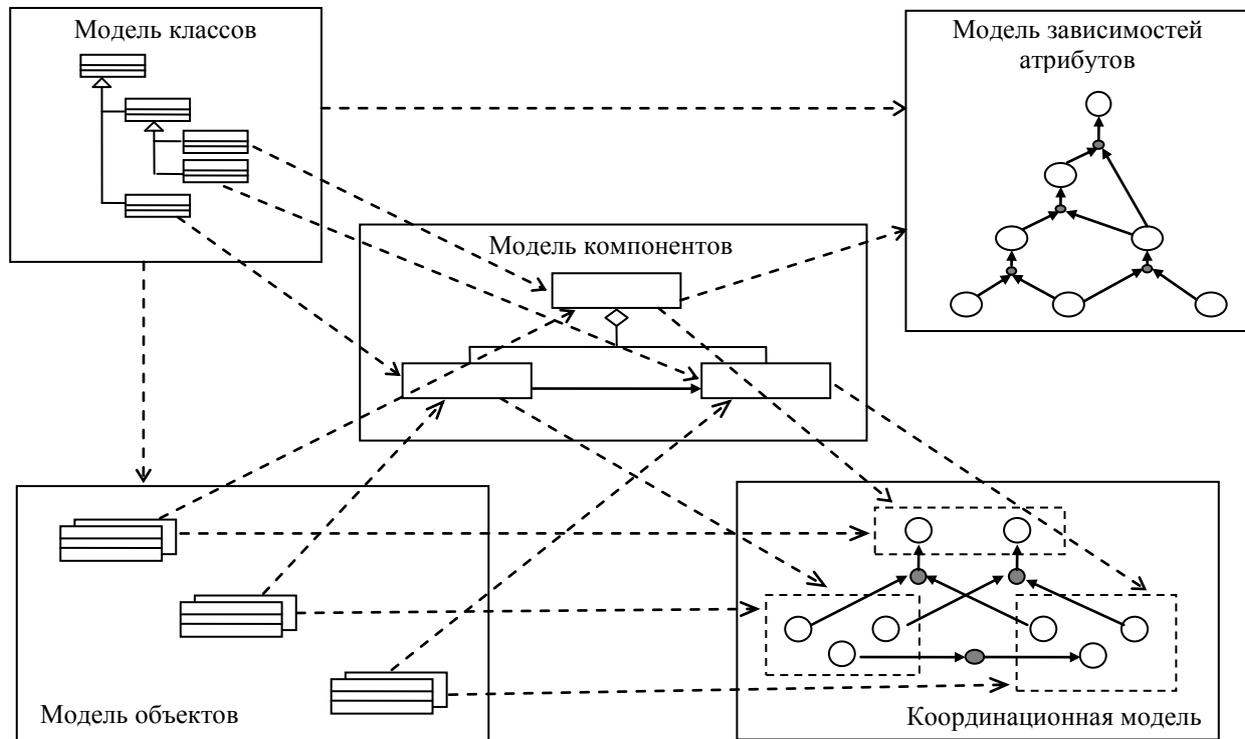


Рис. 4.8. Составляющие модели системы

Каркасом является модель компонентов, отражающая структуру системы. Для каждого компонента на основе модели классов может быть создана модель объектов, а также модель зависимостей атрибутов. Модель объектов содержит различные варианты реализации компонента. Модель зависимостей атрибутов помогает определять варианты и осуществлять поиск оптимальных. Для согласования вариантов реализации компонентов, представляемых как объекты, формируются координационные модели.

**Модель компонентов.** Термином «компонент» будем обозначать любую часть предметной области, которая может быть выделена и описана как некоторая самостоятельная сущность. При этом будем выделять два вида компонентов — подсистема (в том числе и система в целом) и элемент.

Подсистемы, как правило, выделяются путем последовательной декомпозиции системы. Формируется так называемая стратифицированная иерархия («Part-of-иерархия»). Будем называть совокупность подсистем, полученных в результате декомпозиции одной и той же системы предыдущего уровня, подуровнем.

При декомпозиции каждая подсистема порождает свой подуровень (рис. 4.9). Порождающую подсистему будем называть материнской, а подсистемы, составляющие подуровень — дочерними. Между материнской системой и ее дочерними подсистемами устанавливается *отношение агрегации* («целое – часть»). Формирование любого подуровня может осуществляться с помощью стандартных оснований декомпозиции.

Кроме подсистем могут быть выделены и элементы — сущности, участвующие в деятельности подсистемы (например: конечные продукты, предметы деятельности, средства деятельности, исполнители), или комплексные свойства, описываемые набором характеристик (например: технологические параметры, экономические результаты, технические условия и т. д.). Элементы «присоединяются» к подсистеме посредством *отношения присоединения* (см. рис. 4.9).

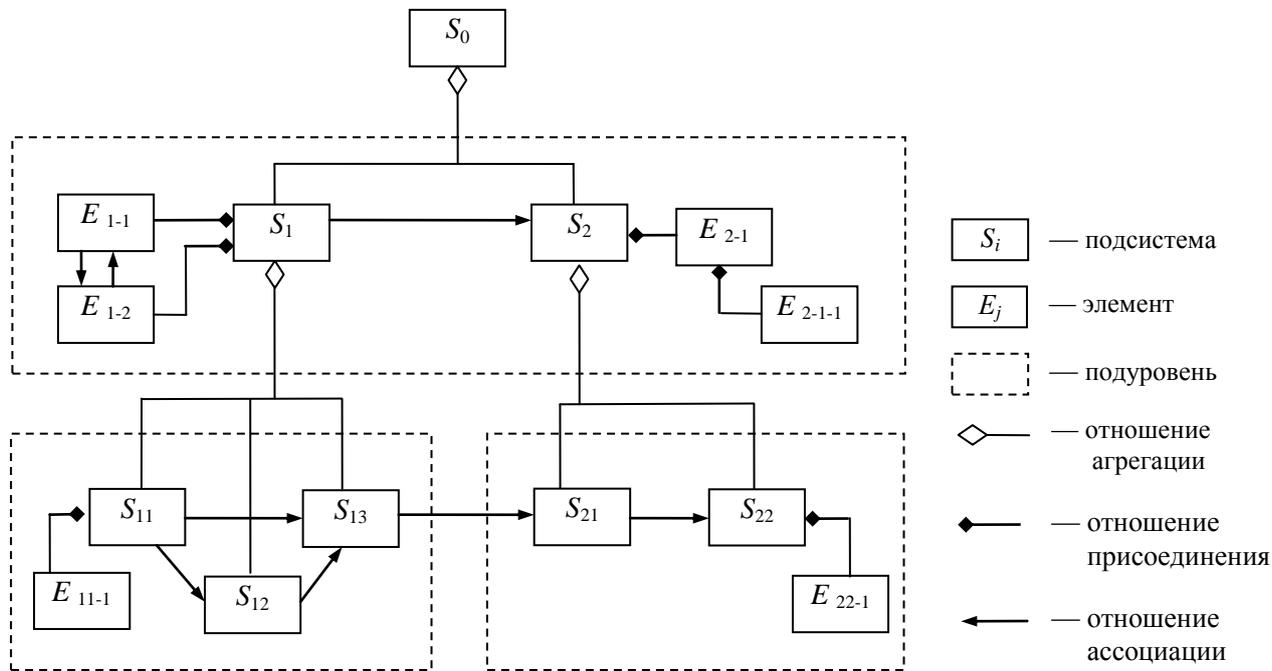


Рис. 4.9. Структура взаимосвязи компонентов сложной системы

Помимо отношений агрегации и присоединения между подсистемами и между элементами могут устанавливаться разнообразные отношения, отражающие физические связи. Это, прежде всего, потоки, заключающиеся в передаче энергии, вещества или информации, а также разнообразные эмпирические отношения (например: «руководить», «владеть», «использовать»). Назовем отношения данного вида *отношениями ассоциации*. Поскольку при переходе от верхних уровней к нижним количество компонентов растет, а значит, растет и число взаимосвязей между ними, рассмотрение всех связей между всеми компонентами сильно усложняет модель. Чтобы избежать излишней сложности, учитываются только взаимосвязи между подсистемами одного подуровня или между элементами одной подсистемы (см. рис. 4.9). Таким образом, каждому подуровню может быть сопоставлена одна или несколько диаграмм связей. Диаграммы могут быть построены с помощью различных нотаций, например: в нотации IDEF0-диаграмм, в нотации диаграмм языка UML.

**Модель классов.** Для того чтобы для каждого компонента (подсистемы или элемента) из иерархии компонентов можно было осуществлять поиск решения (оптимального варианта реализации данного компонента), необходимо составить структурированное описание компонентов. Удобно использовать объектный подход, предполагающий описание в виде совокупности *атрибутов*, отражающих свойства, характеристики компонента, и совокупности *методов*, позволяющих манипулировать атрибутами (задавать их значения, вычислять). При этом предполагается, что такое описание вариативно, т. е. могут быть составлены различные варианты описаний, отличающиеся значениями атрибутов, но сама структура описания (состав атрибутов и методов) инвариантна (постоянна). Структура описания задается в виде класса.

**Класс** представляет собой структуру, состоящую из имени класса, множества атрибутов и множества методов (присоединенных процедур). Для каждого атрибута задается имя, тип атрибута (<String>, <Real>, <Integer>, <Date>, <Object>, ...) и множество допустимых значений (домен) атрибута. Домен задается в зависимости от типа атрибута. Так, для ат-

рибута типа <Real> или <Integer> — в виде интервала, для атрибута типа <String> — в виде списка строк, для атрибута типа <Object> — в виде имени класса (списка имен классов). Если описание домена опущено, атрибут может принимать любое значение соответствующего типа. Примеры классов и экземпляров классов приведены на рис. 4.10.

Множество методов класса содержит обязательное подмножество методов доступа к значениям атрибутов, которые могут быть двух типов: `get_value` — метод получения значения; `set_value` — метод задания значения. Метод задания значения может быть представлен в виде процедуры, включающей арифметические и логические операции, ссылки на другие атрибуты, константы и др. Например, на рис. 4.10 показаны два метода типа `set_value` для вычисления значений атрибутов «Производительность» и «Затраты на ед. продукции».

Одни классы могут *наследоваться* от других. Класс-потомок, наследуемый от класса-предка, может содержать дополнительные атрибуты и методы (при этом наследуемые им атрибуты и методы явно не указываются) и так называемые перекрытые методы (переопределенные) и перекрытые атрибуты (область значений которых «сужена»). Между классом-потомком и классом-предком устанавливается *отношение обобщения* («частное—общее»). На рис. 4.10 класс-потомок «Текущее производство продукта», наследуемый от класса «Производство» имеет два дополнительных атрибута: «Период, месяц» типа <Integer> (принимает значения от 1 до 12) и «Продукт» типа <Object>. Посредством атрибутов типа <Object> в описание объекта можно включать описание другого объекта.

Иерархия типовых классов, отражающих общие свойства для различных классов компонентов систем, может быть составлена на основе знаний экспертов и сохранена в библиотеке типовых моделей. Разработчик может использовать эти знания: описание для конкретной подсистемы в этом случае может создаваться путем выбора или наследования подходящего класса из библиотеки классов и заполнения его конкретными данными (значениями атрибутов). Использование типовых классов существенно облегчает процесс построения декларативной модели.



Рис. 4.10. Примеры классов и объектов

**Модель объектов.** На базе классов создаются *объекты* (экземпляры классов), содержащие конкретные значения атрибутов. При присвоении значений атрибутам осуществляется проверка на принадлежность присваиваемого значения области допустимых значений (домену). Значение атрибута может быть дополнено *коэффициентом уверенности*, представляющим собой число в интервале от 0 до 1 (1 соответствует абсолютной уверенности в значении атрибута, 0 – абсолютной неуверенности, т. е. незнанию). Например, у объекта «Производство коробок» (см. рис. 4.10) значение атрибута «Эффективность» дополнено коэффициентом 0.8, т. е. уверенность, что эффективность принимает значение «среднее», составляет 80%.

Для отображения множества вариантов реализации некоторого класса, а также множества состояний системы (подсистемы, элемента) в различные моменты времени, в различных точках пространства, в различных условиях используется так называемый *мультиобъект*. Под мультиобъектом понимается множество объектов (экземпляров) одного класса, выделенных в соответствии с некоторым *признаком*. Признак представляет собой специальный атрибут, принимающий дискретные значения. Различают три основных типа базовых признаков — время, пространство и группа. От них могут наследоваться конкретные признаки. Признак может быть комбинированным, т. е. являться композицией нескольких признаков. Каждому значению признака соответствует некоторый конкретный экземпляр. На схемах мультиобъекты изображаются и в виде стопки объектов (в соответствии с обозначениями, принятыми в языке UML), и в табличном виде.

На рис. 4.11 представлен пример мультиобъекта (в графической и табличной нотациях), созданного в соответствии с признаком «Период, месяц». Каждый объект мультиобъекта содержит конкретные значения атрибутов, достигнутые в заданном месяце. Для идентификации каждого объекта после его имени, общего для всех объектов мультиобъекта, в скобках указываются значения атрибутов, составляющих признак.

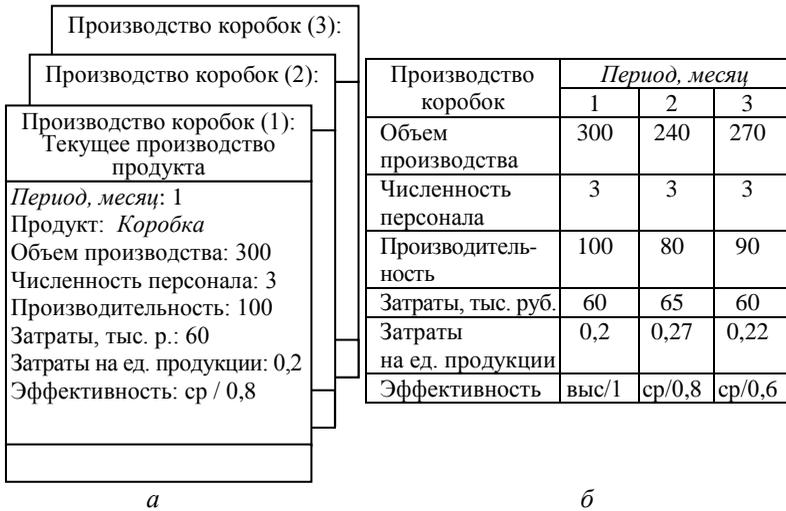


Рис. 4.11. Пример мультиобъекта:  
*а* — графическая нотация; *б* — табличная форма

Можно создать аналогичный мультиобъект в соответствии с признаком «Предприятие», содержащий объекты, каждый из которых описывает состояние производства коробок на различных предприятиях.

Мультиобъекты могут использоваться для ретроспективного или сравнительного анализа. При этом осуществляется сравнение объектов, составляющих мультиобъект (например, прошлых состояний подсистемы или различных примеров реализации подсистемы), с целью определения неких зависимостей, тенденций, закономерностей. В простейшем случае это может быть просто построение графиков изменения значений некоторых атрибутов для различных объектов и нахождение максимальных или минимальных отклонений значений атрибутов от среднего. Более глубокий анализ предполагает использование методов статистической обработки.

Кроме того, мультиобъекты могут использоваться для формирования альтернативных вариантов реализации компонентов системы, их оценки и выбора оптимальных вариантов.

Варианты, характеризуемые различными комбинациями значений атрибутов, могут вводиться непосредственно разработчиком или генерироваться методом перебора (например, с помощью метода морфологического анализа). Оценка и выбор вариантов также могут осуществляться различными способами, например, с помощью методов экспертных оценок, методов теории полезности и векторной оптимизации, методов исследования операций и теории игр и т. д.

**Модель зависимостей атрибутов.** Атрибуты могут зависеть друг от друга: значения одних могут вычисляться через значения других. Один из способов задания таких зависимостей — использование методов `set_value` для вычисления значений атрибутов (при этом методы используют при вычислении значения других атрибутов). Однако предпочтительнее использовать модель, в которой зависимости описываются явно, в декларативной форме. Это позволяет при автоматизированном построении модели (с помощью инструментальной системы) вместо программирования методов типа `set_value` явно описывать формулы, правила для вычисления и использовать стандартные программные процедуры, которые умеют обрабатывать эти формулы и правила, т. е. производить по ним вычисления.

Модель зависимостей атрибутов создается на базе некоторого класса сопоставленного некоторой подсистеме. При этом среди атрибутов выделяют независимые атрибуты, описывающие первичные непосредственные характеристики подсистемы. К их числу относятся «управляемые» «конструктивные» параметры, «внешние возмущения», например, параметры, определяющие принципы работы подсистемы, характеристики условий функционирования, данные наблюдений (мониторинга) и т. д. Будем называть эти атрибуты **базовыми**. Это атрибуты, значения которых разработчик может непосредственно задавать. Значения же других атрибутов зависят от значений базовых атрибутов, являются их следствием. В частности, можно выделить подмножество так называемых **целевых атрибутов**, определяющих целевое состояние подсистемы. К ним относятся, например, показатели эффективности и качества подсистемы (ее деятельности).

Влияние базовых атрибутов на целевые (через промежуточные) задается с помощью *отношений функциональной зависимости*. Каждое такое отношение связывает атрибут-функцию с атрибутами-аргументами. Множество отношений зависимости представляют собой сеть, в истоках которой находятся базовые атрибуты, в стоках — целевые атрибуты.

На рис. 4.12 приведен пример сети для подсистемы производства продукта, построенной на базе класса «Текущее производство продукта».

В истоках сети находятся атрибуты  $a_1$  («Численность персонала»),  $a_2$  («Объем производства») и  $a_3$  («Затраты»). Атрибут  $a_4$  («Производительность») является функцией атрибутов-аргументов  $a_1$  и  $a_2$ , атрибут  $a_5$  («Затраты на ед. продукции») — функцией  $a_2$  и  $a_3$ . В свою очередь, целевой атрибут  $a_6$  («Эффективность») зависит от атрибутов  $a_4$  и  $a_5$ .

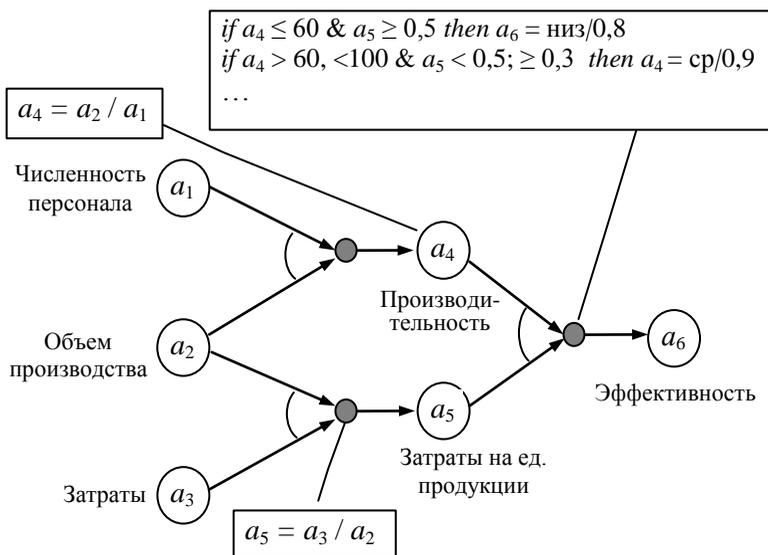


Рис. 4.12. Сеть функциональных зависимостей атрибутов

Отношение функциональной зависимости можно представить, как объект стандартного класса «FuncDependence»,

содержащий имена атрибутов-аргументов, имя атрибута-функции, закономерность (вид зависимости), а также методы, вычисляющие значения атрибутов.

**Закономерность**, показывающая, как именно значение атрибута-функции определяется значениями атрибутов-аргументов, может задаваться в виде формулы, некоторой процедуры или совокупности правил-продукций формата *if ... then* (если ... то). Причем правила могут характеризоваться степенью уверенности. Условная часть правила содержит логические формулы для проверки значений атрибутов-аргументов, заключительная — значение атрибута-функции (либо формулу для вычисления, либо процедуру).

Модель функциональных зависимостей атрибутов используется для решения двух основных классов задач:

1) задачи интерпретации (прямой задачи). Исходными данными являются значения базовых атрибутов. Необходимо найти значения некоторых целевых атрибутов, соответствующих заданным исходным данным. К данному типу относятся задачи диагностики, оценки, прогнозирования. Для решения прямой задачи используются методы прямого вывода;

2) задачи поиска допустимого решения (обратной задачи). Исходными данными является определенное (заданное) значение целевого атрибута. Необходимо найти соответствующие значения базовых атрибутов. К данному типу относятся задачи планирования, целевого управления. Для решения обратной задачи используются методы обратного вывода.

**Координационная модель** используется для отражения отношений зависимости между атрибутами классов, сопоставленных различным компонентам системы. Отражение всех зависимостей между атрибутами классов всех компонентов сложной системы в единой модели может приводить к большой размерности и сложности модели. Поэтому целесообразно рассматривать зависимости только между атрибутами подсистем одного подуровня или элементов одной подсистемы, включая зависимости между атрибутами материнской подсистемы и атрибутами дочерних компонентов.

Можно выделить два типа отношений зависимостей, включаемых в модель координации (рис. 4.13):

1) **межуровневые зависимости**, связывающие атрибуты материнской подсистемы с атрибутами дочерних подсистем (или элементов). Примером является зависимость затрат материнской системы от затрат отдельных подсистем, определяемая как сумма;

2) **межкомпонентные зависимости**. Это либо зависимости атрибутов подсистем, входящих в подуровень (межподсистемные зависимости — баланс входов-выходов подсистем), либо зависимости атрибутов элементов одной и той же подсистемы (межэлементные зависимости). Пример межподсистемных зависимостей: объем продукции, производимой некоторой подсистемой, должен быть равен объему продукции, поступающей на вход другой подсистемы, умноженному на коэффициент потерь, возникающих при передаче.

Координационная модель используется для согласования вариантов (реализаций) подсистем подуровня друг с другом и с вариантом материнской подсистемы, а также для согласования вариантов элементов в рамках подсистемы.

Можно выделить два класса задач, решаемых с помощью координационной модели:

1) задача интеграции. На основе известных значений атрибутов дочерних компонентов определяются значения атрибутов материнской подсистемы (интегрированных показателей) с использованием межуровневых зависимостей. При этом значения атрибутов дочерних компонентов, зависящие от значений атрибутов других компонентов, могут определяться с использованием межкомпонентных зависимостей;

2) задача координации. Значения атрибутов материнской подсистемы выступают ограничениями при поиске допустимых значений атрибутов дочерних компонентов. Кроме того, одни дочерние компоненты могут накладывать ограничения на другие. Ограничения задаются на основе межуровневых и межкомпонентных зависимостей.

Задачи координации и интеграции используются для многоуровневого выбора варианта реализации системы. Иерархический поиск решений может осуществляться на основе трех основных стратегий.

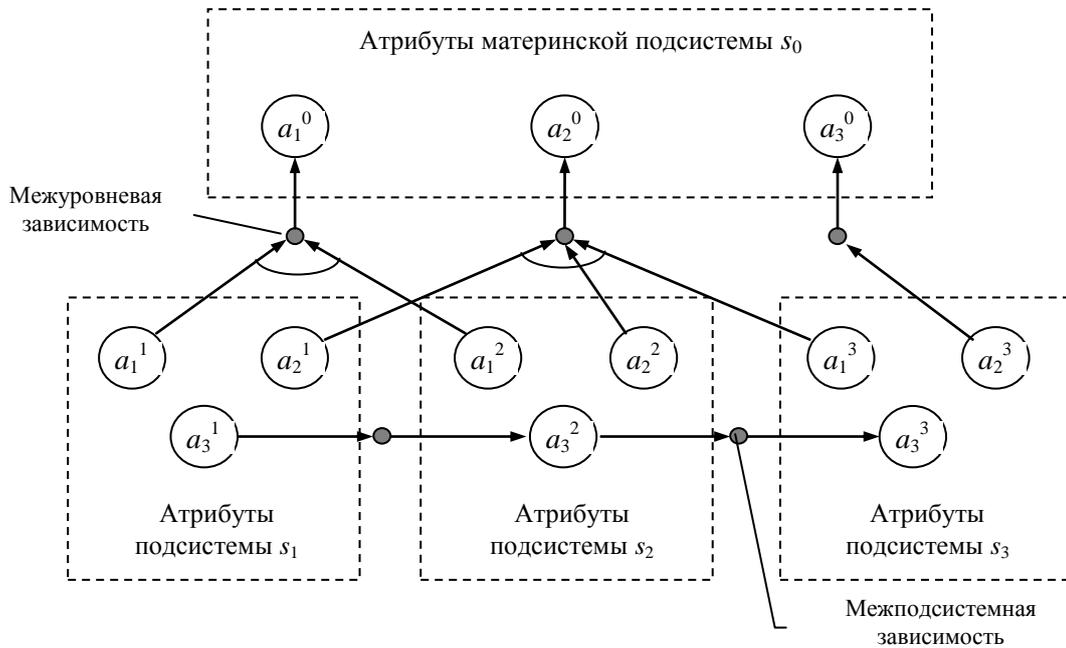


Рис. 4.13. Координационная модель подуровня

**Восходящая стратегия** предполагает прохождение иерархии подсистем снизу вверх. Для каждой из подсистем нижнего уровня выбирается оптимальный вариант с помощью некоторых процедур выбора. Выбор оптимального варианта для подсистем вышестоящих уровней включает операцию проверки совместимости вариантов дочерних подсистем и операцию агрегации.

**Нисходящая стратегия** предполагает прохождение иерархии подсистем сверху вниз. Сначала на верхнем уровне находится агрегированный вариант всей системы в целом в пространстве обобщенных атрибутов. Выбор оптимального варианта для подсистем нижестоящих уровней включает операцию детализации и операцию согласования вариантов подсистем подуровня.

Более гибкой является **смешанная стратегия**. В соответствии с этой стратегией сначала реализуется нисходящий подход. В случае если для какой-либо подсистемы не удастся найти вариант, удовлетворяющий ограничениям, осуществляется возврат к предыдущему уровню — к модели материнской системы. Для материнской системы выбирается вариант, накладывающий менее жесткие ограничения на дочерние подсистемы. Если этот, более «мягкий», вариант материнской системы нарушает ограничения подуровня, в который она входит, то осуществляется переход к еще более высокому уровню с тем, чтобы «ослабить» ограничения подуровня и т. д.

### **4.3.3. Регламент объектно-ориентированной технологии**

Регламент процесса проведения системного анализа представляет собой руководящие указания по составу этапов и их последовательности, а также используемым на каждом этапе методам формирования моделей и поиска решений. В соответствии с принципом декларативности регламент представляется не в виде алгоритма, а в виде совокупности рекомендаций для каждого из основных этапов типовой последовательности относительно содержания этапа, вида формируемых моделей и

спектра методов, которые могут быть использованы разработчиком для формирования модели и поиска решения на ней. При этом на подготовительном этапе формируется модель процесса проведения системного анализа, на этапе анализа — модель проблемосодержащей системы, на этапе постановки целей — модель системы целей, на этапе выработки решений — модель проблеморазрешающей системы (рис. 4.14).

Модель любой из систем представлена в виде иерархии компонентов, дополненной объектными описаниями компонентов и моделями зависимостей между атрибутами компонентов. Принцип типизации обеспечивается использованием при формировании моделей библиотеки типовых моделей (см. рис. 4.14) — типовых оснований декомпозиции, типовых описаний компонентов, типовых закономерностей. Принцип комплексированности обеспечивается возможностью выбора конкретных методов, используемых на том или ином этапе регламента применительно к тому или иному компоненту модели (см. рис. 4.14).

Библиотека процедур включает в себя множество разнообразных процедур, предназначенных для анализа модели, проверки различных гипотез, а также поиска оптимальных решений на модели. Процедуры, поддающиеся автоматизации, реализуются в виде встроенных в инструментальное средство или внешних приложений.

**Подготовительный этап.** Основным содержанием этапа является выбор способа организации процесса проведения системного анализа, в том числе: планирование (определение последовательности этапов, описание работ, исполнителей, используемых методов и средств), а также создание коллектива разработчиков. Поскольку процесс системного анализа сам может рассматриваться как система, то для него может быть построена иерархическая объектно-ориентированная модель. Основу модели составляет иерархия подсистем. В качестве подсистем выступают этапы системной последовательности принятия решений — подготовка, анализ ситуации, постановка целей, поиск решений, организация выполнения, оценивание. Каждый этап декомпозируется на подэтапы.

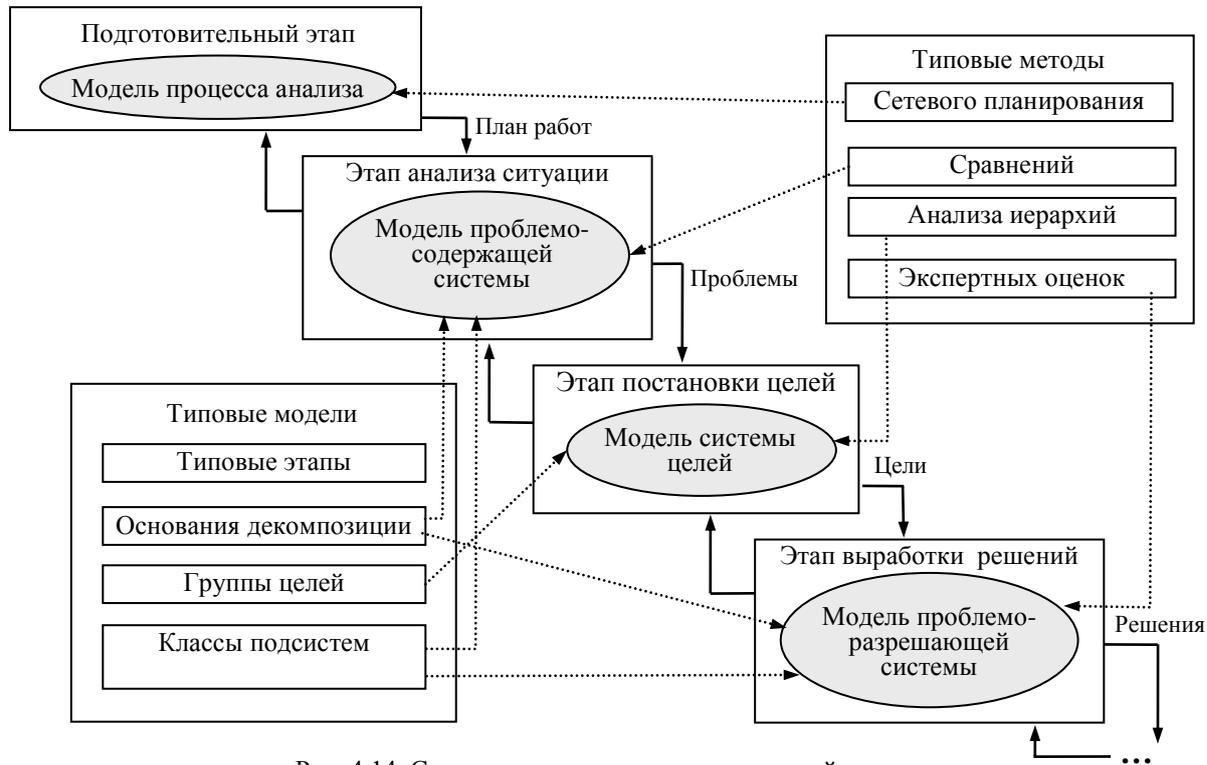


Рис. 4.14. Схема выполнения этапов системной технологии

Как правило, выделяются следующие подэтапы: построения модели; использования модели (для построения оптимального плана, либо анализа ситуации, либо оценки целей, либо поиска решений и т. д.); обсуждения и проверки. По результатам выполнения подэтапа проверки может быть осуществлен возврат на предыдущие этапы. Каждому подуровню иерархии может быть сопоставлена диаграмма связей подсистем, отражающая взаимосвязи между этапами, например информационные потоки, передающиеся от этапа к этапу.

Для создания структурированного описания этапов каждой из подсистем сопоставляется класс. Типовой класс описания этапа системного анализа включает следующие атрибуты:

- 1) «цель этапа»;
- 2) «конечный результат»;
- 3) «исходные данные»;
- 4) «исполнитель»;
- 5) «срок»;
- 6) «стоимость» и т. д.

Затем формируются варианты реализации этапов, содержащие конкретные значения атрибутов, и выбирается наиболее перспективная комбинация вариантов, согласованных по срокам, ресурсам, стоимости и т. д.

**Этап анализа ситуации.** На данном этапе исследуется проблемосодержащая система — выявляются ее сильные и слабые стороны, тенденции, проблемы. В зависимости от целей анализа проводится один или несколько различных его видов — ретроспективный, сравнительный, причинный. Предварительным этапом при использовании любого вида анализа является построение декларативной модели в виде иерархии компонентов, дополненной структурированными описаниями компонентов и, возможно, моделью зависимостей атрибутов.

Для примера рассмотрим построение модели системы энергосбережения региона (рис. 4.15). Декомпозиция системы осуществлялась с помощью основания декомпозиции по видам топливно-энергетических ресурсов (тепловая и электрическая энергия), а затем — по отраслевому принципу (промышленный, агропромышленный, энергетический, транспортный комплексы, жилищно-коммунальная сфера).



Рис. 4.15. Модель системы энергосбережения региона

Кроме того, к подсистеме верхнего уровня было присоединено четыре элемента, соответствующих четырем аспектам (направлениям) оценки состояния системы энергосбережения: потребление энергоресурсов; энергетическая независимость региона; потери энергоресурсов и реализация энергосберегающей политики. Это сделано для упрощения описания. Каждому компоненту сопоставляется класс, содержащий атрибуты, являющиеся показателями (индикаторами) состояния системы энергосбережения. Так, класс для оценки энергопотребления включает такие показатели, как «Энергоемкость ВРП», «Годовой прирост энергоемкости», «Удельное потребление энергоресурсов на душу населения» и др.

На данной модели был проведен ретроспективный анализ для выявления тенденций, происходящих в сфере энергосбережения региона на протяжении нескольких лет. Для отдельных компонентов модели были созданы мультиобъекты по временному признаку, т. е. экземпляры классов, соответствующие определенному году. Каждый из экземпляров содержит конкретные значения атрибутов, достигнутые в заданном году (см. рис. 4.15).

Для того чтобы не только проследить изменения показателей по годам, но и дать оценку состояния системы по различным направлениям (оценку энергопотребления, энергонезависимости, энергопотерь, реализации энергосберегающей политики) и системы в целом, была построена модель зависимостей атрибутов. На рис. 4.16 приведена сеть зависимостей атрибутов.

В истоках сети располагаются плановые и фактические значения в текущем и базовом году пятнадцати индикаторов, таких как «Энергоемкость ВРП», «Уд. потребление энергоресурсов на душу населения», «Электроемкость ВРП» и др. На рис. 4.16 используются следующие обозначения:  $a_{ifb}$ ,  $a_{ift}$  — фактические значения  $i$ -го индикатора в базовом и текущем году;  $a_{iplb}$ ,  $a_{ipt}$  — плановые значения  $i$ -го индикатора в базовом и текущем году. В качестве базового принят предыдущий год.

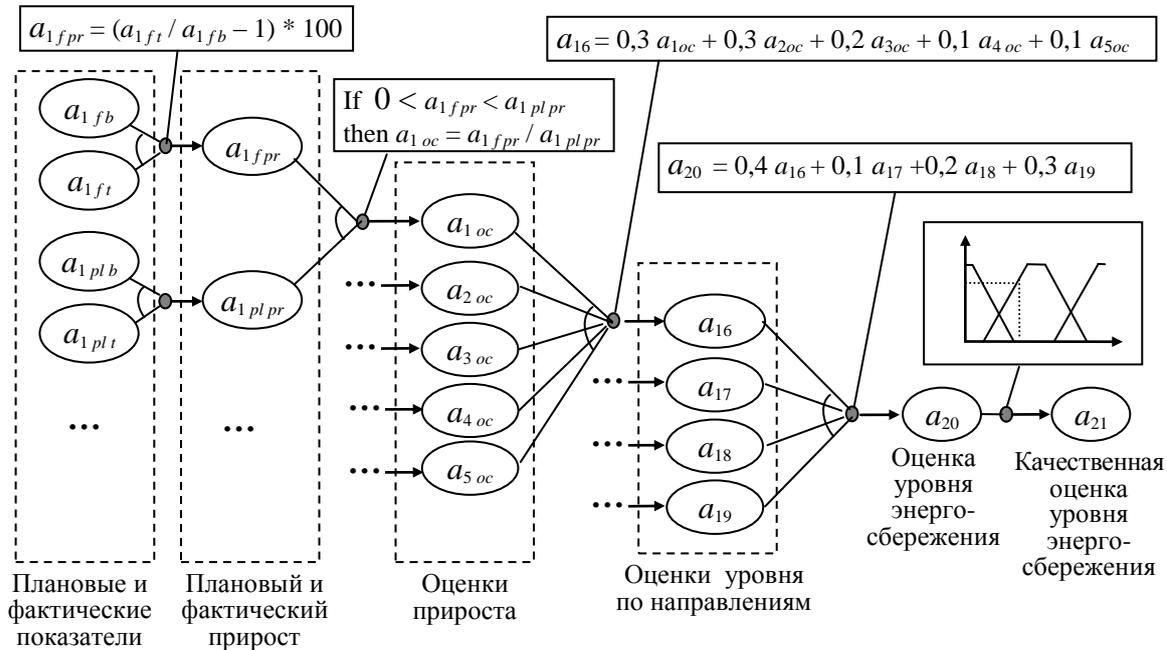


Рис. 4.16. Сеть функциональных зависимостей атрибутов модели оценки уровня энергосбережения региона

Поскольку все индикаторы измеряются на различных шкалах (энергоемкость — в тоннах условного топлива на рубль, удельное потребление энергоресурсов на душу — в тоннах условного топлива на человека, электроемкость — в кВт.ч на рубль и т. д.), то необходимо нормировать их, т. е. перейти к «оценочным» индикаторам  $a_{ioc}$ , измеряемым в баллах от 0 до 1. Для их вычисления были использованы относительные величины. Сначала для каждого индикатора определяется фактический и плановый прирост/убыль (в %) его значения по отношению к базовому году:

$$a_{ifpr} = \left( \frac{a_{ift}}{a_{ifb}} - 1 \right) \cdot 100; \quad a_{iplpr} = \left( \frac{a_{iplt}}{a_{iplb}} - 1 \right) \cdot 100.$$

Затем, если фактический прирост/убыль больше 0 и меньше планового, вычисляется отношение фактического прироста/убыли к плановому:  $a_{ioc} = a_{ifpr} / a_{iplpr}$ . Если же фактический прирост/убыль больше планового, то оценка прироста равна 1, а если фактический прирост/убыль меньше 0, то и оценочный индикатор равен 0.

На основе оценок прироста определяются оценки состояния системы по отдельным направлениям — энергопотреблению, энергонезависимости, энергопотерям, реализации энергосберегающей политики (атрибуты  $a_{16}-a_{19}$ ). При этом используются формулы аддитивной свертки. Аналогично вычисляется интегральная оценка уровня энергосбережения региона (атрибут  $a_{20}$ ) на основе оценок по отдельным направлениям. Для определения весовых коэффициентов в формулах аддитивной свертки используются различные методы выявления предпочтений экспертов (парные сравнения, непосредственная оценка, ранжирование с последующим переводом рангов в балльные оценки). Для перевода количественной интегральной оценки (значения  $a_{20}$ ) в качественную оценку (значение  $a_{21}$ ) (например, «низкий», «ниже среднего», «средний», «выше среднего», «высокий») может быть использована процедура фаззификации. В этом случае предварительно необходимо построить функции принадлежности для каждого лингвистического значения.

Кроме ретроспективного может быть проведен и сравнительный анализ, например, для сравнения с системами энергосбережения других регионов (стран). Для каждого компонента на основе классов формируются мультиобъекты, содержащие экземпляры классов, соответствующие определенному региону. Оценки уровня энергосбережения региона могут определяться с помощью той же модели зависимостей атрибутов, которая использовалась для ретроспективного анализа.

Причинный анализ предполагает построение дерева причин, которое может быть представлено в виде сети зависимостей атрибутов. Атрибутами в данном случае выступают причины наступления неблагоприятной ситуации, принимающие значения 1 («имеет место быть») или 0 («не наступила»), либо степени выраженности причин, изменяющиеся от 0 до 1.

На рис. 4.17 приведен пример дерева причин, вскрывающего коренные причины проблемы низкого качества услуг по обеспечению населения региона электрической и тепловой энергией.

Может быть заранее разработано типовое дерево причин, и при анализе конкретной ситуации аналитику необходимо лишь оценить степень выраженности типовых причин.

**Этап постановки целей.** На данном этапе формулируются цели и задачи исходя из проблем, выявленных на этапе анализа ситуации. Формирование модели системы целей начинается с построения иерархии компонентов. В качестве подсистем здесь выступают группы целей, выделенные, например, в соответствии с различными аспектами целеполагания — политическим, экономическим, социальным, экологическим. Цели могут быть сгруппированы и в соответствии с подсистемами внешней среды, выдвигающими требования к исследуемой системе, — цели вышестоящих систем, потребителей, поставщиков, партнеров и т. д.

Класс описания подсистемы иерархии целей должен включать атрибуты, содержащие словесные формулировки целей, а также атрибуты, выступающие индикаторами достижения целей (критериями).

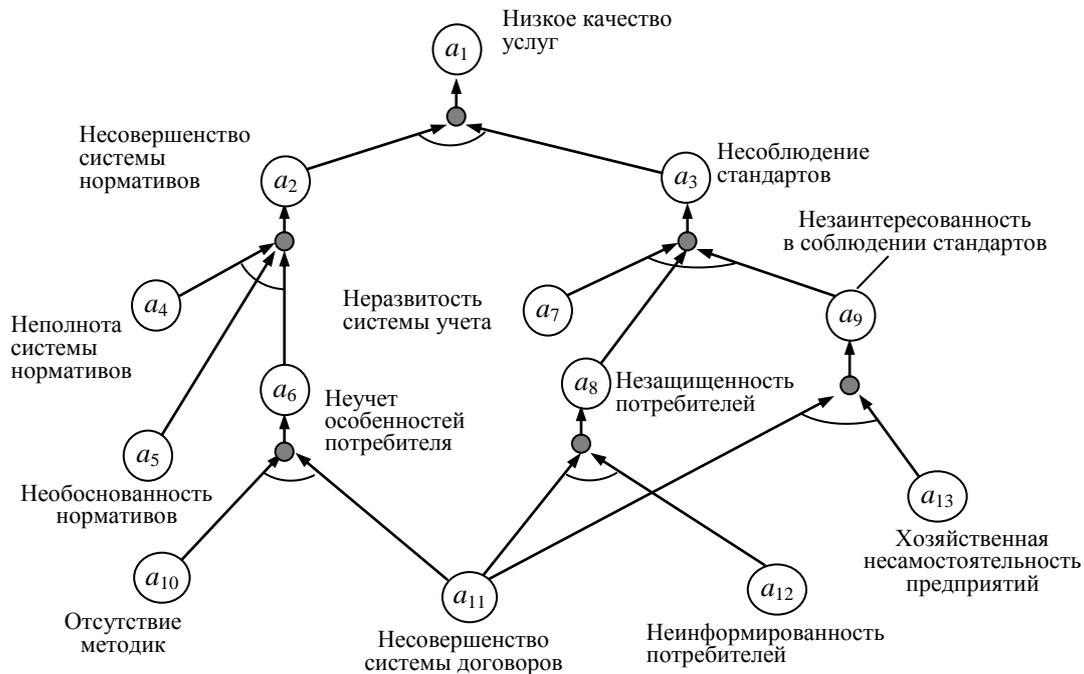


Рис. 4.17. Фрагмент дерева причин для ситуации «низкое качество услуг»

Критерии, сопоставленные некоторой подсистеме, можно выделить в качестве отдельного присоединенного компонента. Это позволяет сформировать для данного компонента мультиобъект по временному признаку, состоящий из объектов, соответствующих различным плановым периодам (рис. 4.18). Каждый такой объект содержит плановые значения критериев, которые должны быть достигнуты в течение соответствующего периода.



Рис. 4.18. Фрагмент иерархии целей программы повышения энергоэффективности региона

Для выявления подцелей (задач) и оценки их взаимовлияния можно построить дерево целей в виде модели зависимостей атрибутов. Атрибутами в данном случае выступают цели (подцели, задачи), а функциональными зависимостями — причинно-следственные связи. Каждому атрибуту соответствует некоторая цель, для достижения которой нужна реализация ее подцелей (атрибутов, от которых она зависит).

На рис. 4.19 представлено дерево целей (точнее, фрагмент дерева целей), содержащее подцели для глобальной цели «Создание условий для реализации потенциала энергосбережения».

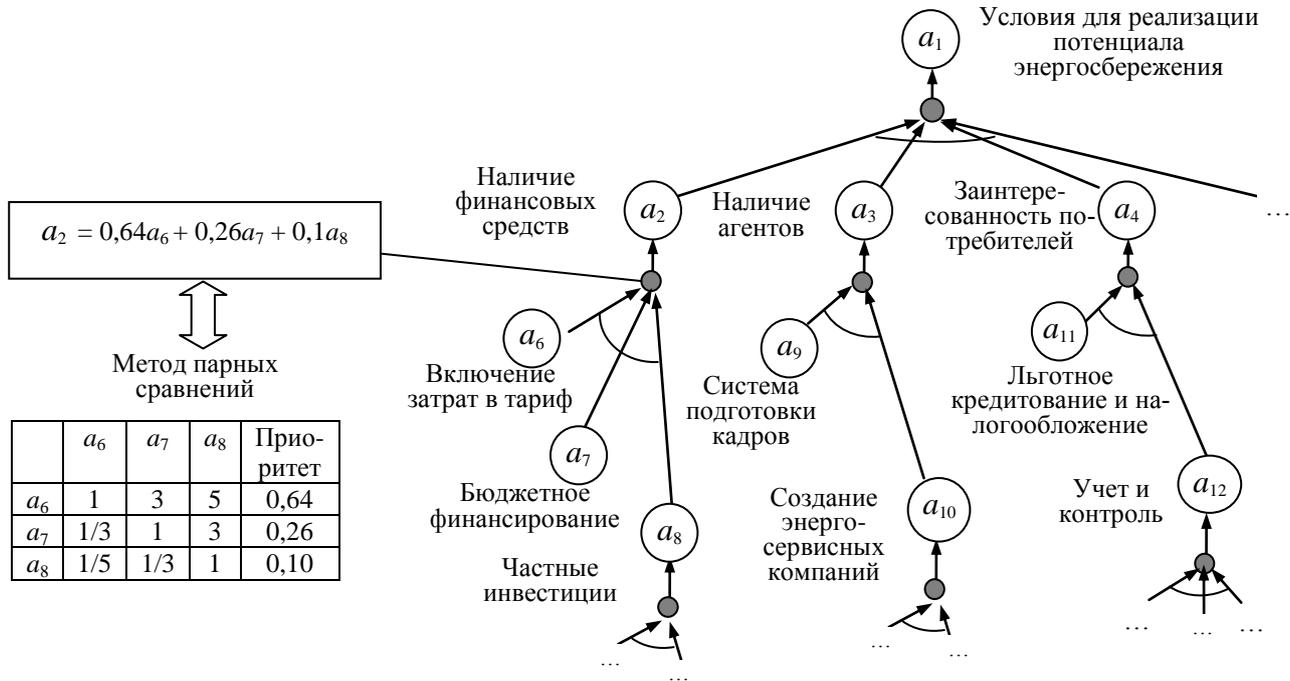


Рис. 4.19. Фрагмент дерева целей программы повышения потенциала энергосбережения

Так, для достижения глобальной цели выделены подцели: «Наличие финансовых средств», «Наличие агентов», «Заинтересованность потребителей» и др. Для достижения цели «Наличие финансовых средств» выделены подцели: «Включение затрат в тариф», «Бюджетное финансирование», «Частные инвестиции» и т. д. Всего было выделено 22 цели (подцели).

Для того чтобы оценить степень влияния тех или иных подцелей на глобальную цель, т. е. определить приоритеты подцелей, можно использовать метод анализа иерархий. В соответствии с этим методом для каждой группы подцелей, непосредственно подчиненных одной цели, составляется матрица парных сравнений, содержащая степени превосходства подцелей друг над другом. На рис. 4.19 представлена матрица парных сравнений подцелей, подчиненных цели «Наличие финансовых средств». Веса подцелей (локальные приоритеты), полученные на основе матриц парных сравнений, подставляются в формулы аддитивной свертки, которые описывают влияние подчиненных целей на материнскую цель. Для определения оценки влияния подцели нижнего уровня на глобальную цель, сначала задаются значения базовых атрибутов: значение атрибута, соответствующего заданной подцели, принимается равным единице, значения остальных — нулю. Затем последовательно вычисляются приоритеты всех целей по формулам аддитивной свертки. Вычисленное значение целевого атрибута и является глобальным приоритетом заданной подцели нижнего уровня [61].

**Этап выработки решений.** Основное содержание этапа — выработка решений для ликвидации проблем, выявленных на этапе анализа, исходя из целей и задач, сформулированных на этапе постановки целей. Разработка осуществляется иерархически. На верхнем уровне осуществляется выработка обобщенного решения, затем решение уточняется на более низких уровнях. Таким образом, сначала формируется иерархия подсистем и элементов. Иерархия может соответствовать иерархии компонентов проблемосодержащей системы, построенной на этапе анализа, или может быть построена заново, например, в соответствии с целями и задачами, выявленными на этапе постановки целей.

Рассмотрим в качестве примера разработку программы повышения энергетической эффективности региона [61]. В данном случае проблеморазрешающей системой является программа. На рис. 4.20 приведен пример иерархии подсистем.



Рис. 4.20. Структура программы повышения энергоэффективности

Подсистемами являются направления программы (подпрограммы) и конкретные мероприятия. Подсистемы выделялись в соответствии с целями и задачами, выявленными на этапе анализа. Каждой подсистеме сопоставляется класс, в пространстве атрибутов которого осуществляется формирование и выбор альтернативных вариантов. Подсистемам верхних уровней сопоставлялся класс «Стратегия», подсистемам нижнего уровня — класс «Мероприятие». На базе классов формировались экземпляры, соответствующие конкретным вариантам реализации подпрограммы (мероприятия). В случае генерации нескольких альтернативных вариантов осуществлялся выбор оптимальных вариантов.

Разработка вариантов реализации подсистем может осуществляться различными способами: методом мозгового штурма, методом аналогий, синектики и т. д. Наиболее формализованным методом формирования альтернативных вариантов является метод морфологического анализа (см. п. 2.4.2). Рассмотрим особенности проведения *морфологического анализа* применительно к объектному представлению объекта анализа (рис. 4.21).



Рис. 4.21. Формирование вариантов реализации подсистемы методом морфологического анализа

Исходной информацией является класс, описывающий исследуемую систему (подсистему). Сначала необходимо выбрать те атрибуты, значения которых будут комбинироваться. Это должны быть базовые атрибуты, однозначно описывающие вариант реализации системы, например, отражающие

принципы ее организации и функционирования. Комбинируемые атрибуты должны быть дискретными. Для непрерывных атрибутов осуществляется переход к дискретным значениям путем разбиения множества возможных значений на интервалы (в качестве значений при этом берутся интервалы).

Для определения порядка, в котором будут комбинироваться атрибуты, нужно проранжировать выделенные атрибуты по важности. На первом шаге комбинируются значения двух наиболее важных атрибутов и из полученных комбинаций отбрасываются наихудшие (прежде всего, несовместимые). Затем оставшиеся комбинации комбинируются со значениями следующего по важности атрибута, и из множества полученных вариантов также исключаются наихудшие. Процедура продолжается до тех пор, пока не будут перебраны все комбинируемые атрибуты. Результирующие варианты могут быть представлены в виде мультиобъекта, в котором каждый объект соответствует одному из вариантов (см. рис. 4.21).

Оценка сформированных альтернативных вариантов и выбор оптимального варианта осуществляется различными способами — с помощью ранжирования, парных сравнений, критериальных методов. Для вычисления значения критерия может быть построена модель функциональных зависимостей атрибутов, позволяющая связать базовые атрибуты, комбинации значений которых определяют различные варианты с целевыми атрибутами, отражающими критерии эффективности.

В случае когда выбор варианта зависит от состояния среды (от складывающейся ситуации) и у разработчика имеется неполная информация о возможных состояниях среды, используются различные *методы выбора в неопределенной ситуации*. Рассмотрим один из методов, основанный на использовании коэффициентов уверенности. В качестве иллюстративного примера используем задачу выбора инвестиционного проекта разработки нефтегазового месторождения [61].

Исходной информацией является класс описания системы (подсистемы), а также классы описания присоединенных элементов, в качестве которых выступают, прежде всего, сценарий действий и состояние среды. Так, модель выбора инвестиционного проекта разработки месторождения (рис. 4.22)

содержит подсистему «Инвестиционный проект», а также присоединенные элементы «Вариант разработки», «Экономическая ситуация» и «Критерии проекта». Каждому из этих компонентов сопоставлен класс описания.

На первом шаге необходимо сформировать мультиобъект, описывающий различные сценарии действий. Для задачи выбора инвестиционного проекта — это варианты разработки месторождения. Каждый объект (вариант) содержит определенную комбинацию значений атрибутов, определяющих способ разработки: действующий фонд нефтяных скважин, ввод скважин из бурения, методы воздействия на залежь, уровень добываемой нефти и т. д. Варианты могут формироваться с помощью метода морфологического анализа.

Необходимо также сформировать мультиобъект, отражающий возможные состояния внешней среды. Для задачи выбора инвестиционного проекта — это экономические ситуации, характеризующиеся значениями таких атрибутов, как цены на внутреннем и внешнем рынках, коэффициенты инфляции, валютный курс, налоговые ставки, акцизы, коэффициенты дисконтирования и т. д.

Каждой ситуации нужно сопоставить коэффициент уверенности (число в интервале от 0 до 1), отражающий уверенность эксперта в том, что такая ситуация реализуется. На рис. 4.22 представлены две ситуации (С1 и С2), одна имеет коэффициент уверенности 0,6, другая — 0,7. Коэффициенты уверенности могут быть сопоставлены и вариантам (сценариям действий), хотя, как правило, они равны 1, так как информация о предполагаемых действиях, в отличие от информации о состоянии среды, является полной и определенной.

Для оценки вариантов сценариев действий в различных ситуациях составляется мультиобъект по комбинированному признаку «вариант – ситуация». В рассматриваемом примере это мультиобъект «Критерии проекта». Каждый объект этого мультиобъекта соответствует некоторому варианту разработки, осуществляемому в некоторой конкретной ситуации. Например, если имеется два варианта и две ситуации, то мультиобъект будет содержать четыре объекта: (В1, С1), (В1, С2), (В2, С1), (В2, С2).



Рис. 4.22. Модель выбора инвестиционного проекта разработки месторождения

Каждому из этих комбинированных вариантов сопоставляется значение критерия. Значениями критерия могут быть балльные оценки, определяемые экспертами, или количественные значения, выражающие результат реализации сценария в конкретной ситуации. Значение критерия может определяться на основе других показателей. Например, для задачи выбора инвестиционного проекта значения интегрального критерия (в баллах от 0 до 10) определялись на основе вычисленных экономических показателей, таких как чистая текущая стоимость, индекс рентабельности инвестиций, внутренняя норма прибыли. Коэффициент уверенности в значении критерия определяется как минимум коэффициентов уверенности варианта и ситуации. На рис. 4.22 показаны значения критерия, дополненные коэффициентами уверенности, для каждого из четырех комбинированных вариантов.

На основе полученных оценок необходимо определить оценку для отдельных вариантов сценариев действий (вариантов разработки месторождения) с учетом всех возможных ситуаций. В рассматриваемом примере это значение атрибута «Эффективность» мультиобъекта «Инвестиционный проект», рассчитываемое для каждого варианта разработки (В1 и В2). Интегральная оценка варианта определяется как взвешенное среднее оценок для каждой из возможных ситуаций:

$$K_j = (\sum_i cf_{ij} K_{ij}) / \sum_i cf_{ij},$$

где  $K_{ij}$ ,  $cf_{ij}$  — соответственно значение критерия и коэффициент уверенности для  $i$ -й ситуации и  $j$ -го сценария.

В качестве оптимального выбирается вариант, у которого интегральная оценка является максимальной (в данном случае В1). Рассмотренный метод может рассматриваться как аналог метода выбора управления в условиях риска по критерию среднего выигрыша (см. п. 2.3.3). Однако вместо вероятностей возможных исходов в данном методе используются факторы уверенности.

При *иерархическом поиске решений* выбранные варианты реализации отдельных подсистем необходимо согласовать. Рассмотрим один из методов нахождения оптимального сочетания вариантов дочерних подсистем, обеспечивающего

выполнение межподсистемных зависимостей и удовлетворяющего ограничениям со стороны материнской подсистемы.

Выбранный вариант материнской подсистемы характеризуется определенными значениями атрибутов (рис. 4.23). Среди атрибутов должен быть атрибут, отражающий затраты на реализацию выбранного варианта (обозначим его  $z$ ), для которого должна быть определена допустимая область, т. е. верхняя граница затрат  $z^*$ . Критерий эффективности  $K$  материнской подсистемы одновременно выступает и критерием эффективности всего подуровня. Среди атрибутов, описывающих каждую из дочерних подсистем, также должен быть атрибут, отражающий локальные затраты на реализацию варианта подсистемы (обозначим его  $z_i$ ), и атрибут, являющийся локальным критерием эффективности  $K_i$  подсистемы. Значения  $z_i$  и  $K_i$  определяются с помощью зависимостей, содержащихся в частных моделях подсистем. В координационную модель подуровня необходимо включить межподсистемные и межуровневые зависимости (см. рис. 4.23).

Межуровневые зависимости представлены функцией затрат и функцией качества

$$z = \sum_i^n z_i, \quad K = \sum_i^n v_i \cdot K_i, \quad \sum_i^n v_i = 1,$$

т. е. затраты на реализацию варианта материнской системы равны сумме затрат на реализацию вариантов дочерних подсистем, а глобальный критерий эффективности равен взвешенной сумме локальных критериев (веса отражают важность подсистем).

Оптимальные варианты для дочерних подсистем определяются на частных моделях, но при этом учитываются ограничения на затраты и ограничения от других дочерних подсистем. Первоначальное распределение уровня допустимых затрат между подсистемами осуществляется пропорционально их «весу»:  $z_i^* = v_i \cdot z^*$ .

Подсистемы перебираются в порядке убывания веса, начиная от подсистемы, имеющей наибольший вес. Для каждой очередной подсистемы, кроме ограничений на локальные затраты, формируются ограничения от подсистем, связанных с текущей подсистемой функциональными зависимостями.

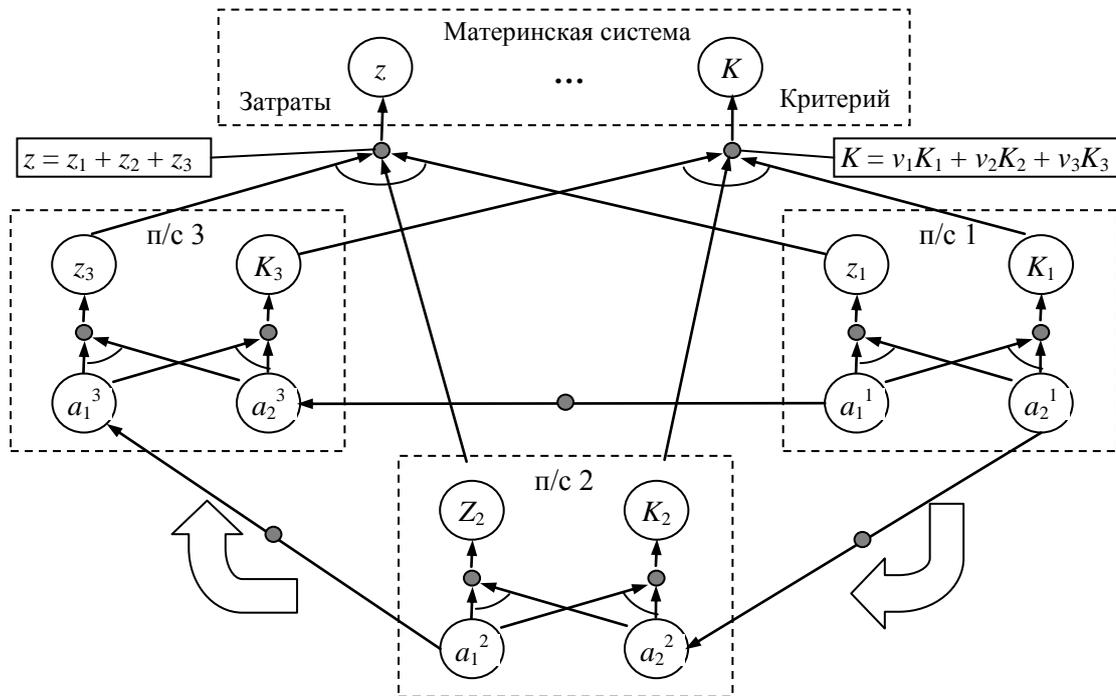


Рис. 4.23. Согласование вариантов подсистем подуровня

При этом значения атрибутов уже рассмотренных подсистем, соответствующие выбранным вариантам этих подсистем, выступают ограничениями для текущей подсистемы. Атрибуты же еще не рассмотренных подсистем рассматриваются как свободные переменные. Определяется локальный оптимальный вариант текущей подсистемы на частной модели подсистемы с учетом межподсистемных ограничений и ограничений на локальные затраты. Если нет допустимого решения, то можно вернуться на предыдущий шаг с тем, чтобы перераспределить заново «веса» подсистем и соответствующие уровни допустимых затрат. Если решение найдено, то «остаток» финансовых ресурсов  $\Delta z = z_i^* - z_i$  (разница между реальными затратами и ограничением) перераспределяется между оставшимися подсистемами пропорционально их весу. Процедура повторяется, пока не будут перебраны все дочерние подсистемы.

Данный метод не гарантирует нахождения оптимального варианта подуровня, однако он позволяет находить вариант, близкий к оптимальному, за приемлемое время в случае, когда решение задачи оптимизации методом полного перебора нецелесообразно. Метод может быть использован не только для случая, когда межуровневые ограничения сводятся к ограничению на суммарные затраты, но и для любых ограничений аналогичного вида, например, когда ограничения накладываются на некоторые совместно используемые ресурсы.

Мы рассмотрели реализацию основных этапов системной технологии. Коротко охарактеризуем не рассмотренные этапы.

На **этапе организации выполнения** осуществляется разработка плана реализации принятых на предыдущем этапе решений, разработка обеспечивающих комплексов, оценка рисков. Формирование плана выполнения мероприятий осуществляется аналогично планированию выполнения системного анализа на подготовительном этапе. Разработка обеспечивающих комплексов (организационного, нормативно-правового, информационного) проводится аналогично выработке основных решений. Выявление и оценка возможных угроз выполнению плана осуществляется экспертами. При этом для структури-

рованного описания угроз может использоваться типовой класс «Риск», включающий такие атрибуты, как фактор риска, последствия, вероятность возникновения, значимость (величина убытка), меры по снижению риска и т. д.

**Этап оценивания результатов** выполняется аналогично этапу анализа ситуации. Осуществляется сравнительный анализ состояния, достигнутого в результате реализации решений, или прогнозируемых состояний с целевым состоянием. Для оценки используются критерии, выделенные на этапе постановки целей.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Каковы основные факторы сложности процесса системного анализа?
2. Что понимается под системной технологией системного анализа? Каково ее назначение?
3. Каковы основные этапы CASE-технологии разработки информационных систем?
4. Дайте краткую характеристику каскадной, спиральной и макетной схемы разработки информационной системы.
5. Какие методы структурного и объектно-ориентированного анализа и проектирования вы знаете?
6. Каковы основные тенденции в развитии CASE-средств?
7. Каковы основные этапы технологии реинжиниринга бизнес-процессов? Дайте краткую характеристику каждого из этапов.
8. Какие методологии и инструментальные средства используются в технологии реинжиниринга бизнес-процессов?
9. В чем суть блочно-иерархического подхода, используемого в технологиях автоматизированного проектирования сложных технических объектов?
10. Каковы основные тенденции в развитии современных средств автоматизированного проектирования технических систем (САПР)?
11. Поясните, в чем суть каждого из принципов (декларативности, иерархичности, итеративности, типизации, комплексированности) разработки системной технологии.
12. Каковы основные виды моделей, используемых в объектно-ориентированной методологии OMSD?
13. Что включает в себя модель компонентов методологии OMSD?

14. Что понимается под классом и объектом в методологии OMSD? Как могут быть связаны классы между собой?

15. Что такое мультиобъект в методологии OMSD? Как он формируется и для чего используется?

16. Что включает модель зависимостей атрибутов? Для решения каких задач она используется?

17. Что включает координационная модель? Для решения каких задач она используется?

18. Что понимается под регламентом объектно-ориентированной технологии системного анализа?

19. Что включает в себя подготовительный этап объектно-ориентированной технологии?

20. Каким образом выполняются различные виды анализа (ретроспективный, сравнительный, причинный) на этапе анализа ситуации?

21. Как описываются цели и формируется дерево целей в объектно-ориентированной технологии?

22. Что представляет собой модель проблеморазрешающей системы, формируемая на этапе выработки решений?

23. Как осуществляется формирование и выбор вариантов реализации компонентов системы?

24. В чем суть метода выбора в неопределенной ситуации, основанного на использовании коэффициентов уверенности?

25. В чем состоит метод нахождения оптимального сочетания вариантов дочерних подсистем при условии, что межуровневые зависимости заданы в виде аддитивных функций затрат и качества?

26. Как выполняются этапы организации выполнения и оценивания результатов?

## 5. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

### 5.1. Экономический анализ

#### 5.1.1. Содержание и методы проведения экономического анализа

Аппарат теории систем и системного анализа получил широкое распространение в экономическом анализе. Но прежде чем рассматривать конкретные методы и методологии, используемые в анализе экономических систем, проясним суть и содержание экономического анализа. Его можно определять дескриптивно – через описание предмета анализа либо конструктивно — через указание его назначения, цели проведения и места в практической человеческой деятельности.

**Предметом экономического анализа** являются хозяйственные процессы предприятий, объединений, ассоциаций, социально-экономическая эффективность и конечные финансовые результаты их деятельности, складывающиеся под воздействием объективных и субъективных факторов и получающие отражение через систему экономической информации [73, 74].

Как правило, экономический анализ опирается на систему экономических показателей. Анализируются показатели, характеризующие: конечные результаты деятельности предприятия по выпуску и реализации продукции; себестоимость; рентабельность; выполнение договорных обязательств со смежниками; эффективность использования основных производственных фондов, материальных ресурсов, труда и заработной платы, прибыли, фондов экономического стимулирования. Экономический анализ, по существу, представляет собой исследование количественных аспектов экономических явлений. Однако *результат* такого исследования — не количественные показатели как таковые, а содержание, которое они выражают, их *экономическая интерпретация*. Целями анализа являются:

- оценка результатов хозяйственной деятельности;
- исследование факторов образования и изменения результатов деятельности;
- выявление тенденций развития бизнеса;
- выработка экономической стратегии развития;
- обоснование планов и управленческих решений;
- контроль выполнения планов и решений.

Таким образом, с конструктивной точки зрения *экономический анализ* является элементом научного обоснования руководящих решений в бизнесе.

Существует множество **классификаций видов экономического анализа** по разнообразным признакам. Рассмотрим наиболее распространенные.

В зависимости от *масштаба объекта анализа* различают [74]:

- народнохозяйственный анализ;
- отраслевой анализ, территориальный анализ;
- анализ ведомств и предприятий;
- анализ производственных единиц (цехов, отделов, участков);
- анализ стадий расширенного воспроизводства (снабжения, производства, распределения, потребления);
- анализ различных аспектов производственной деятельности (технико-экономического, социально-экономического, экономико-правового, экономико-экологического);
- анализ составных элементов производства и производственных отношений.

Дифференциация анализа хозяйственной деятельности предприятия по *типам потребителей анализа* позволяет выделить [73]:

- внутренний управленческий анализ, являющийся составной частью управленческого учета и выполняемый для информационного обеспечения администрации, руководства предприятия;
- внешний финансовый анализ, выполняемый на основании публичной финансовой и статистической отчетности для обслуживания внешних пользователей информации о пред-

приятии — собственников, вышестоящих органов управления, контрагентов (поставщиков, покупателей, кредитных организаций).

В зависимости от *стадии управленческого цикла*, на которой выполняется анализ, выделяют:

- предварительный (прогнозный) анализ, выполняемый на стадии планирования;
- текущий (оперативный) анализ, выполняемый в процессе оперативного управления и руководства выполнением плана;
- заключительный (итоговый) анализ, выполняемый на стадии заключительного контроля по итогам деятельности за тот или иной период.

*По длительности анализируемого периода* различают годовой, квартальный, месячный, декадный, ежедневный анализ.

**Методологическую основу экономического анализа** составляют принципы системного анализа, так как большинство объектов, изучаемых экономической наукой, представляют собой сложные системы. *Сложность экономических систем* определяется множеством и разнородностью входящих в них элементов, большим количеством и разнообразием связей между элементами и взаимоотношений систем с окружающей средой. Любой хозяйствующий субъект представляет собой целостное объединение элементов различной природы. Это и индивидуумы, образующие организационную структуру, и элементы производственно-технической структуры (орудия труда, материальные ресурсы, продукция), и информационные объекты (документы, информационные системы). В системах протекают природные, технологические, социальные процессы, действуют объективные и субъективные факторы.

Существенно усложняет экономический анализ и динамичность объекта исследования. В результате внутренних и внешних взаимодействий экономические системы подвержены постоянным изменениям. Причем из-за действия случайных факторов эти изменения невозможно точно спрогнозировать.

Таким образом, экономический анализ можно определить как *методологию, базирующуюся на законах развития*

*и функционирования систем*, рассматривающую экономические процессы и явления в их взаимосвязи, в постоянном движении и развитии [73, 74].

**Модель как средство экономического анализа.** Основным инструментом экономического анализа является модель, позволяющая выделить существенные с точки зрения цели анализа свойства сложной экономической системы, структурировать и формализовать знания о моделируемом объекте и, используя формальные и неформальные методы, получить новое знание — решение поставленной задачи. Поскольку в ходе анализа в основном обрабатываются количественные данные о хозяйственных процессах, в моделях широко используют математический аппарат и поэтому они называются *экономико-математическими*. Данный тип моделей помимо того, что опирается на общие принципы построения моделей, имеет свои особенности. Рассмотрим основные *принципы разработки экономико-математических моделей*.

1. **Комплексность.** Принцип комплексности предполагает *полноту и всесторонность* рассмотрения объекта анализа. Множество разнообразных внешних и внутренних сил, действующих на хозяйствующие субъекты, определяют разнообразие причин возникновения экономических явлений и разнообразие последствий. Необходимо учитывать влияние самых разнообразных факторов (природных, технических, социальных, производственно-экономических) на результаты хозяйственной деятельности. Выделение и исследование отдельных частей экономической системы значительно упрощает анализ. Для этого при построении экономико-математических моделей широко используется так называемый *прием детализации* (аналог декомпозиции). В зависимости от цели и объекта анализа хозяйственные процессы расчленяются по временному признаку, месту совершения хозяйственных операций, центрам ответственности и т. д. [73].

Важно рассматривать все элементы экономической системы, а также различные состояния системы и ее элементов не изолированно, а во *взаимосвязи*. Для правильного понимания сути любого экономического явления необходимо выявить и отразить в модели все его причинно-следственные

отношения с другими явлениями. Например, влияние внедрения новой техники на себестоимость продукции двояко: с одной стороны, увеличиваются издержки производства, а значит, и себестоимость, с другой стороны, при этом растет производительность труда, что способствует экономии заработной платы и снижению себестоимости [73]. С целью выявления и измерения влияния факторов на величину исследуемых экономических показателей при разработке экономико-математических моделей применяются методы *факторного анализа*.

**2. Учет неопределенности.** При построении экономико-математических моделей необходимо учитывать неопределенность, вызванную, с одной стороны, действием внешних и внутренних случайных факторов на субъекты экономической деятельности (это, так называемая объективная неопределенность), а с другой стороны, неполнотой и неточностью информации об экономических явлениях (информационная неопределенность). Объективная неопределенность неизбежна, так как точно спрогнозировать поведение потребителей и контрагентов, а также политическую, макроэкономическую ситуацию невозможно. Даже внутренние планируемые и управляемые процессы предприятий подвержены случайным воздействиям, прежде всего, из-за «человеческого фактора». Поведение любой социосистемы (системы с участием человека) недетерминировано, так как у человека имеются собственные цели и интересы, определенная свобода действий.

Информационная неопределенность во многом связана со сложностью сбора информации из-за большого объема данных, ограниченностью доступа к необходимой информации, а также сложностью проверки адекватности моделей, их верификации из-за невозможности поставить «чистые» натурные эксперименты. Для учета неопределенности при моделировании экономических процессов широко используют математический аппарат, отражающий стохастичку: теорию вероятностей и математическую статистику, теорию игр, теорию массового обслуживания, стохастическое программирование, теорию случайных процессов. Для снижения информационной неопределенности используют следующие способы и приемы:

имитационное моделирование; проведение многовариантных расчетов и модельных экспериментов с вариацией конструкции модели и ее исходных данных; изучение устойчивости и надежности получаемых решений; проверку истинности статистических гипотез о связях между параметрами и переменными модели; сопоставление решений, полученных с помощью «конкурирующих» моделей.

3. *Динамичность*. Динамичность экономических процессов, изменчивость их параметров и структурных отношений порождает ряд требований к процессу разработки экономико-математических моделей, в частности к организации сбора информации.

Моделирование в экономике должно опираться на *массовые наблюдения*. «Моментальная фотография» состояния экономического процесса не позволяет судить о тенденциях его развития. Закономерности поведения экономических систем не обнаруживаются на основании лишь одного или нескольких наблюдений. Вследствие этого экономические процессы приходится постоянно держать под наблюдением, необходимо иметь устойчивый поток новых данных. Для обработки данных массовых наблюдений используются методы экономической статистики.

Изменчивость объектов экономического анализа обуславливает необходимость применения такого аналитического приема, как *сравнение*. Дать правильную оценку деятельности предприятия можно только сравнивая его показатели во времени (за различные предшествующие периоды), в пространстве (с показателями аналогичных предприятий, со среднеотраслевым уровнем), а также с требованиями, нормативами, планами [73, 75].

Необходимо учесть и быстрое устаревание информации. Поскольку наблюдения за экономическими процессами и обработка эмпирических данных обычно занимают довольно много времени, то при построении математических моделей экономики требуется постоянно корректировать исходную информацию с учетом ее запаздывания.

*Классификация моделей*, используемых в экономическом анализе, может осуществляться по разным признакам.

В разделе 2 мы уже рассматривали основные классификации моделей. Остановимся на тех, которые наиболее существенны для анализа хозяйственной деятельности предприятия.

**По степени абстрактности** модели можно разделить на формализованные (математические) и слабо формализованные (семантические). В экономическом анализе используются главным образом математические модели, описывающие изучаемое явление или процесс с помощью уравнений, неравенств, функций и других математических средств [75]. Например, в задачах детерминированного факторного анализа исходная факторная модель отражает функциональную зависимость некоторого результирующего показателя процесса  $y$  от набора факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :  $y = f(x_1, x_2 \dots x_n)$ . Это могут быть аддитивные, мультипликативные или кратные модели:

$$y = \sum_{i=1}^n x_i, \quad y = \prod_{i=1}^n x_i, \quad y = \frac{x_1}{x_2}.$$

Например, объем производства продукции может рассчитываться как сумма объемов выпуска отдельных изделий (аддитивная модель) или как произведение среднесписочной численности работников и средней выработки на одного работника (мультипликативная модель). Кратные модели широко используются при построении разнообразных индексов — относительных показателей, выражающих отношение текущего значения фактора к значению, взятому в качестве базы сравнения (например, к плановому или эталонному значению). Чаще всего используются цепной индекс (рассчитанный по отношению к предыдущему периоду) и базисный (рассчитанный по отношению к базисному периоду).

Специальные методы детерминированного факторного анализа (цепных подстановок, арифметических разниц, дифференциальный, интегральный и др.) позволяют выявить, какую долю в приращение результирующего показателя вносит тот или иной фактор.

Аналитические зависимости используются и в балансовых моделях, с помощью которых соизмеряются два комплекса показателей, стремящихся к определенному равновесию.

Аналитический балансирующий показатель определяется как разница между суммами по каждой из групп показателей:

$$z = \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{j=1}^m y_j .$$

Например, при анализе обеспеченности предприятия сырьем сравнивают потребность в сырье, источники покрытия потребности и определяют балансирующий показатель — дефицит или избыток сырья.

Как вспомогательный, балансовый метод применяют для проверки результатов факторного анализа. Если отклонение результирующего показателя от базового значения равно сумме его отклонений за счет всех факторов, то расчеты проведены правильно. Отсутствие равенства свидетельствует о неполном учете факторов или о допущенных ошибках.

Большое значение в экономике играют оптимизационные математические модели (модели математического программирования). На их основе решаются задачи, относящиеся к процессу планирования деятельности, в частности определяются оптимальные параметры выпуска продукции при имеющихся ограничениях на ресурсы. Постановка задачи содержит уравнение целевой функции и систему ограничений. Примером может являться модель ассортиментной задачи:

$$L = \sum_{j=1}^n p_j x_j \rightarrow \max,$$
$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq w_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n},$$

где  $x_j$  — количество производимой продукции  $j$ -го вида;

$p_j$  — прибыль, получаемая от производства единицы продукции  $j$ -го вида;

$a_{ij}$  — норма расхода  $i$ -го ресурса на производство единицы  $j$ -го вида продукции;

$w_i$  — запасы  $i$ -го вида ресурса на рассматриваемый период.

Решение оптимизационных задач опирается на методы теории принятия решений, исследования операций, теории массового обслуживания.

Семантические модели, в частности содержательные, логические, нечеткие, также применяются в экономическом анализе. Они формируются на основе знаний экспертов с использованием формальных и неформальных методов системного анализа, теории нечетких множеств, эвристических методов изобретательской деятельности, методов искусственного интеллекта и теории экспертных систем. Так, в [41] можно найти примеры решения экономических задач на основе метода анализа иерархий, метода морфологического анализа, эвристических приемов, методов теории нечетких множеств. В [36] рассматривается применение интеллектуальных информационных систем в экономике, в частности экспертных систем экономического анализа деятельности предприятия, систем инвестиционного проектирования, динамических экспертных систем управления бизнес-процессами.

*По учету фактора неопределенности* выделяют детерминированные и стохастические модели. Стохастическое моделирование получило широкое распространение в экономическом анализе. В частности, в факторном анализе финансово-хозяйственной деятельности стохастические модели используются, когда необходимо оценить влияние факторов, по которым нельзя построить детерминированную модель. На основе статистических моделей (корреляционного, регрессионного анализа) решаются следующие задачи факторного анализа [73]:

- установление факта наличия (или отсутствия) статистически значимой связи между изучаемыми признаками;
- прогнозирование неизвестных значений результирующих показателей по заданным значениям факторных признаков (задачи экстраполяции и интерполяции);
- выявление причинных связей между изучаемыми показателями, измерение их тесноты и сравнительной степени влияния.

Кроме того, статистическое моделирование используется для сравнения, сопоставления данных и фактов хозяйственной жизни при решении задач [75]:

- построения усредненных нормативов хозяйственной деятельности;

- ранжирования и классификации объектов хозяйствования;
- нахождения общих закономерностей функционирования объекта анализа;
- анализа структурных сдвигов в совокупности объектов.

Для решения перечисленных задач применяются такие статистические методы, как группировка многомерных наблюдений, таксонометрический метод, дисперсионный анализ, индексные методы, метод средних величин и др.

*По учету фактора времени* различают статические и динамические модели. В экономическом анализе используются и те, и другие. Динамические модели позволяют проанализировать изменение показателей деятельности предприятия во времени. Например, на основе анализа ряда динамики некоторого показателя за определенный предшествующий период исчисляют абсолютный прирост или темп роста и прироста показателя. При этом используются базисные индексы, рассчитанные по отношению к базисному периоду, и цепные, рассчитанные по отношению к предыдущему периоду.

Один из довольно распространенных видов анализа на основе динамических моделей — трендовый. Он используется для определения тренда — основной тенденции динамики показателя, очищенной от случайных влияний и особенностей отдельных периодов. С помощью тренда можно не только выявить закономерности функционирования системы в прошлом, но и сформировать возможные значения показателей в будущем, т. е. выполнить перспективный, прогнозный анализ [75].

Еще один вид динамических моделей — имитационные. Они используются в том случае, когда исследуемые процессы настолько сложны и многообразны, что аналитическая модель становится слишком грубым приближением к действительности. Методы имитационного моделирования позволяют воспроизвести на компьютере (с помощью специальных программ) процесс функционирования реальной экономической системы, причем с учетом многочисленных случайных воздействий.

## **5.1.2. Системное описание экономического анализа**

Под системным описанием экономического анализа будем понимать последовательность проведения анализа сложных экономических систем средствами экономико-математического моделирования, опирающуюся на методологию системного анализа. Несмотря на разнообразие целей и задач экономического анализа, используемых моделей и методов его проведения, можно выделить пять типовых этапов, осуществляемых в той или иной мере практически при любом виде анализа. Рассмотрим эти этапы.

### **1. Выявление цели анализа и условий его проведения**

Прежде всего, необходимо выделить объект анализа. Примерами задач анализа, объектом которых выступает предприятие в целом, являются: комплексный экономический анализ эффективности хозяйственной деятельности; анализ и оценка финансового состояния организации; анализ рыночной устойчивости предприятия. Примерами анализа отдельных сторон или подсистем предприятия являются: анализ в системе маркетинга; анализ объема продукции; анализ использования производственных ресурсов; анализ организационно-технического уровня и других условий производства; анализ в обосновании бизнес-плана.

Важно точно представлять, для кого проводится анализ, кто является потребителем, так как от этого во многом зависит содержание анализа и исходных данных. Так, финансовый анализ может проводиться как для внешних субъектов — инвесторов, налоговых органов, поставщиков, покупателей, так и для руководства предприятия, его администрации. В первом случае используются только открыто публикуемые отчетные данные и содержанием анализа является зачастую только грубая оценка финансового состояния предприятия, например рейтинг среди конкурентов. Во втором случае информационной базой анализа служит вся система информации о деятельности предприятия, включая внутреннюю информацию, составляющую коммерческую тайну. При этом содер-

жанием внутреннего финансового анализа является не только оценка сложившегося финансового состояния, но и исследование причин его возникновения, тенденций изменения, исследование возможностей улучшения.

Следует четко сформулировать сущность исследуемой проблемы и цель анализа, т. е. вопросы, на которые требуется получить ответы. Как правило, целями анализа являются:

- оценка результатов хозяйственной деятельности (по сравнению с нормативами или плановыми показателями, по отношению к конкурентам или среднему уровню по группе предприятий), оценка динамики прошлой деятельности и прогноз дальнейшего развития;

- выявление причин возникновения текущей ситуации, выявление закономерностей ее развития, причинно-следственных связей между различными состояниями;

- разработка оптимальных плановых решений по выбранным критериям эффективности при заданных ограничениях, разработка мероприятий по повышению эффективности деятельности предприятия.

Необходимо оценить сроки проведения анализа и имеющиеся ресурсы. От этого зависит глубина и размах исследований: будет ли проводиться экспресс-анализ или детализированный анализ, какой объем данных будет исследоваться, будут ли использоваться компьютерные информационные системы и т. д.

Желательно уже на этом этапе определить примерный тип экономико-математической модели, которая будет построена в ходе анализа и возможные методы поиска решений на модели.

## **2. Определение структуры предметной области**

На данном этапе выделяются подсистемы предметной области путем декомпозиции. Результатом является дерево подсистем (модель компонентов по терминологии методологии OMSD, описанной в разделе 4). Декомпозиция может осуществляться различными способами, по разным основаниям — по объектам анализа, по этапам анализа, по способам и т. д.

В качестве примера на рис. 5.1 представлена структура анализа финансового состояния организации (составлена на основе [73]), полученная путем декомпозиции процесса анализа на отдельные задачи (этапы). Совокупность всех блоков на каждом уровне дерева обеспечивает решение задач предыдущего уровня.

Так, комплексный анализ финансового состояния предприятия включает в себя пять направлений, представленных на втором уровне. В свою очередь, анализ по каждому из направлений предполагает решение более мелких задач, представленных на нижнем уровне.

В случае когда структурные блоки представляют собой этапы выполнения анализа, можно построить также модель взаимосвязи этапов, например, по технологии IDEF0. Такая модель будет особенно полезна в том случае, если результаты выполнения одних этапов используются на других. Кроме того, на IDEF0-модели можно отобразить ресурсы (людские, информационные, программно-технические), которые задействованы в анализе на каждом его этапе.

### **3. Формирование взаимосвязанной системы показателей, формализация**

Задача этого этапа — построение модели, которая бы отражала связи между исходными показателями, описывающими объект анализа, и результирующими оценками. Сначала каждый блок иерархии, построенной на предыдущем этапе, рассматривается как «черный ящик», т. е. определяются его входы (исходные данные) и выходы (результаты анализа). Входами могут быть данные финансовой или управленческой отчетности, выходами — оценки, обобщенные показатели, критерии.

Показатели могут быть сгруппированы по временному признаку (динамические ряды по нескольким периодам), пространственному (например, по предприятиям-конкурентам), по различным аспектам или элементам анализируемого объекта. По терминологии методологии OMSD на данном шаге составляются классы описания компонентов, т. е. определяется состав атрибутов.

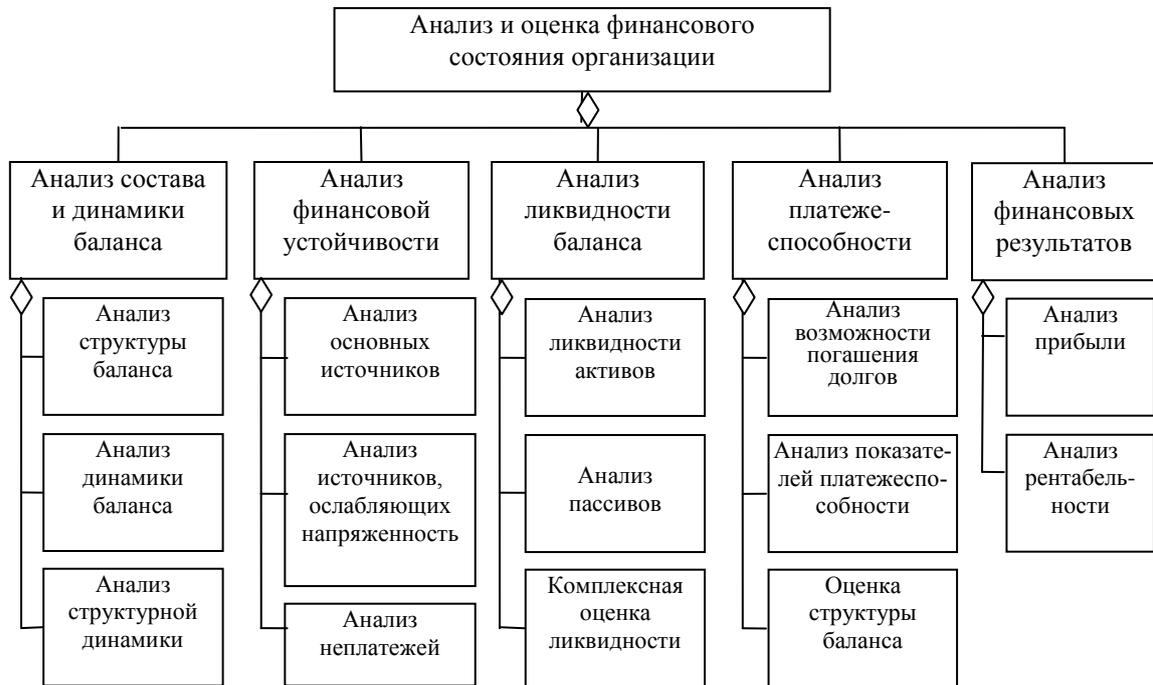


Рис. 5.1. Структура анализа финансового состояния организации

Рассмотрим для примера состав показателей блока «анализ ликвидности активов», являющегося частью анализа ликвидности баланса (см. рис. 5.1), для которого можно использовать простой (приближенный) метод группировки или метод нормативов скидок. Для обоих методов обобщенным показателем является платежный излишек/недостаток следующих активов:

- наиболее ликвидных активов;
- быстрореализуемых активов;
- медленно реализуемых активов.

Он определяется на основе соотношения статей актива и пассива баланса, являющихся, таким образом, исходными данными.

После того как будет сформирована система показателей, для каждого блока формируется «полупрозрачный ящик», т. е. определяются зависимости между исходными показателями и результирующими. На данном шаге неважен вид этих зависимостей (с помощью каких формул, уравнений вычисляются значения результирующих показателей). Главное — выявить сам факт их наличия, причем могут быть указаны даже гипотетические зависимости.

Удобно схематично показать связь показателей. Это может быть иерархия (граф «И-ИЛИ»), в которой каждый зависимый показатель представляет собой целевую переменную, а определяющие его показатели-аргументы — подчиненные вершины, соединенные либо конъюнкцией («И»), либо дизъюнкцией («ИЛИ»). По терминологии OMSD такая иерархия называется сетью зависимостей атрибутов.

Сеть лучше строить от корня (стока) — целевого результирующего показателя, определяя сначала непосредственно влияющие на него показатели, а затем для каждого из этих показателей уже подчиненные им показатели, до тех пор пока не будут достигнуты независимые (базовые) переменные. В ходе построения сети может измениться первоначальный состав показателей — могут добавиться промежуточные показатели, необходимые для расчета результирующих, и, наоборот, некоторые показатели могут оказаться лишними.

На рис. 5.2 показана сеть зависимостей показателей, построенная для уже упоминавшегося блока «анализ ликвидности активов» (при ее построении авторы опирались на методику, описанную в [36]). Оценка баланса ликвидности (*OBL*) определяется на основе показателей платежного излишка/недостатка наиболее ликвидных, быстро- и медленно реализуемых активов (обозначенных соответственно *A11*, *A12* и *A13*). Каждый из этих показателей определяется на основе соотношения активов и пассивов по соответствующим срокам.

Для вычисления активов и пассивов используются статьи бухгалтерского баланса. В частности, к наиболее ликвидным активам (*A1*) относятся денежные средства и краткосрочные финансовые вложения (строка 110 баланса). Быстрореализуемые активы определяются на основе показателя «денежные средства, расчеты и прочие активы» (строка 220) за вычетом наиболее ликвидных активов и т. д.

Нужно построить схемы зависимостей не только для каждого блока нижнего уровня, но и для блоков вышестоящих уровней для отражения зависимостей между показателями разных блоков. Иногда удобнее построить единую модель сразу для нескольких блоков. Кроме того, для расчета некоторых показателей может быть построена отдельная модель. Например, если для оценки деятельности предприятия необходимы некоторые усредненные значения по группе предприятий, то можно построить модель для определения средних величин на некоторой выборке.

На заключительном этапе построения модели для каждого блока формируется «прозрачный ящик», т. е. все зависимости между показателями должны быть полностью определены и формализованы. Для каждого показателя, зависящего от других параметров, задается конкретный вид зависимости, например, в виде формулы, уравнения, правил-продукций, разнообразных процедур.

Вернемся к примеру оценки баланса ликвидности (см. рис. 5.2). Показатели *A11*, *A12* и *A13* определяются как разница между соответствующими активами и пассивами:

$$A11 = A1 - P1; \quad A12 = A2 - P2; \quad A13 = A3 - P3.$$



Рис. 5.2. Сеть зависимостей между показателями для модели анализа ликвидности активов

Активы и пассивы рассчитываются с помощью простейших арифметических операций, например, используя приближенный метод, можно записать [36]:

$$A1 = D;$$

$$A2 = Ra - D;$$

$$A3 = Z + Sf + FT + Rta;$$

$$P1 = Rp + Ko;$$

$$P2 = Kt - Ko;$$

$$P3 = KT + Rtp.$$

Наименования переменных, задействованных в формулах, представлены на рис. 5.2.

Зависимость оценки баланса ликвидности *OBL* от показателей *A11*, *A12* и *A13* определяется либо ЛППР в ходе интерпретации конкретных значений коэффициентов, либо на основе общих логических правил, предложенных экспертами.

Пример правил:

If  $A11 \geq 0$  &  $A12 \geq 0$  &  $A13 \geq 0$  Then *OBL* = «удовл.» cf 0,65;

If  $A11 \geq 0$  &  $A12 < 0$  &  $A13 \geq 0$  Then *OBL* = «удовл.» cf 0,75;

If  $A11 < 0$  &  $A12 < 0$  &  $A13 \geq 0$  Then *OBL* = «неудовл.» cf 0,75,

где cf — коэффициент уверенности.

#### 4. Проведение расчетов на модели

Данный этап начинается с исследования модели. В ходе этапа выясняются такие вопросы, как, например, единственно ли решение, какие переменные (неизвестные) могут входить в решение. Не всегда искомыми переменными являются целевые показатели, находящиеся в стоках сети зависимостей. Иногда решается обратная задача, т. е. определяются значения базовых показателей, обеспечивающие наилучшее или заданное значение производного показателя. Например, в некоторых задачах факторного анализа ищется не прирост результирующего показателя, а приросты факторов, влияющих на него. Аналогично в оптимизационных моделях искомыми являются не критерии, а управляемые переменные, расположенные в истоках сети и определяющие значение критерия.

Может существовать несколько различных способов поиска решения на модели. В этом случае осуществляется выбор наиболее подходящего способа. Например, если оптимизационная задача не поддается решению аналитическим спо-

собою, можно пойти путем генерации вариантов решений и последующей их оценки по заданному критерию. Если ни один из известных способов решения не подходит к построенной модели, можно попытаться разработать алгоритм для численного решения или вернуться к предыдущему этапу и скорректировать модель. Затем происходит сбор исходных данных и собственно нахождение решения на модели.

### **5. Анализ полученного решения, его применение**

На этом заключительном этапе встает вопрос о правильности и полноте результатов моделирования, о степени практической применимости последних. Могут использоваться как математические методы проверки, так и неформальные.

Найденное на модели решение — это еще не управленческое решение, готовое к реализации. До того как начать действовать, лицу, принимающему решение, необходимо осмыслить результаты анализа, сформулировать выводы, ответить на вопрос, нужно ли предпринять какие-то меры по изменению текущего положения, и в случае положительного ответа на этот вопрос выработать практические меры. При этом для выработки управленческого решения может понадобиться выполнение еще одного цикла моделирования.

### **5.1.3. Анализ финансовой устойчивости предприятия**

Рассмотрим применение описанной в предыдущем пункте системной последовательности для решения задачи факторного анализа финансовой устойчивости предприятия.

#### **1. Выявление цели анализа и условий его проведения**

Анализ финансовой устойчивости любого хозяйствующего субъекта является важнейшей характеристикой его деятельности, финансово-экономического благополучия, характеризует результат его текущего, инвестиционного и финансового развития, содержит необходимую информацию для инвестора, а также отражает способность предприятия отвечать по своим долгам и обязательствам, наращивать свой экономический потенциал в интересах акционеров [76].

Таким образом, объектом анализа выступает предприятие, потребителями анализа могут быть как внешние, так и внутренние менеджеры, целью анализа является получение комплексной качественной оценки финансовой устойчивости предприятий на основе данных бухгалтерской отчетности.

Остановимся подробнее на выборе методики анализа. Большинство подходов к оценке финансового состояния предприятия, описанных в литературе, основаны на расчете специальных коэффициентов, характеризующих платежеспособность и финансовую устойчивость предприятия. Коэффициенты, рассчитанные на основе данных бухгалтерского баланса, сопоставляются с их нормативными значениями, что и составляет заключительный акт оценки. Несовершенство действующей методики оценки финансового состояния предприятий состоит в том, что в ней, по существу, нет градации, все предприятия оцениваются одинаково. Между тем для каждого предприятия существует точка финансово-экономического равновесия, двигаясь от которой вверх или вниз, предприятие соответственно либо набирает запас устойчивости, либо теряет его и переходит в область неустойчивости [76]. Поэтому более реальную картину дает оценка, учитывающая динамику изменения состояния. Методикой, опирающейся на такой подход, является методика экспресс-анализа финансовой устойчивости предприятия с использованием ординальной (порядковой, ранговой) шкалы ситуаций, описывающих динамику изменения ведущих показателей финансового состояния [76].

Методика предполагает последовательное выполнение статического и динамического анализа. Статический экспресс-анализ позволяет сделать вывод о состоянии предприятия на определенный момент времени, например на начало или конец отчетного периода, на основе данных бухгалтерского баланса за соответствующий отчетный период. Динамический экспресс-анализ позволяет определить комплексную характеристику изменения финансово-экономической устойчивости предприятия за отчетный период, учитывающую не только характер динамики (улучшение положения, ухудшение, стабилизация), но и начальное и конечное состояния устойчивости.

## 2. Определение структуры предметной области

Основным методологическим положением, на котором построен анализ, является оценка состояния предприятия по соответствию структуры капитала  $K$ , характеризующей содержание собственности, структуре экономических активов  $A$ , раскрывающей формы воплощения собственности. Поэтому отправной точкой в построении модели предметной области является структура баланса, представленная на рис. 5.3.

Капитал разделяется на собственный  $KS$  и заемный  $KZ$ , а активы разбиваются на нефинансовые  $AN$  и финансовые  $AF$ . В свою очередь, нефинансовые активы подразделяются на долгосрочные  $AND$  и оборотные  $ANO$ , а финансовые — на немобильные  $AFN$  и мобильные  $AFM$ . Сумма немобильных финансовых активов и всех нефинансовых активов составляет немобильные активы  $ANM$ .

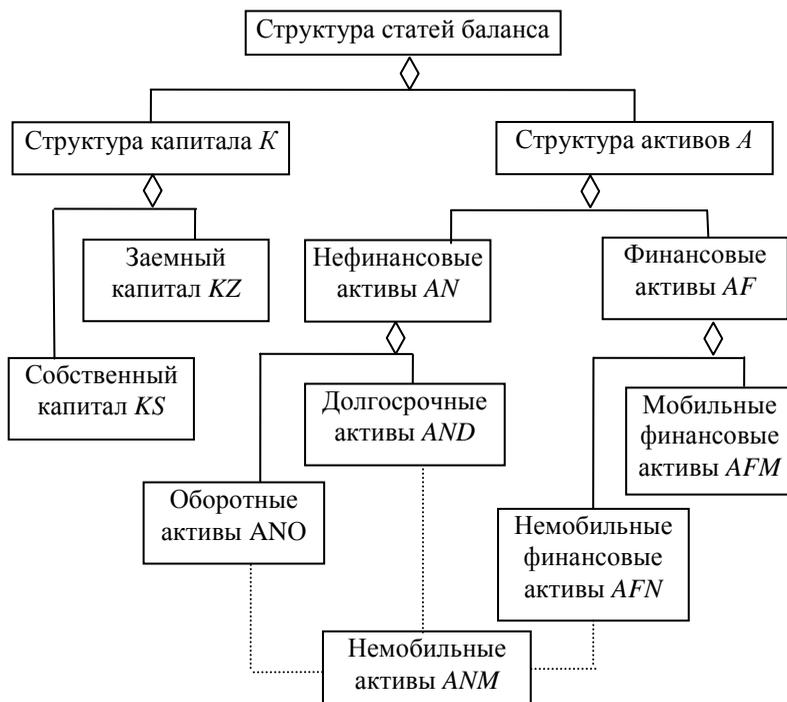


Рис. 5.3. Структура баланса

Различные состояния финансовой устойчивости определяются на основе сопоставления структуры капитала и экономических активов (рис. 5.4).

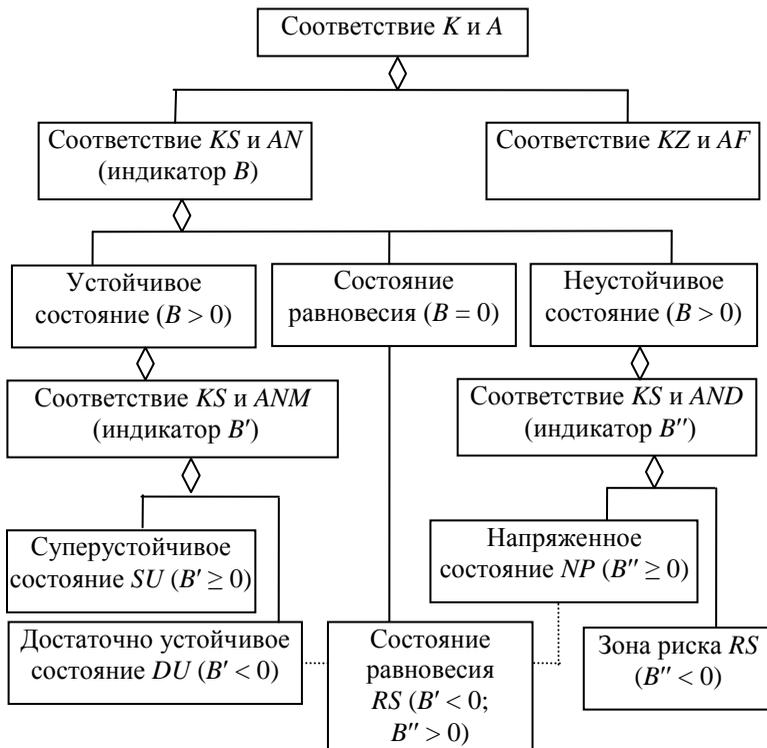


Рис. 5.4. Состояния финансово-экономической устойчивости

Финансовое равновесие состоит, во-первых, в равенстве собственного капитала и нефинансовых активов и, во-вторых, в равенстве заемного капитала и финансовых активов. Второе равенство является следствием первого.

Таким образом, критерием устойчивости может служить разность между собственным капиталом и нефинансовыми активами, называемая индикатором финансово-экономической устойчивости  $B$  ( $B = KS - AN$ ). Устойчивым является состояние превышения собственного капитала над нефинансовыми

активами ( $B > 0$ ) и состояние равновесия ( $B = 0$ ). Состояние превышения нефинансовых активов над собственным капиталом ( $B < 0$ ) характеризуется как неустойчивое [76].

В устойчивом состоянии ( $B > 0$ ) «запас» устойчивости может быть оценен через разность между собственным капиталом и немобильными активами, называемую индикатором абсолютной платежеспособности  $B'$  ( $B' = KS - ANM$ ). Если имеется избыток собственного капитала по отношению к немобильным активам ( $B' \geq 0$ ), то ситуация классифицируется как суперустойчивая  $SU$ , в противном случае ( $B' < 0$ ) — как достаточно устойчивая  $DU$ .

Ситуацию неустойчивого состояния ( $B < 0$ ) дополнительно характеризует *разность* между собственным капиталом и наименее ликвидными активами — нефинансовыми долгосрочными активами, называемая индикатором потенциальной платежеспособности  $B''$  ( $B'' = KS - AND$ ).

Ситуация, при которой данный индикатор положителен ( $B'' \geq 0$ ), классифицируется как напряженная  $NP$ , ситуация, при которой индикатор отрицателен ( $B'' < 0$ ), называется зоной риска  $RS$ .

Ситуация равновесия  $RN$  характеризуется следующими значениями индикаторов:  $B = 0$ ;  $B' < 0$ ;  $B'' > 0$ .

При необходимости может быть построена более детальная шкала оценки финансовой устойчивости [76].

Для динамической оценки используются приростные значения основного и дополнительных индикаторов, т. е. разности между значениями каждого индикатора на начало и конец отчетного периода.

Выделение пяти классов финансово-экономической устойчивости (суперустойчивость, достаточная устойчивость, равновесие, напряженность, зона риска) обуславливает 20 возможных переходов из одного класса в другой.

Кроме того, в рамках одного класса возможны три варианта динамики: возрастание, сохранение, снижение. Исключив из рассмотрения бессмысленные и практически невозможные переходы (например: возрастание или снижение равновесия, переход от состояния риска к суперустойчивости

или достаточной устойчивости), получаем 29 возможных переходов от состояния к состоянию.

Так, имеется 7 вариантов динамики с начальным суперустойчивым состоянием:

- 1)  $SU - SU +$ ; 2)  $SU - SU -$ ; 3)  $SU - SU$ ; 4)  $SU - DU$ ;
- 5)  $SU - RN$ ; 6)  $SU - NP$ ; 7)  $SU - RS$ .

Все ситуации перехода проранжированы по степени убывания устойчивости [76].

### 3. Формирование взаимосвязанной системы показателей, формализация

Итак, основными показателями для определения статической оценки  $OS$  являются индикаторы: финансово-экономической устойчивости  $B$ , абсолютной платежеспособности  $B'$  и потенциальной платежеспособности  $B''$ .

Для их вычисления используются показатели  $KS, AND, ANO, AFN, ANM, AN$ , которые, в свою очередь, рассчитываются на основании данных бухгалтерского баланса на конец отчетного периода. Динамическая оценка  $OD$  определяется на основе приростных (по сравнению с предыдущим периодом) значений индикаторов  $B, B'$  и  $B''$ .

На рис. 5.5, *a* и *б* представлены сети зависимостей показателей соответственно для статического и динамического анализа финансово-экономического состояния предприятия.

Примеры формул, по которым рассчитываются показатели:

$$B = KS - AN; B' = KS - ANM; B'' = KS - AND;$$

$$AND = P110 + P120 + P130;$$

$$KS = P490 - P450 - P465 - P475,$$

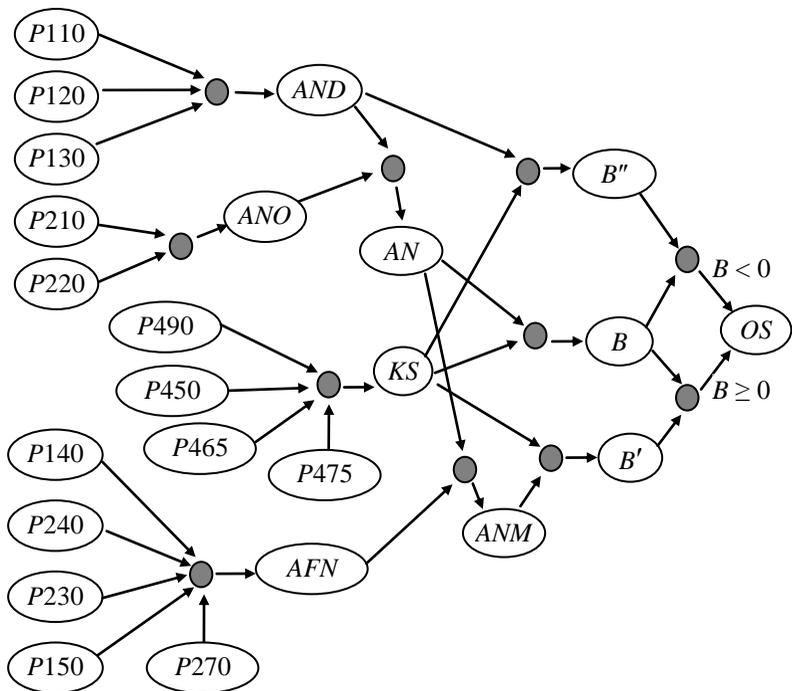
где  $P110, P120, \dots$  — соответственно 110-я, 120-я, ... строки баланса.

Примеры правил:

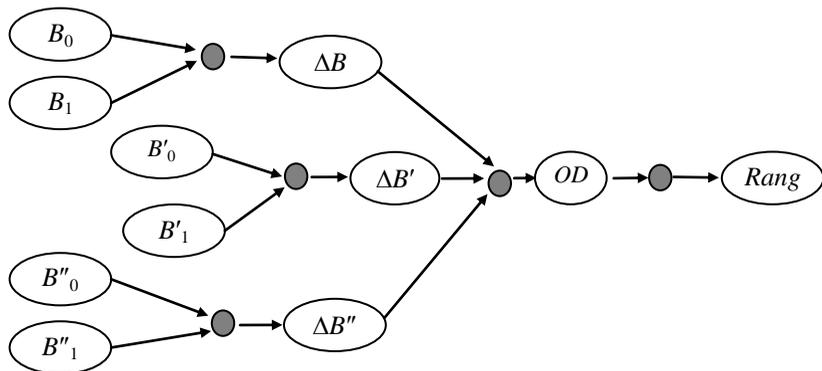
If  $B = 0$  &  $B' < 0$  &  $B'' > 0$  Then  $OS = RN$ ,

If  $B_0 > 0$  &  $B_1 \geq 0$  &  $B_1' > 0$  &  $B_0'' \geq 0$  &  $\Delta B' > 0$  Then  $OD = SU - SU +$ ,

If  $B_0 < 0$  &  $B_0' \geq 0$  &  $B_1' > 0$  &  $B_0'' < 0$  &  $\Delta B > 0$  Then  $OD = NP - DU$ .



a



б

Рис. 5.5. Сети зависимостей показателей для анализа финансово-экономического состояния предприятия:  
*a* — для статического анализа; *б* — для динамического анализа

#### 4. Проведение расчетов на модели

Пример расчета статической и динамической оценки финансовой устойчивости предприятия приведен в табл. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

Результаты статического экспресс-анализа финансовой устойчивости

Наименование атрибута	Предыдущий период	Текущий период
Собственный капитал	101044	107596
Нефинансовые активы	79507	116386
Немобильные активы	98638	139205
Долгосрочные нефинансовые активы	76198	77702
Индикатор финансово-экономической устойчивости	21537	-8790
Индикатор абсолютной платежеспособности	2406	-31609
Индикатор потенциальной платежеспособности	24846	29894
Статическая оценка финансово-экономического состояния	<i>SU</i>	<i>NP</i>

Таблица 5.2

Результаты динамического экспресс-анализа финансовой устойчивости

Наименование атрибута	Значение
Прирост индикатора финансово-экономической устойчивости	-30147
Прирост индикатора абсолютной платежеспособности	-34015
Прирост индикатора потенциальной платежеспособности	5048
Динамическая оценка финансово-экономического состояния	<i>SU – NP</i>
Ранг ситуации перехода	17

Для проведения экспресс-анализа финансовой устойчивости предприятия по описанной методике разработана компьютерная программа (авторы: Силич М.П., Хабибулина Н.Ю., Горбатов З.В.) на основе оболочки экспертных систем WinEsisp [77]. Данная информационная система позволяет

решать не только задачи анализа, но и прогнозирования состояния предприятия, а также выбора значений экономических характеристик предприятия, обеспечивающих переход в заданное состояние устойчивости. Сравнение результатов применения информационной системы для ряда предприятий с заключениями экспертов по их финансовой устойчивости показало высокую согласованность оценок. Разработанный прототип экспертной системы является хорошей основой для создания полноценной коммерческой системы.

#### **5.1.4. Имитационное моделирование экономических процессов**

**Понятие имитационного моделирования.** Суть имитационного моделирования состоит в копировании на компьютере реальных процессов. Компьютерная программа воспроизводит процесс функционирования физической системы во времени, причем явления, составляющие процесс, имитируются с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, и дает возможность оценить характеристики системы. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях [78].

Несомненным преимуществом имитационного моделирования является возможность изучить длительный интервал функционирования системы в сжатые сроки. При этом можно осуществлять многократные испытания модели с различными входными данными, чтобы определить их влияние на выходные критерии оценки работы системы. Проведение экспериментов с реальными системами, как правило, требует значительно больше времени и затрат, а зачастую в принципе невозможно. Например, необходимо принять управленческое

решение по закупке нового оборудования или найме/увольнению сотрудников. Реальные действия могут привести к негативным последствиям: купленное оборудование простаивает из-за недостаточной его загруженности; после увольнения части сотрудников оставшийся персонал не справляется с объемом работы. Оценка же загруженности ресурсов (оборудования или персонала) при тех или иных условиях путем имитационного моделирования позволяет принять правильные решения. Можно разработать ряд альтернативных вариантов моделей системы, «проиграть» их на компьютере и затем определить, какой из них наиболее соответствует исходным требованиям. Таким образом, машинная имитация — это, по существу, эксперимент в искусственных условиях.

Имитационное моделирование помогает в изучении свойств и законов развития сложной системы, выявлении факторов, наиболее важных для ее успешного функционирования, анализе «узких мест», а также определении наилучших способов управления при заданных целях и критериях, прогнозировании прямых и косвенных последствий реализации заданных способов воздействия на систему [79].

#### **Методы и средства имитационного моделирования.**

В основе большинства современных систем имитационного моделирования лежит математический аппарат сетей Петри (СП) и систем массового обслуживания (СМО).

Сети Петри — это дискретная динамическая модель с наглядным графическим представлением (рис. 5.6).

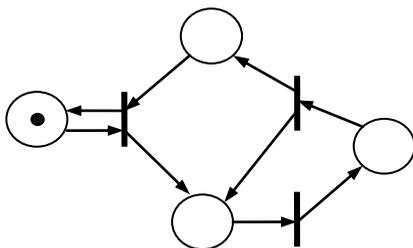


Рис. 5.6. Пример сети Петри: ● — фишка; ○ — позиция;  
| — переход

Структура СП определена как ориентированный граф с вершинами двух типов, называемых позициями (отображаются кружками) и переходами (отображаются черточками). В позиции помещаются объекты (фишки). Изменение состояния СП обусловлено срабатыванием переходов. Каждый переход сопровождается удалением объектов из каждой его входной позиции и добавлением их в выходные позиции. Последовательность срабатываний переходов полностью определяет поведение сети. Количество и распределение фишек сети определяют динамику исследуемой системы.

Система массового обслуживания состоит из одного или более обрабатывающих устройств (сервисов), обслуживающих прибывающие в систему сущности (заявки). Сущности — это элементы, обрабатываемые в системе, например: клиенты, обслуживаемые в ресторане, больнице, аэропорту; документы, которые должны быть обработаны; сырье, материалы, преобразуемые в готовую продукцию. Сущность, находящая сервис занятым, встает в очередь перед ним. Сервис осуществляет обслуживание каждой сущности некоторое (случайное) время, после чего освобождается и готов принять следующую заявку.

В качестве инструментальных средств имитационного моделирования используются: специализированные языки программирования, программные пакеты, не требующие программирования; инструментальные среды. Среди программных языков наибольшее распространение получил GPSS (General Purpose System Simulation) — язык интерпретируемого типа, ориентированный на статистическое моделирование процессов с дискретными событиями. Примером программных пакетов, ориентированных на непрограммирующего пользователя, является ПП «Arena». Пользователь, работая с данным пакетом, создает модель средствами визуального моделирования — путем манипулирования мышью и задания свойств элементов модели в диалоговых окнах. Среди инструментальных сред следует назвать, прежде всего, G2 — средство для разработки конкретных приложений реального времени, использующих базы знаний. Данный инструментариий располагает мощной средой разработчика, автоматизирующей созда-

ние приложений. С его помощью разрабатываются интеллектуальные системы, в частности динамические экспертные системы управления бизнес-процессами.

### **Имитационное моделирование с помощью ПП «Arena».**

Рассмотрим последовательность анализа бизнес-процесса, выполняемого с помощью системы имитационного моделирования «Arena». В качестве основы будем использовать системное описание экономического анализа, представленное в п. 5.1.2.

#### ***1. Выявление цели анализа и условий его проведения***

Примерами объектов анализа, осуществляемого средствами ПП «Arena», являются:

- производственные процессы (например: процессы обработки деталей, процессы сборки, логистические процессы);
- процессы массового обслуживания (например: обслуживание клиентов в магазинах, парикмахерских, отделениях связи, кредитных учреждениях);
- функционирование транспортных систем (например: автомагистралей, аэропортов, метрополитена);
- процессы сбора, обработки и передачи информации (например, в системах электронного документооборота).

Как правило, моделирование проводится для целей внутреннего менеджмента компаний. Целями моделирования могут быть:

- анализ загрузки/простоя ресурсов (оборудования, персонала), определение необходимого количества ресурсов, выявление требований к их производительности;
- анализ характеристик времени (например, определение среднего (максимального, минимального) времени обслуживания клиента или производства определенного вида продукции);
- анализ стоимости процессов (например, определение средней (максимальной, минимальной) добавочной или общей стоимости в расчете на единицу продукции или одного клиента).

#### ***2. Определение структуры предметной области***

Моделируемый процесс декомпозируется на отдельные действия (функции, подпроцессы, работы, операции) и создается структурная схема, отображающая логику выполнения всего

процесса. Каждое отдельное действие называется процессом (Process) и отображается в модели в виде схемных модулей. Связи между процессами, означающие переходы от действия к действию и зачастую сопровождающиеся передачей сущностей, отображаются в виде линий.

Для процессов разного типа используются разные графические обозначения. На рис. 5.7 приведены обозначения некоторых процессов.

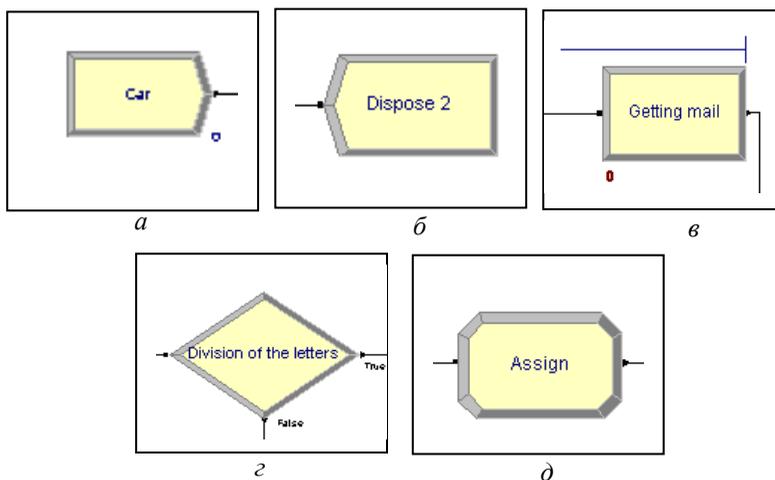


Рис. 5.7. Графические модули ПП «Arena»:  
*a* — модуль Create; *б* — модуль Dispose; *в* — модуль Process;  
*г* — модуль Decide; *д* — модуль Assign

Модуль Create (рис. 5.7, *a*), или Источник, создает сущности, обрабатываемые в системе. Он имитирует, например, прибытие клиентов в банк или в магазин, поступление документов (заказов, чеков), начало изготовления продукции на производственной линии.

Модуль Dispose (рис. 5.7, *б*), или Сток, удаляет сущности из системы. Он имитирует, например, уход клиентов из банка или магазина, окончание обработки документа или изготовления изделия.

Модуль Process (рис. 5.7, в) является основным модулем процесса обработки в имитационной модели. Он имитирует, например, обслуживание клиентов, обработку документов или деталей, выполнение заказов. Модуль может захватывать определенные ресурсы, которые занимаются обработкой сущности. После окончания обработки ресурсы освобождаются. Вместо стандартного модуля Process можно использовать подмодель, отражающую логическую структуру выполнения сложного процесса обработки сущности. Таким образом, можно построить иерархию процессов.

Модуль Decide (рис. 5.7, з) служит для принятия решений в имитационной модели. Он позволяет проверять условия и в зависимости от результата проверки направлять сущности по той или иной ветке (тому или иному процессу). Обычно условия основаны на значениях атрибутов (характеристик) сущностей. Например, если клиенту банка требуется операция снятия со счета, то он направляется в один отдел, если он хочет оформить кредит, то — в другой отдел.

Модуль Assign (рис. 5.7, д) предназначен для задания значения переменной в системе, в частности значения атрибута сущности. Например, можно задать номер операции, требуемой клиентом, или тип документа.

Существуют также модули данных, к которым относятся модули: сущностей, очередей, ресурсов, переменных. Они не отображаются физически в блок-схеме модели, но с их помощью можно задать различные характеристики элементов модели [79].

Схемные модули соединяются между собой на диаграмме в соответствии с логикой выполнения имитируемого процесса. На рис. 5.8 приведена в качестве примера имитационная модель системы обслуживания клиентов в банке.

Модуль Create имитирует приход клиентов в банк. Модуль Assign присваивает клиентам атрибут *oper* — номер кассовой операции (один из трех видов операций). Модуль Decide 1 распределяет клиентов по кассам в зависимости от операции, которую им необходимо выполнить. Модули Process 1, Process 2, ... Process 5 имитируют работу соответственно первого, второго, ... пятого кассира. Модуль Decide 2

распределяет клиентов между вторым и третьим кассиром, выполняющими операцию 2. Модуль *Decide 3* распределяет клиентов между четвертым и пятым кассиром. Модуль *Dispose* имитирует уход клиента из банка.

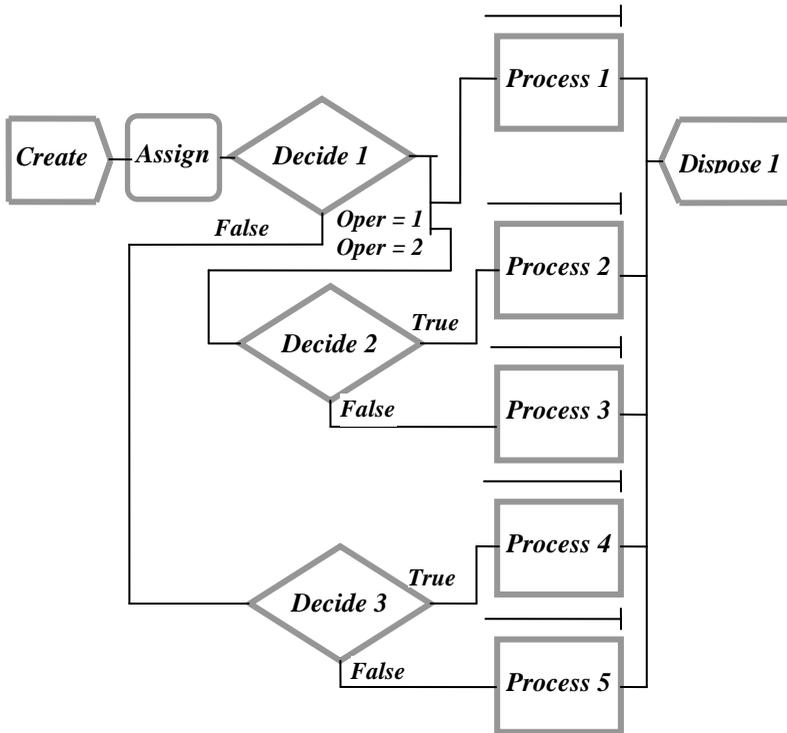


Рис. 5.8. Имитационная модель системы обслуживания в банке

### 3. Формирование взаимосвязанной системы показателей, формализация

Для каждого из модулей уже существует стандартный набор параметров. Пользователю остается только ввести в диалоговом окне конкретные значения этих характеристик. Рассмотрим основные параметры описанных выше модулей.

Модуль *Create* содержит следующие параметры: *Name* (имя модуля), *EntityType* (тип создаваемых сущностей), *Type*

(способ формирования потока прибытия), Expression (тип распределения, определяющего время между прибытиями сущностей) и др.

В ПП «Arena 7.0» заложены 13 типов стандартных распределений: равномерное, треугольное, нормальное, экспоненциальное, пуассоновское и др. Наиболее часто используются равномерное и треугольное распределение, приведенные на рис. 5.9, *a* и *б*. Равномерное распределение показывает, что вероятность возникновения события  $P_1$  одинакова (равновероятна) на интервале от min до max (например, клиенты приходят раз в 5–9 минут). Треугольное распределение показывает, что наиболее вероятно (Most likely) появление события в какое-то определенное время (например, клиенты приходят раз в 5–9 минут, но чаще всего раз в 7 минут).

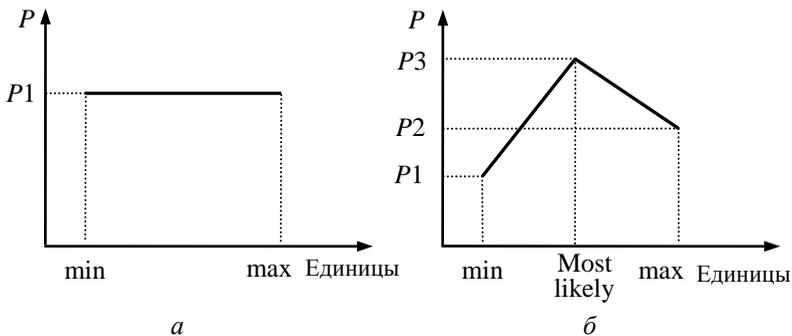


Рис. 5.9. Графики распределений:  
*a* — равномерного; *б* — треугольного

Важнейшими параметрами модуля Process являются: Name (имя модуля), Action (тип обработки, происходящей внутри модуля), Resources (ресурсы, которые будут обрабатывать сущности в этом модуле), Delay Type (тип распределения или процедура, определяющая параметры задержки — времени, затрачиваемого на обработку).

Для модуля Decide наиболее важным является параметр Type, определяющий тип принятия решения: *By Chance* — выбор направления основывается на вероятности и *By Con-*

*dition* — проверка на выполнение конкретно заданного условия. В случае если задан тип *By Chance* нужно определить параметр Percent True, определяющий процент сущностей, который пойдет по направлению True (истина). Если задан тип *By Condition* требуется задать условие, которое будет проверяться на выполнение.

При описании модуля Assign нужно задать параметры: Type — тип назначения, которое будет осуществляться, Variable Name (Attribute Name) — имя изменяемой переменной (атрибута), New Value — присваиваемое новое значение (может быть случайным значением, определяемым по заданному закону распределения).

Можно задать также параметры модулей данных. Так, для модуля сущности можно задать тип сущности и ее анимационную картинку в имитационном процессе, для модуля очереди — правило расстановки сущностей в очереди («первый вошел, первый вышел», «последний пришел, первый вышел» и др.), для модуля ресурса — стоимостную информацию и вместимость ресурса.

Зависимости между параметрами одного или разных модулей, а также между параметрами модулей и обобщенными характеристиками частично задаются пользователем при описании модулей, частично уже заложены в программу.

#### **4. Проведение расчетов на модели**

На данном этапе осуществляется «проигрывание» модели, т. е. собственно имитация. Пользователю необходимо задать условия окончания эксперимента, например, общее время проведения эксперимента или количество сущностей, которые должны пройти через систему. Также необходимо задать характеристики системы, по которым требуется получить статистику и которые будут отражены в отчете, формируемом по результатам имитации. ПП «Arena» поддерживает следующие виды отчетов [79]:

- по сущностям, находящимся в системе — общее время нахождения в системе, суммарное время ожидания, среднее, максимальное и минимальное значение стоимости (общая стоимость вычисляется путем сложения стоимости ожидания, добавочной и недобавочной стоимости) и др.;

- по очередям, образующимся в модулях процессов, — среднее, максимальное и минимальное время ожидания обработки в очереди, количество сущностей, ожидающих в очереди;
- по процессам — статистика по характеристикам времени и стоимости (аналогично отчету по сущностям);
- по ресурсам — статистика по затраченным ресурсам.

Имитация в ПП «Arena» происходит в режиме продвижения модельного времени от события к событию (рис. 5.10). В исходном состоянии часы модельного времени устанавливаются на нуле. Затем опрашиваются все модули и определяется время возникновения будущих событий. После этого часы модельного времени переходят на время возникновения ближайшего события, и в этот момент обновляется состояние системы (состояния всех модулей) с учетом произошедшего события, а также сведения о времени возникновения будущих событий. Затем часы модельного времени продвигаются ко времени возникновения следующего нового ближайшего события, обновляется состояние системы и определяется время будущих событий и т. д. Поскольку все изменения происходят только во время возникновения событий, периоды бездействия системы просто пропускаются. Процесс продвижения модельного времени продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие останова.

На рис. 5.10 видно, что модельное время  $t_1, t_2, \dots$  выставляется не равномерно, а в соответствии со временем возникновения событий  $e_1, e_2, \dots$ .

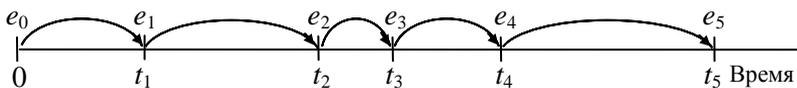


Рис. 5.10. Механизм продвижения модельного времени от события к событию

После «проигрывания» модели автоматически генерируется отчет. Например, для модели, представленной на рис. 5.7, можно получить отчет по среднему (максимальному) времени ожидания клиентов в очередях перед кассирами.

### **5. Анализ полученного решения, его применение**

Проанализировав полученный отчет, пользователь решает, следует ли продолжить эксперименты с моделью. В случае положительного ответа в модель вносятся коррективы с тем, чтобы промоделировать работу системы в других условиях. Например, для системы обслуживания клиентов в банке, рассмотренной выше, можно построить другие модели, отличающиеся распределением операций между кассирами. «Проиграв» каждую из моделей в течение одинакового промежутка времени, можно сравнить среднее время ожидания клиентов в очередях системы. Вариант, в котором время ожидания минимально, можно считать наилучшим.

## **5.2. Анализ систем организационного управления**

### **5.2.1. Понятие организационной структуры**

**Структура организации** — это фиксированные отношения, которые существуют между подразделениями и работниками организации, наиболее существенными из которых являются отношения подчиненности, отношения полномочий и информационные отношения.

Таким образом, организационная структура включает в себя: структуру подчиненности (распределение сфер управления); структуру полномочий (распределение власти и ответственности); структуру коммуникаций (распределение информации) [80].

**Структура подчиненности** строится на разделении труда между членами организации. При этом можно выделить вертикальное и горизонтальное разделение (рис. 5.11).

**Вертикальная дифференциация** связана с разделением на уровни власти, построенные в иерархическом порядке. Руководитель высшего уровня управляет деятельностью подчиненных сотрудников, расположенных на нижележащих уровнях. Различают высший, средний и нижний уровень управления, а также исполнительский уровень.

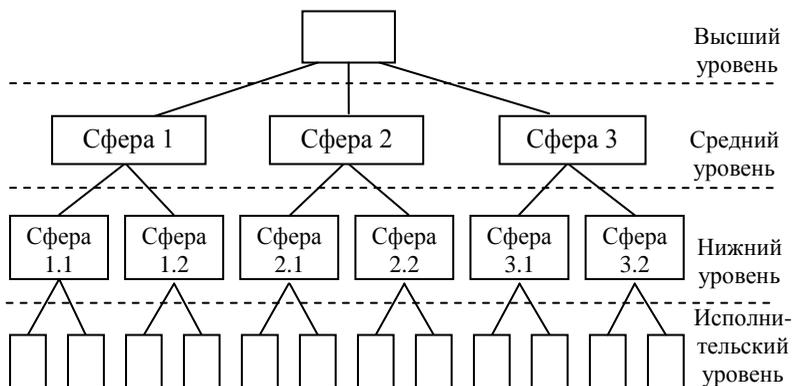


Рис. 5.11. Горизонтальное и вертикальное разделение труда

Менеджеры *высшего уровня* (директор или президент, члены совета директоров) несут ответственность за деятельность фирмы в целом и занимаются в основном стратегическим планированием, а также организацией и контролем основных направлений деятельности. Менеджеры *среднего уровня* (руководители департаментов, отделов, служб) отвечают за отдельные направления, такие как снабжение, производство, сбыт, финансы и т. д. Они сосредоточивают свое внимание на оперативном планировании, координации и контроле работы групп, руководимых менеджерами нижнего звена. Важнейшие задачи менеджеров *нижнего уровня* (руководителей групп, бригад, участков, лабораторий) — руководство исполнителями.

Реальное количество уровней управления может быть и меньше, и больше трех. В небольших организациях функции руководителей среднего и нижнего звена могут выполняться менеджерами одного уровня. В крупных компаниях количество уровней достигает пяти-шести и во многом зависит от количества исполнителей. Дело в том, что управляющие не могут эффективно управлять слишком большим количеством людей. Диапазон контроля<sup>9</sup> (число работников, находящихся

<sup>9</sup> Используются также термины «охват контролем», «интервал контроля», «интервал управления», «масштаб управления», «норма управляемости».

в непосредственном подчинении), как правило, составляет 3–10 человек. Поэтому подразделения, в которых работает большее количество сотрудников, разбиваются на более мелкие и вводится еще один уровень управления.

**Горизонтальная дифференциация** отражает разделение сфер управления по направлениям, требующим специализированных знаний и умений. Группировка работников компании в специализированные подразделения, выполняющие определенные виды деятельности, называется департаментализацией. Чаще всего используются следующие *виды департаментализации* (признаки горизонтального распределения сфер управления) [22, 25]:

- функциональный — создание подразделений, выполняющих определенную функцию (маркетинг, производство, снабжение и др.);
- предметный (продуктовый) — разделение управления по отдельным видам продукции или услуг;
- территориальный (географический) — создание подразделений на базе определенных территорий (регионов);
- проектный — создание подразделений на временной основе для выполнения некоторого проекта;
- технологический — выделение подразделений, выполняющих отдельные этапы технологического цикла производства продукции.

Реже используются такие виды департаментализации, как «по потребителям», «по периодам времени», «по процессам».

По сути, виды департаментализации представляют собой основания декомпозиции/композиции. Неслучайно, что многие виды департаментализации совпадают со стандартными основаниями декомпозиции (см. п. 2.4.1).

**Структура полномочий** строится на основе структуры подчиненности и включает в качестве дополнительных элементов задачи подразделений. Распределение полномочий между менеджерами различных уровней осуществляется через **делегирование** — передачу прав принимать решения по определенным вопросам от вышестоящих менеджеров своим подчиненным. Делегирование расширяет возможности верхних

эшелонов руководства по переработке информации, обеспечивает возможности для обучения менеджеров нижестоящих уровней, для внедрения специализации. Делегирование ответственности подчиненному не снимает эту ответственность с лица, ее передавшего. При этом объем делегированной ответственности должен соответствовать объему делегированных прав.

Распределение полномочий определяет **уровень централизации/децентрализации**. В сильно централизованной организации решения принимаются только на верхних уровнях иерархии. Децентрализация проводится за счет предоставления больших прав и обязанностей нижестоящим работникам.

**Структура коммуникаций** определяет пути передачи информации между сотрудниками организации. Существуют два основных направления распространения деловой информации в организации (рис. 5.12): вертикальное (вверх и вниз по уровням иерархии) и горизонтальное (на одном уровне иерархии).

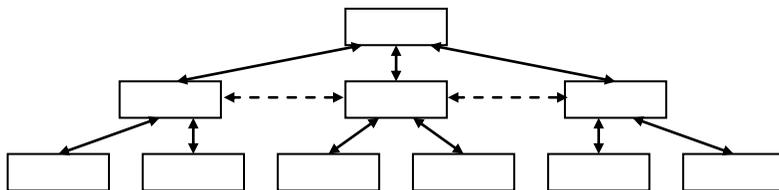


Рис. 5.12. Вертикальные и горизонтальные связи

Использование вертикальных связей базируется на принципе «цепи команд». Этот принцип, выдвинутый Файолем, состоит в том, что линия власти в организации начинается сверху и опускается вниз через всю организацию, образуя целостную цепь. Это путь приказов и распоряжений, движущихся сверху вниз, и путь отчетов, движущихся снизу вверх.

При высокой степени централизации использование только вертикальных связей может оказаться достаточным для управления организацией. Децентрализация часто сопровождается возрастанием потребности в согласовании решений, принимаемых менеджерами одного уровня, и соответственно в налаживании горизонтальных связей.



С увеличением размеров организации или ассортимента продукции, а также при работе в быстро изменяющемся секторе рынка возникает и возрастает недостаток профессиональной управленческой компетенции руководителя. Снижается и оперативность, так как руководитель «тонет» в текущих делах, не успевая заниматься стратегическими задачами.

**Функциональная структура.** Схема подчиненности формируется на основе распределения сфер управления по функциональному и технологическому признакам (рис. 5.14).

В непосредственном подчинении руководителя предприятия находятся менеджеры, руководящие выполнением той или иной функции предприятия — производством, снабжением, маркетингом, сбытом, финансами и т. д. Основные функции подлежат дальнейшему дроблению (в том числе и по технологическому признаку) и им сопоставляются управляющие более низкого уровня, и так вплоть до исполнительского уровня. Полномочия распределены следующим образом. Менеджеры функциональных подразделений, специализирующиеся на соответствующих функциях, обеспечивают выполнение стоящих перед ними задач в своей узкой области. Решение межфункциональных проблем и координация действий функциональных подразделений, как правило, возлагается на центральное руководство. Высокая степень централизации предполагает использование преимущественно вертикальных потоков информации.

Основным достоинством структуры является высокоэффективное выполнение специализированных задач. Менеджеры функциональных подразделений, проявляя свои профессиональные качества, могут обеспечивать качественное принятие решений, находящихся в их компетенции. Вместе с тем функциональная ориентация приводит к тому, что менеджеры заинтересованы в первую очередь в эффективности выполнения только собственных задач. Они не несут ответственность за общий результат. В такой организации очень трудно проследить вклад каждого участника общего процесса в конечный результат и общую прибыльность. Это препятствует инновационной деятельности, стремлению к широким перспективам [25, 80].

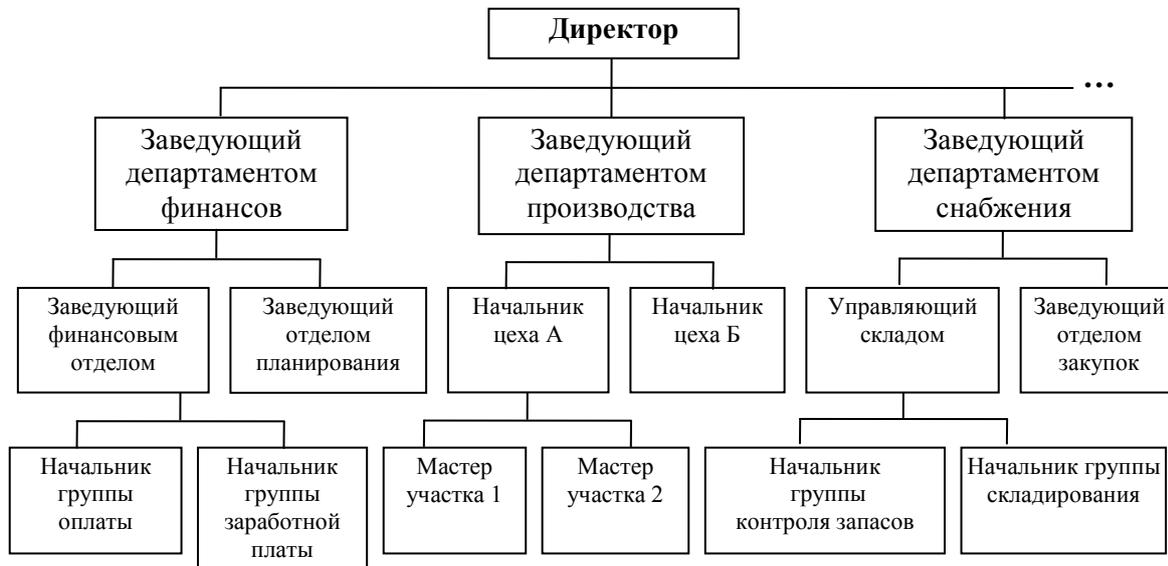


Рис. 5.14. Функциональная структура

Еще одна проблема функциональной организации — сложность координации функциональных подразделений. Потребность в согласовании действий подразделений возникает очень часто, ведь функции — это взаимосвязанные части общего процесса по производству некоторой продукции или оказанию услуги. Централизованная координация предполагает передачу информации о возникшей ситуации из низового подразделения по цепи высшему руководству. При этом могут возникать очень длинные пути прохождения информации, что негативным образом сказывается на оперативности решения межфункциональных проблем. Кроме того, централизованное управление возлагает на руководителя организации слишком большой груз обязанностей, что приводит к вероятности возникновения ошибок, задержке принятия решений. Уделяя большое внимание решению текущих проблем, руководитель меньше времени уделяет стратегическому планированию [25, 80].

Разновидность функциональной структуры — **линейно-функциональная**, в которой функциональными менеджерами считаются лишь руководители подразделений, выполняющих обеспечивающие функции (обслуживание оборудования, снабжение, обеспечение энергоресурсами, финансовая деятельность и др.), руководители же подразделений, осуществляющих технологический цикл производства продукции, называются линейными. Функциональные менеджеры, помимо руководства непосредственными подчиненными, имеют полномочия отдавать распоряжения линейным менеджерам, по вопросам, связанным с их функцией (рис. 5.15). Например, менеджер отдела энергообеспечения может издавать директивы по энергосбережению.

**Дивизиональная структура.** Структура основана на выделении *автономных центров* (отделений), руководству которых делегируются обширные полномочия по управлению всей деятельностью центра.

В схеме подчиненности выделяется центральное руководство и несколько автономных центров, построенных на основе либо продуктового, либо территориального вида департаментализации (рис. 5.16).

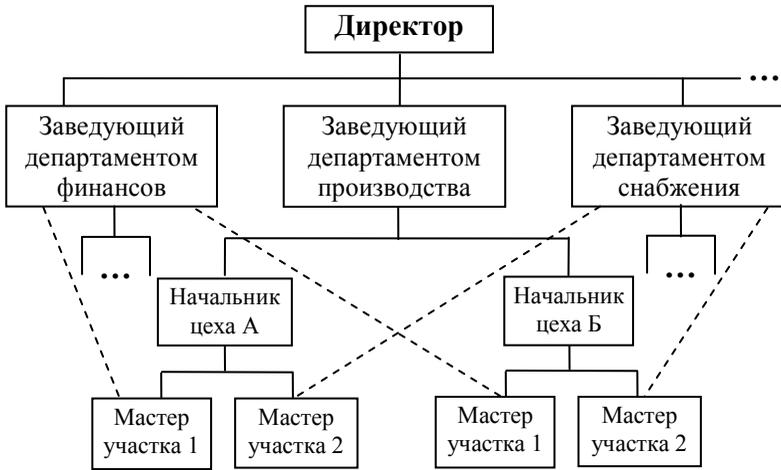


Рис. 5.15. Линейно-функциональная структура

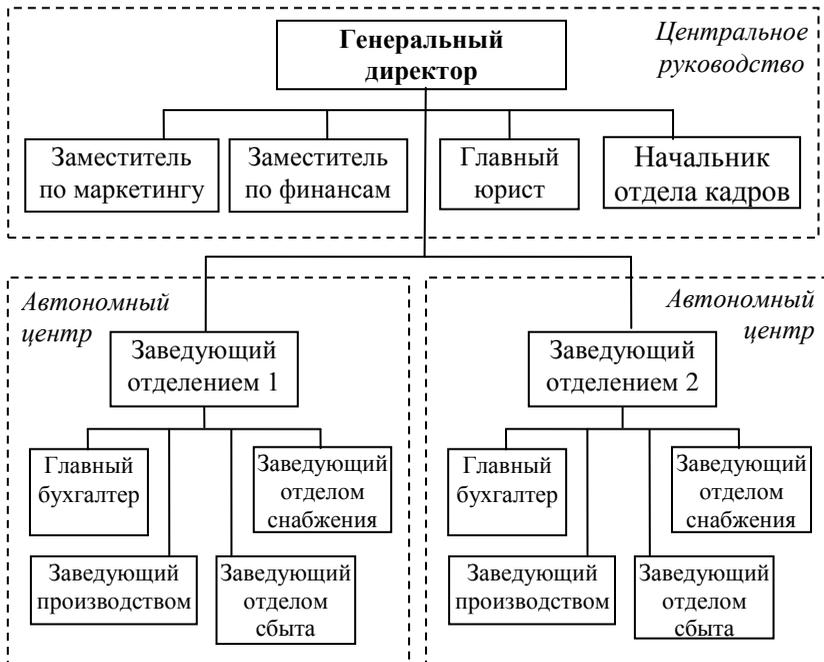


Рис. 5.16. Дивизиональная структура

При создании автономных центров по продуктовому признаку в каждый центр включаются подразделения, осуществляющие производственную, снабженческую, сбытовую, вспомогательную деятельность, связанную с изготовлением конкретного продукта или ассортимента продуктов. При структуризации по территориальному признаку создаются региональные центры (филиалы), в рамках которых группируются все виды деятельности предприятия на данной территории.

Распределение полномочий характеризуется тем, что руководители автономных центров имеют все полномочия в области планирования, управления, контроля и несут ответственность за получение прибыли. Таким образом, отделения являются самостоятельно хозяйствующими подразделениями. Центральное руководство занимается корпоративным стратегическим управлением. Оно концентрирует свои усилия на поиске инвесторов, на освоении новых рынков и новых технологий. Высшее руководство также осуществляет централизованную оценку результатов работы автономных центров, их вклада в общую прибыль компании [25, 80].

Интенсивно используются коммуникации внутри автономных центров (причем линии коммуникаций довольно коротки из-за небольшого размера центров). Связи между отделениями, а также между отделениями и центральным руководством значительно слабее.

Основное достоинство дивизиональной структуры — высокая ответственность руководителей центров за получение прибыли. Причем в рамках сравнительно небольшого отделения легко оценить вклад каждого участника в конечный результат и общую прибыльность. Повышается мотивация новаторского предпринимательского подхода. За счет сравнительно небольших размеров автономных центров упрощается координация действий функциональных подразделений и повышается оперативность принятия решений. Руководство отделений расположено ближе к покупателям, оно получает возможность лучше понять и удовлетворить их потребности. Это позволяет быстрее приспосабливаться к изменчивым условиям рынка.

Отрицательная сторона автономности отделений — возникновение дублирующих работ. Зачастую центры параллельно решают одни и те же задачи, выполняют одинаковую работу. Кроме того, руководство корпораций теряет возможность контролировать деятельность отделений, а также влиять на принятие решений по управлению отделениями. В этих условиях руководству компании сложно проводить единую предпринимательскую стратегию и сохранять единый имидж корпорации.

**Матричная структура.** Схема подчиненности характеризуется использованием одновременно двух каналов управления (рис. 5.17). Чаще всего один канал соответствует функциональному признаку структуризации, а второй — проектному или процессному (продуктовому) признаку.

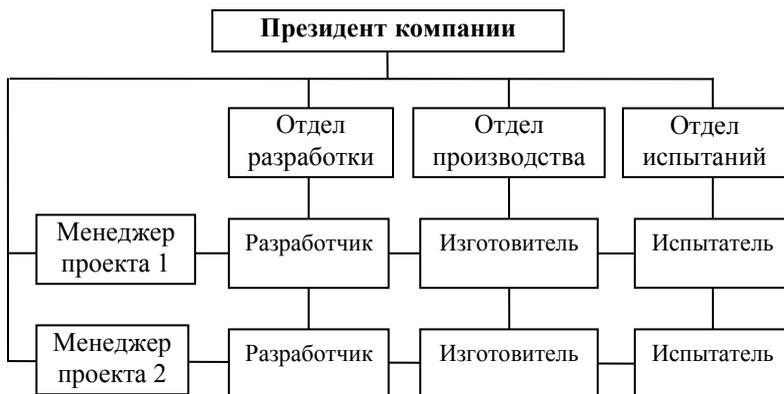


Рис. 5.17. Проектная матричная структура

Матричная структура, как правило, строится на основе функционально ориентированной структуры. Однако в ней кроме функциональных подразделений создаются *команды* — временные подразделения, занимающиеся выполнением определенной сложной многофункциональной задачи (проекта, выполняемого для конкретного заказчика, некоторой целевой программы, процесса, заканчивающегося созданием некоторого продукта или услуги). Соответственно матричная структура может быть проектной, программно-целевой или процессной.

В любом случае в одну команду собираются работники разных специальностей из разных функциональных подразделений для выполнения комплекса разнообразных работ, обеспечивающих решение поставленной задачи. Как правило, команда является временным подразделением, действующим до тех пор, пока не будет завершена задача (программа, проект). После этого работники возвращаются в свои подразделения к постоянной работе или переходят в новую команду для выполнения другой задачи. Исключение составляет процессная структура, в которой команды процесса могут действовать длительное время, если процесс является циклически повторяющимся. Примером такого процесса является обслуживание авиарейса (от регистрации пассажира до выдачи багажа по прибытии) [80].

Матричная структура характеризуется следующим распределением полномочий. Руководители команд (менеджеры проектов, руководители программ, владельцы процессов) имеют полномочия для руководства выполнением многофункциональной задачи и несут ответственность за конечный результат. Они осуществляют планирование, координацию, оперативное управление, контроль всех работ. Функциональные управляющие отвечают за выполнение определенной функции во всех командах. Они несут долговременную ответственность за находящихся в их распоряжении исполнителей, распределяют их по различным командам, обеспечивают профессиональный рост. Центральное руководство занимается стратегическим управлением, осуществляет общий контроль за финансовой деятельностью компании [25, 80].

В матричной структуре активно используются как вертикальные, так и горизонтальные связи, т. е. образуется сетчатая схема коммуникации. Основное достоинство матричной структуры — высокая согласованность в работе каждой команды и оперативное решение межфункциональных проблем. В отличие от функционально ориентированной структуры координация осуществляется непосредственно руководителем команды, а не через согласование решений руководителями функциональных подразделений или вышестоящим руководством. Таким образом, снимаются барьеры между исполни-

телями, входящими в различные функциональные подразделения, организуется совместная работа, оперативно координируемая менеджером команды.

Немаловажно и то, что руководители команд несут ответственность за конечный результат задачи (проекта, программы, процесса), что повышает их заинтересованность в повышении качества выполнения работ и сокращении стоимости. Возрастает мотивация к применению новаторского инновационного подхода. Одновременно повышается степень ответственности всех членов команды за конечный результат, так как оценка и оплата работы осуществляется в соответствии с полученным результатом.

Недостатком матричной структуры является то, что нечеткое разграничение обязанностей и ответственности между руководителями команд и функциональными менеджерами может привести к конфликтам. Функциональные руководители часто не заинтересованы в передаче своих ресурсов руководителям команд, т. к. это приводит к некоторой потере власти и влияния. Для устранения этого недостатка организуется «внутренний рынок»: функциональные менеджеры как бы «продают» свои ресурсы руководителям команд.

### **5.2.3. Методы анализа и синтеза оргструктур**

Рассмотрим применение некоторых методов теории систем и системного анализа для анализа и синтеза организационных структур.

**Экспертная оценка эффективности оргструктуры.** Оценка эффективности позволяет определить уровень действующей организационной структуры с целью принятия решения о необходимости ее совершенствования, а также разрабатываемых вариантов структур с целью выбора наиболее оптимального варианта.

В качестве критериев эффективности структуры могут служить объективные измеряемые показатели, характеризующие конечные результаты деятельности организации, например,

объем (увеличение объема) выпуска продукции, объем реализации, прибыль, себестоимость, объем капитальных вложений и т. д. [25]. Однако они лишь косвенно характеризуют структуру управления и к тому же они не могут быть использованы для оценки предлагаемых, но еще не реализованных вариантов структуры. Поэтому часто используют экспертные оценки, характеризующие потенциальную эффективность управления организацией.

Экспертное оценивание осуществляется по таким критериям, как оперативность принятия решений, адаптивность структуры к изменениям, экономичность аппарата управления, уровень мотивации, возможность компетентного управления, контролируемость работы подразделений и т. д.

В табл. 5.3 приведен пример экспертной оценки двух вариантов (В1 и В2) организационной структуры.

При определении весов критериев эксперты должны исходить, прежде всего, из условий функционирования организации. Так, для организаций, действующих на нестабильных рынках с постоянно изменяющимися условиями, приоритет имеют критерии «адаптивность оргструктуры» и «оперативность управления». Если организация действует в условиях, при которых очень высока цена ошибки, важны критерии «возможность компетентного управления» и «контролируемость решений». Для обслуживающих организаций, ориентированных на клиентов с индивидуальными потребностями, повышенный вес должны иметь критерии «ответственность подразделений за результат», «мотивация новаторского подхода». Веса могут быть определены путем непосредственной оценки важности критериев или путем парных сравнений.

Экспертные оценки вариантов по каждому критерию также могут быть получены любым из методов выявления мнений экспертов. Оценки могут измеряться в баллах, например числом в интервале от 0 до 1. Вместо количественных оценок можно использовать качественные оценки, которые затем уже будут переведены в баллы. Например, может использоваться следующая схема: отлично (о) = 1,0; очень хорошо (ох) = 0,75; хорошо (х) = 0,625; удовлетворительно (у) = 0,5; посредственно (п) = 0,25; неудовлетворительно (н) = 0.

Таблица 5.3

Экспертная оценка организационной структуры

Наименование критерия	Вес критерия	Оценка вариантов	
		B1	B2
Возможность компетентного управления	0,1	оx	у
Оперативность управления	0,15	н	о
Контролируемость работы подразделений	0,05	о	у
Координируемость решений	0,15	х	у
Адаптивность оргструктуры	0,15	п	оx
Экономичность аппарата управления	0,05	у	х
Мотивация новаторского подхода	0,15	н	оx
Ответственность подразделений за результат	0,2	п	о
Итоговая оценка		0,33	0,76

Оценки выставляются исходя из особенностей структуры, таких как степень централизации, длина путей коммуникации, признаки разделения сфер управления, распределение ответственности и др.

Например, централизованные структуры по критериям «контролируемость работы подразделений» и «координируемость решений» оцениваются, как правило, довольно высоко, зато по критериям «оперативность управления» и «адаптивность оргструктуры» — низко (особенно при большом размере организации, длинных путях коммуникации и жестком закреплении задач подразделений). Децентрализованные структуры, как правило, высоко оцениваются по критериям «ответственность подразделений за результат» и «мотивация новаторского подхода». Оценка по критерию «Экономичность аппарата управления» тем выше, чем меньше отношение численности управленцев к общей численности персонала.

Интегральная оценка определяется с помощью методов интеграции измерений. Например, итоговые оценки структур B1 и B2, приведенные в табл. 5.3, вычислялись по формуле аддитивной свертки. Вычисление оценки:

для варианта B1:

$$0,1 \cdot 0,75 + 0,15 \cdot 0 + 0,05 \cdot 1 + 0,15 \cdot 0,625 + 0,15 \cdot 0,25 + 0,05 \cdot 0,5 + 0,15 \cdot 0 + 0,2 \cdot 0,25 = 0,33;$$

для варианта В2:

$$0,1 \cdot 0,5 + 0,15 \cdot 1 + 0,05 \cdot 0,5 + 0,15 \cdot 0,5 + 0,15 \cdot 0,75 + 0,05 \cdot 0,625 + 0,15 \cdot 0,75 + 0,2 \cdot 1 = 0,76.$$

**Формирование вариантов структуры методом морфологического анализа.** Рассмотрим пример применения метода морфологического анализа (см. п. 2.4.2) для выработки концепции построения организационной структуры. В качестве комбинируемых признаков выбираются параметры, характеризующие принципы, на которых будет построена структура, способы ее создания, форму реализации и т. д. Для каждого признака формируются альтернативные варианты.

Примеры признаков и вариантов их значений для синтеза вариантов структуры:

- тип оргструктуры — функциональная (a11), дивизиональная с продуктовыми отделениями (a12), дивизиональная с региональными отделениями (a13), матричная процессная (a14);
- правовая форма — государственное предприятие (a21), ОАО (a22), ЗАО (a23), ООО (a24);
- источники обновления основных средств — собственные средства (a31), инвестиции сторонние (a32), кредитные ресурсы (a33);
- форма владения недвижимостью — аренда (a41), покупка (a42), строительство (a43);
- расчет за приобретаемые технологии и оборудование — за счет заемных средств (a51), за счет собственных средств и готовой продукции (a52), лизинг (a53).

После того как будут выбраны подходящие признаки, осуществляется комбинирование альтернатив и отбрасывание наихудших комбинаций — несовместимых, наименее эффективных и труднореализуемых, не соответствующих требованиям. При этом лучше использовать пошаговую процедуру с последовательным перебором признаков.

Пример результатов комбинирования вышеперечисленных признаков приведен в табл. 5.4–5.7. В табл. 5.4 отражены результаты комбинирования признаков «тип оргструктуры» и «правовая форма», в табл. 5.5 — выбранных на предыдущем шаге комбинаций с признаком «источники обновления ос-

новых средств», в табл. 5.6 — оставшихся комбинаций с признаком «форма владения недвижимостью», в табл. 5.7 — оставшихся комбинаций с признаком «расчет за приобретаемые технологии и оборудование».

Таблица 5.4

	a21	a22	a23	a24
a11	×	×	×	
a12	×		×	×
a13	×	×		×
a14		×	×	×

Таблица 5.5

	a11+ a24	a12+ a22	a13+ a23	a14+ a21
a31	×	×	×	
a32	×		×	×
a33		×		×

Таблица 5.6

	a11+ a24+ a33	a12+ a22+ a32	a13+ a23+ a33	a14+ a21+ a31
a41	×		×	×
a42		×	×	
a43	×	×		×

Таблица 5.7

	a11+ a24+ + a33+ a42	a12+ a22+ + a32+ a41	a13+ a23+ + a33+ a43	a14+ a21+ + a31+ a42
a51		×	×	
a52	×	×		
a53	×		×	×

Сформированные в результате морфологического анализа перспективные варианты организационной структуры затем детально прорабатываются. Окончательный выбор может осуществляться с помощью метода экспертной оценки эффективности оргструктуры, описанного выше.

**Выбор типа организационной структуры на модели зависимостей атрибутов** заключается в выработке рекомендации относительно типа организационной структуры, исходя из характеристик (атрибутов), описывающих внешние и внутренние условия деятельности организации, а также опираясь на знания экспертов в сфере организационного проектирования. На основе знаний экспертов строится сеть зависимостей, отражающая влияние (непосредственное или опосредованное) исходных атрибутов на результирующий атрибут — «тип организационной структуры» (рис. 5.18).

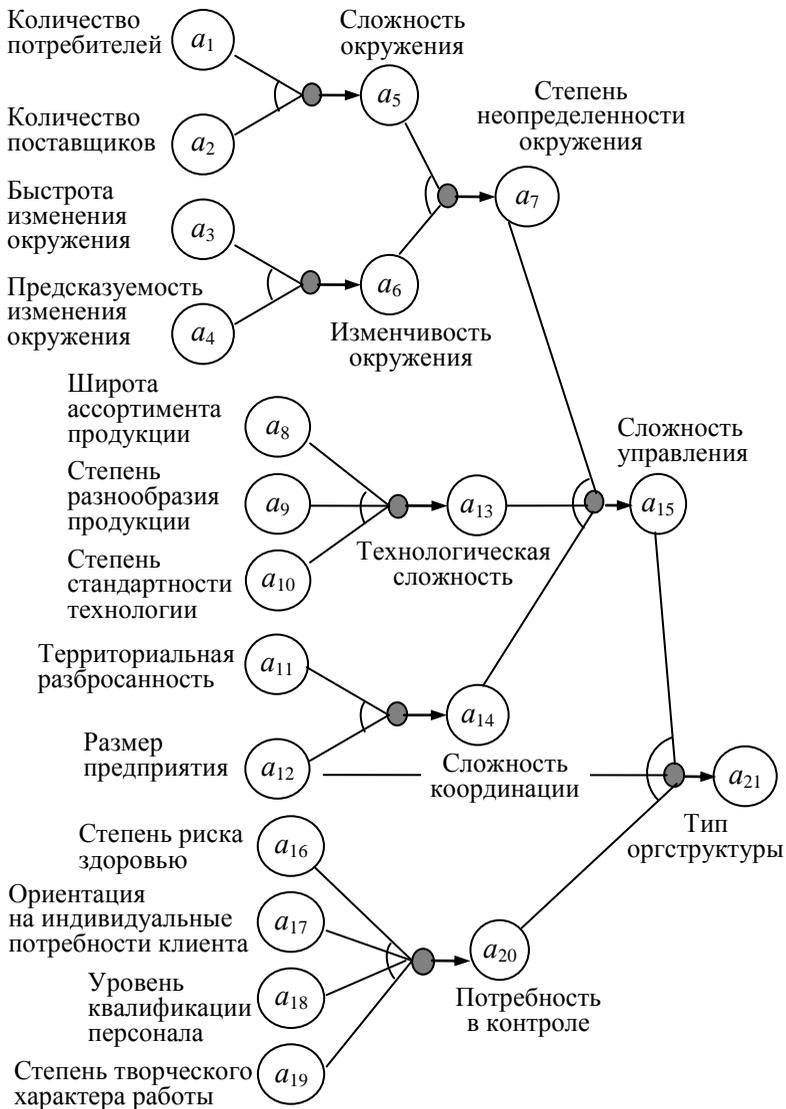


Рис. 5.18. Сеть зависимостей атрибутов модели выбора типа оргструктуры

На выбор типа структуры влияет, прежде всего, *сложность управления*, определяемая тремя факторами: степенью неопределенности окружения, технологической сложностью и сложностью координации. Окружение организации, в свою очередь, измеряется по двум критериям: по степени сложности и по степени изменчивости. Чем больше компонентов (поставщиков, групп потребителей) включает окружение, тем оно сложнее. Чем быстрее происходят изменения во внешней среде, и чем они более непредсказуемы, тем выше степень изменчивости среды. Технологическая сложность определяется степенью диверсификации производства (широтой ассортимента продукции, степенью ее разнообразия) и степенью стандартизации технологии. Сложность координации во многом зависит от размера организации и ее территориальной разбросанности.

При выборе типа структуры помимо сложности управления необходимо учитывать *потребность в контроле* — степень самостоятельности, которая может быть предоставлена исполнителям. Она определяется, с одной стороны, профессиональными качествами работников, а с другой стороны, характером их труда и особенностями рабочей обстановки. Предоставлению большей самостоятельности способствуют высокий уровень квалификации персонала, творческий характер труда, необходимость в ориентации на индивидуальные потребности клиента. Степень самостоятельности приходится ограничивать, если существует риск здоровья, когда часто возникают экстремальные условия, требующие быстрого принятия решений и строгого соблюдения дисциплины при их реализации.

Атрибуты  $a_1$ – $a_{11}$  и  $a_{13}$ – $a_{20}$  могут принимать следующие значения: в — высокое, вс — выше среднего, с — среднее, нс — ниже среднего, н — низкое, о — отсутствует. Множество допустимых значений для атрибута  $a_{12}$  («размер организации») включает: крупное, среднее, малое, а для атрибута  $a_{21}$  («тип оргструктуры»): простая, функциональная, дивизиональная, матричная. Зависимости между атрибутами могут задаваться в виде формул или правил-продукций. Примеры правил:

If ( $a_{12}$  = малое) & ( $a_{15}$  = нн  $\vee$  с  $\vee$  с) & ( $a_{20}$  = в) then ( $a_{20}$  = простая);

If ( $a_{12} = \text{среднее}$ ) & ( $a_{15} = \text{нс} \vee \text{с}$ ) & ( $a_{20} = \text{с} \vee \text{в}$ ) then ( $a_{20} =$   
= функциональная);

If ( $a_{12} = \text{крупное}$ ) & ( $a_{15} = \text{с} \vee \text{в}$ ) & ( $a_{20} = \text{н}$ ) then ( $a_{20} =$   
= дивизиональная).

Для вывода заключения о рекомендуемом типе структуры сначала задаются значения базовых атрибутов, а затем с помощью правил определяются значения остальных атрибутов.

#### **5.2.4. Развитие систем организационного управления**

Полный цикл выполнения реорганизации предприятия, основанный на системной последовательности принятия решения, включает следующие этапы: анализ существующей организационной структуры; постановка целей и направлений развития структуры; корректировка структуры управления; выполнение преобразований (собственно реорганизация); оценка результатов. Ниже приводится краткая характеристика этапов.

**1. Анализ существующей оргструктуры.** Целью анализа является решение вопроса о необходимости выполнения реорганизации и выявление того, чем именно не устраивает существующая структура. Выполняется оценка структуры в соответствии с различными критериями. Количественные показатели разделяются на группы, характеризующие: организацию труда исполнителей; организацию труда работников управления; техническую оснащенность и уровень квалификации работников управления [73]. В табл. 5.8 приведены некоторые из количественных показателей.

Кроме того, может быть проведена экспертная оценка организационной структуры (см. п. 5.2.3), ее сравнение со структурами организаций, занимающихся аналогичной деятельностью, «эталонной» структурой и принятыми нормативами. Можно также провести опрос сотрудников с целью выявления предложений по изменению структуры управления. По результатам анализа формируется перечень проблем. Проблемы могут быть сгруппированы по отдельным направлениям и проранжированы по важности.

Таблица 5.8

Наименование показателя	Расчет показателя
<b>Показатели уровня организации труда исполнителей</b>	
Уровень рационализации производственных процессов	Отношение суммарного количества операций (за месяц) на одном рабочем месте к числу рабочих мест
Уровень нормирования работ	Отношение количества нормированных работ к общему количеству работ
Уровень использования рабочего времени	Средний процент выполнения норм выработки
<b>Показатели уровня организации труда работников управления</b>	
Коэффициент обеспеченности управленческими кадрами	Удельный вес работников управления в общем составе работающих
Коэффициент управляемости	Сумма (по всем руководителям) соотношений нормативного и фактического диапазонов контроля, деленная на число уровней управления
Коэффициент степени централизации	Сумма (по всем функциональным подразделениям) отношений числа менеджеров подразделения, занятых в централизованных службах, к общей численности менеджеров подразделения
<b>Показатели технической оснащенности и уровня квалификации работников управления</b>	
Оснащенность средствами вычислительной техники (ВТ)	Среднее количество единиц ВТ на одного работника управления
Коэффициент использования ВТ	Доля информации, обрабатываемой с помощью ВТ, в общем объеме обрабатываемой информации
Уровень квалификации	Процент работников управления, уровень знаний которых соответствует требованиям должностных инструкций

**2. Определение целей и направлений развития.** Цели реорганизации ставятся в соответствии с выявленными проблемами и с учетом стратегических целей развития бизнеса.

Цели желательно структурировать путем построения дерева целей. На рис. 5.19 приведен фрагмент дерева целей совершенствования структуры управления. Для оценки приоритетности целей можно воспользоваться методом анализа иерархий. Полезно также осуществить экспертную оценку влияния целей на ключевые показатели результативности бизнеса.



Рис. 5.19. Фрагмент дерева целей совершенствования оргструктуры

**3. Корректировка структуры управления.** На данном этапе осуществляется корректировка структуры подчиненности, распределения полномочий и коммуникационной структуры. Все компоненты структуры должны быть согласованы.

Начинать необходимо с выработки концептуальных решений, обеспечивающих достижение поставленных целей реорганизации. К таким решениям относятся выбор типа организационной структуры, соответствующего внешним и внутренним условиям деятельности организации, определение правовой формы, формы владения недвижимостью, источников обновления основных средств и т. д. При этом могут быть использованы методы, описанные в п. 5.2.3: метод морфологического анализа, метод логического вывода на базе экспертных правил (на модели зависимостей атрибутов).

Структура подчиненности формируется с учетом выбранного типа организационной структуры. Так, если принято решение об использовании дивизиональной структуры продуктового типа, осуществляется группировка подразделений в автономные центры, занимающихся производством определенного вида продукции. Если выбрана матричная процессная структура, организуется командная работа, т. е. выделяются основные бизнес-процессы, определяется количество и состав команд процессов, руководство команд. При определении численности подразделений необходимо учитывать диапазон контроля, который зависит от объема обязанностей руководителей организационных единиц, характера деятельности подразделений, квалификации и степени самостоятельности подчиненных.

Распределение полномочий осуществляется на базе структуры подчиненности. Современной тенденцией является передача прав по принятию решений на как можно более низкий уровень управления, вплоть до исполнительского уровня. Необходимо помнить, что децентрализация должна сопровождаться налаживанием горизонтальных коммуникационных связей, созданием сетчатой структуры обмена информацией. Завершается формирование организационной структуры разработкой системы оценки труда и стимулирования.

Может быть построено несколько альтернативных вариантов структуры. В этом случае необходимо осуществить экспертную оценку каждого из вариантов и выбрать наиболее перспективный.

**4. Преобразования, оценка результатов.** Процесс внедрения разработанного проекта реорганизации сопровождается выполнением большого объема технической работы: разработкой нового штатного расписания, новых должностных инструкций, трудовых контрактов, положения об оплате труда и др. Осуществляется обсуждение и утверждение основополагающих документов на собраниях трудового коллектива. Важно объяснить сотрудникам компаний необходимость и причины реорганизации, ее последствия. Изменение характера работы сотрудников требует организации обучающих курсов. Программы обучения формируются исходя из оценки

существующего уровня квалификации работников и новых квалификационных требований.

После проведения реорганизации через некоторое время, необходимое для перехода на устойчивый режим работы, следует выполнить оценку новой организационной структуры.

## **5.3. Анализ информационных ресурсов**

### **5.3.1. Информационные ресурсы предприятия**

**Информационный ресурс** — это информация в любом виде, которую можно многократно использовать для решения проблем пользователей<sup>10</sup>. Например, это может быть файл, документ, веб-сайт, база данных, база знаний.

Классификация информационных ресурсов может осуществляться различными способами. Так, различают понятия данных и знаний. Под *данными* понимается представление *фактов* (наблюдений за объектами, событиями, явлениями, процессами) в формализованном виде, пригодном для передачи и обработки. *Знания* же помимо фактов отражают *закономерности* процессов и явлений, а также правила использования этой информации для принятия решений. Отличительной способностью знаний является их способность порождать новые факты и знания, т. е. они активны [81].

Ряд авторов наряду с категориями данных и знаний вводят понятия информации, сведений, понимания и др. В частности, Р. Акофф вводит следующую иерархию, в которой каждая категория является основой, материалом для получения следующего, более обобщенного понятия [82]: <данные – информация – знания – понимание – мудрость>.

При этом под данными понимаются некоторые символы, рассматриваемые безотносительно к какому-либо контексту. Информацией называется выделенная и упорядоченная часть всего массива данных, обработанная для использования. Зна-

---

<sup>10</sup> За основу данного определения взято определение, приведенное в [81].

ния — это выявленные тенденции или существенные связи между фактами и явлениями, представленные в информации. Понимание — это осознание закономерностей, содержащихся в разрозненных знаниях, позволяющее ответить на вопрос «Почему?». И наконец, мудрость — взвешенное, оцененное понимание закономерностей с точки зрения прошлого и будущего [82].

Знания также подразделяют на различные классы. Некоторые из классов приведены на рис. 5.20.

**Неявные знания** существуют в умах людей и являются результатом генетической наследственности, обучения, чтения, а также приобретенного жизненного опыта. **Явные знания** зафиксированы в виде, пригодном для распространения. Они хранятся на реальных физических носителях — в книгах, документах, схемах, аудио- и видеозаписях, электронных файлах и т. д.



Рис. 5.20. Классификация знаний

Неявные знания являются *личностными*, индивидуальными знаниями, а явные, как правило, — *общедоступными*, распространяемыми.

*Эвристические* знания — это знания, почерпнутые из эмпирических наблюдений, опыта, основанные на интуиции и здравом смысле. К *теоретическим* знаниям относятся законы, теории, абстракции, обобщения. Это общезначимые факты, определения, закономерности, признанные специалистами в соответствующей предметной области.

*Декларативными* (описательными) являются знания о свойствах, характеристиках объектов предметной области, их структуре и отношениях. *Процедурные* (операционные) — это

знания о методах, способах решения задач, например: алгоритмы, компьютерные программы.

В контексте данного пункта под информационными ресурсами понимаются разнообразные знания (включающие в себя данные), используемые специалистами предприятия в процессе профессиональной деятельности. При этом активы знаний могут находиться в различных местах (документах, картотеках, базах данных, головах специалистов) и могут быть рассредоточены по всему предприятию, что создает ряд проблем [83]:

- информация захоронена в огромном количестве документов и данных, доступ к которым затруднен, в результате работники тратят слишком много времени на поиск необходимой информации;

- опыт ведущих и наиболее квалифицированных сотрудников используется только ими самими;

- происходит дублирование информации и операций по ее сбору, хранению и переработке.

Основным средством консолидации разрозненных знаний является *корпоративная память* — совокупность явных знаний, полученных из различных источников (в том числе и путем извлечения и формализации неявных знаний), доступных специалистам для решения производственных задач [83]. Знания содержатся в едином хранилище, что обеспечивает оперативный доступ, устранение дублирования, интеграцию различной информации.

Наиболее типичными компонентами корпоративной памяти являются:

- базы данных (фактографические, реляционные), содержащие структурированные данные, обеспечивающие однократный ввод и многократное использование хранимых данных;

- документы — текстовые файлы (отчеты, инструкции, методики, спецификации), чертежи, электронные таблицы, веб-страницы и др.;

- базы знаний — формализованные эвристические и теоретические знания о предметной области, описанные на язы-

ках представления знаний (логических, продукционных, фреймовых, языках семантических сетей).

Для структурирования разнообразных компонентов корпоративной памяти, обеспечения быстрого доступа к ним используются мета-данные<sup>11</sup>, т. е. данные о данных. К ним относятся структура баз данных и баз знаний, каталоги, структура архивов. По сути, это «карта» расположения разнообразных знаний в хранилище.

Пример структуры корпоративного хранилища с выделенным уровнем метаописаний данных, документов и знаний приведен на рис. 5.21 (составлен на основе [83]).



Рис. 5.21. Структура корпоративного хранилища

Метаописания хранятся отдельно от содержательной информации в специальной части хранилища, называемой *репозитарием* [82]. Они получили широкое распространение в борьбе с информационной перегрузкой. Репозитарий не только ускоряет и облегчает поиск необходимой информации, но и позволяет оптимизировать структуру баз данных, баз знаний и документальных БД, устранить дублирование.

<sup>11</sup> Используются также термины метазнания, метаинформация, метаописания.

### 5.3.2. Жизненный цикл управления информационными ресурсами

Исследованием процессов создания, распространения, обработки и использования информации внутри предприятия занимается специальная научная дисциплина — Knowledge Management (KM), или управление знаниями. В литературе по данной тематике встречаются различные, хотя во многом и похожие, описания жизненного цикла знаний. Можно выделить три укрупненных стадии (рис. 5.22).

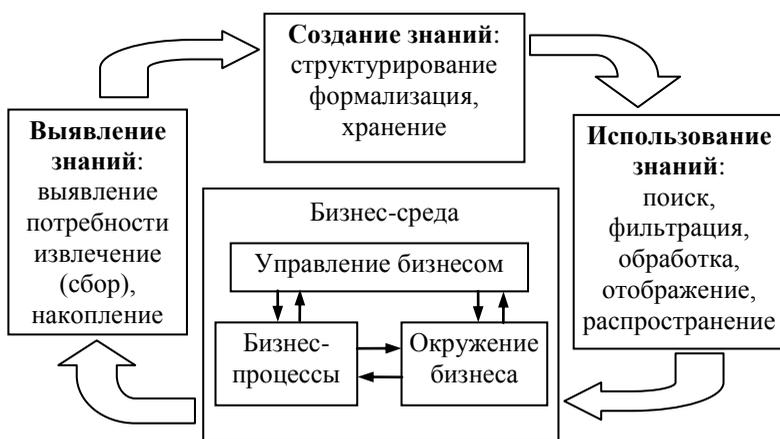


Рис. 5.22. Жизненный цикл знаний

**1. Выявление знаний.** Начальным шагом является потребность в знаниях, возникающая у сотрудников компании в процессе их профессиональной деятельности — выполнении бизнес-процессов или управлении ими. Определяются «разрывы» между существующей на предприятии информацией и необходимой. При этом анализируются задачи, выполняемые менеджерами и рядовыми сотрудниками, требуемые для решения задач исходные данные, а также способы обработки данных (процедурное знание).

Собственно выявление отсутствующих знаний осуществляется как путем стихийного и бессистемного накопления

информации по мере ее необходимости, так и с помощью целенаправленного извлечения знаний путем опросов, интервью, обсуждений, наблюдений, накопления статистики, поиска в литературных источниках, в Интернете и т. д. На этом этапе широко используются методы системного анализа, методы инженерии знаний (раздел искусственного интеллекта, изучающий формы представления знаний и способы их выявления), социологические методы, статистика.

**2. Создание знаний.** На данном этапе происходит создание корпоративной памяти в виде единого хранилища или нескольких предметно-ориентированных хранилищ. Процесс включает:

- структурирование — выделение основных понятий, определение структуры представления информации;
- формализацию — представление информации в форматах машинной обработки, т. е. на выбранных языках представления данных и знаний;
- наполнение — собственно создание баз данных, баз знаний, документов, репозитариев;
- обслуживание хранимых знаний — добавление, обновление, удаление информации.

Методы построения баз данных и баз знаний достаточно хорошо развиты. Существует множество инструментальных средств (CASE-средств), поддерживающих разработку, в том числе с помощью визуального проектирования, предполагающего на первом этапе формирование концептуальных диаграмм представления данных и знаний.

В настоящее время активно развиваются методы и средства построения онтологий — концептуальных систем понятий и терминов, описывающих некоторую предметную область. Онтологии являются основой для объединенной эксплуатации данных, документов и формального знания путем построения объединенных метамоделей [83].

**3. Использование знаний.** Хранимые в корпоративной памяти знания используются с помощью различных прикладных программ для поддержки бизнес-процессов и принятия управленческих решений.

Основные функции, выполняемые на данном этапе:

- поиск, фильтрация — выделение информации, запрашиваемой конкретным пользователем и отвечающей заданным требованиям;

- обработка — выполнение преобразований информации, например: статистическая обработка данных, поиск решения на некоторой математической модели, дедуктивный логический вывод на базе правил-продукций, пополнение знаний и др.;

- отображение — формирование разнообразных отчетов по результатам поиска и обработки информации, построение диаграмм (столбиковых, круговых), графиков;

- распространение — передача информации в нужное место, в нужное время, с нужным качеством.

В ходе использования знаний может оказаться, что для решения некоторых задач недостаточно имеющихся информационных ресурсов и необходима следующая итерация жизненного цикла знаний.

### **5.3.3. Методы анализа и синтеза информационных ресурсов**

Рассмотрим некоторые методы, используемые в цикле управления информационными ресурсами предприятия, которые опираются на аппарат теории систем и системного анализа.

**Анализ необходимой информации путем моделирования бизнес-процессов.** Данный метод используется на этапе выявления знаний для определения потребности в информационных ресурсах. Метод состоит в декомпозиции бизнес-процесса, связанного с обработкой информации, и сопоставлении отдельным операциям исходных данных, управляющей, результирующей информации, а также информационных систем, осуществляющих обработку информации. Для наглядности используются графические модели бизнес-процесса, например, построенные с помощью таких методологий моделирования, как IDEF0, DFD, ARIS.

При использовании методологии IDEF0 (см. п. 3.2.3) отдельные операции представляются в виде функциональных

блоков; исходная информация — в виде входящих дуг; результирующая — в виде выходящих дуг; регламентирующая выполнение операции и принимаемая во внимание — в виде дуг управления; используемые информационные системы — в виде дуг механизма. На рис. 5.23 представлен пример процесса обработки заказа.

Более богатые возможности по отражению формы и содержания информации, используемой в бизнес-процессах, предоставляет методология ARIS. В частности, для этой цели могут быть использованы такие диаграммы, как событийная цепочка процесса (Extended event driven process chain — eEPC), диаграмма информационных потоков (Information flow diagram), карта знаний (Knowledge map).

Для примера рассмотрим представление бизнес-процесса на диаграмме eEPC. Диаграмма отражает последовательность событий и функций в рамках процесса, а также связанные с функциями ресурсы (человеческие, информационные, материальные) и выходы. Пример модели eEPC приведен на рис. 5.24.

Функция представляет некоторое действие (шаг процесса). С функцией могут быть связаны: исполнители (сотрудники или подразделения), входные и выходные документы, используемое программное обеспечение и т. д. Событие описывает какое-либо завершённое состояние системы.

С одной стороны, события инициируют выполнение функций, с другой — они следуют из предшествующих функций и описывают, таким образом, их результат. Логические операторы AND (И), OR (ИЛИ), XOR (исключающее ИЛИ) связывают события и функции. С их помощью моделируются логические разветвления в потоке процесса.

**Оценка уровня управления знаниями.** Периодическая оценка эффективности использования знаний позволяет выявить проблемы в системе управления знаниями, такие как устаревание знаний, затрудненный доступ к отдельным категориям знаний, несоответствие имеющихся информационных ресурсов требованиям и др.

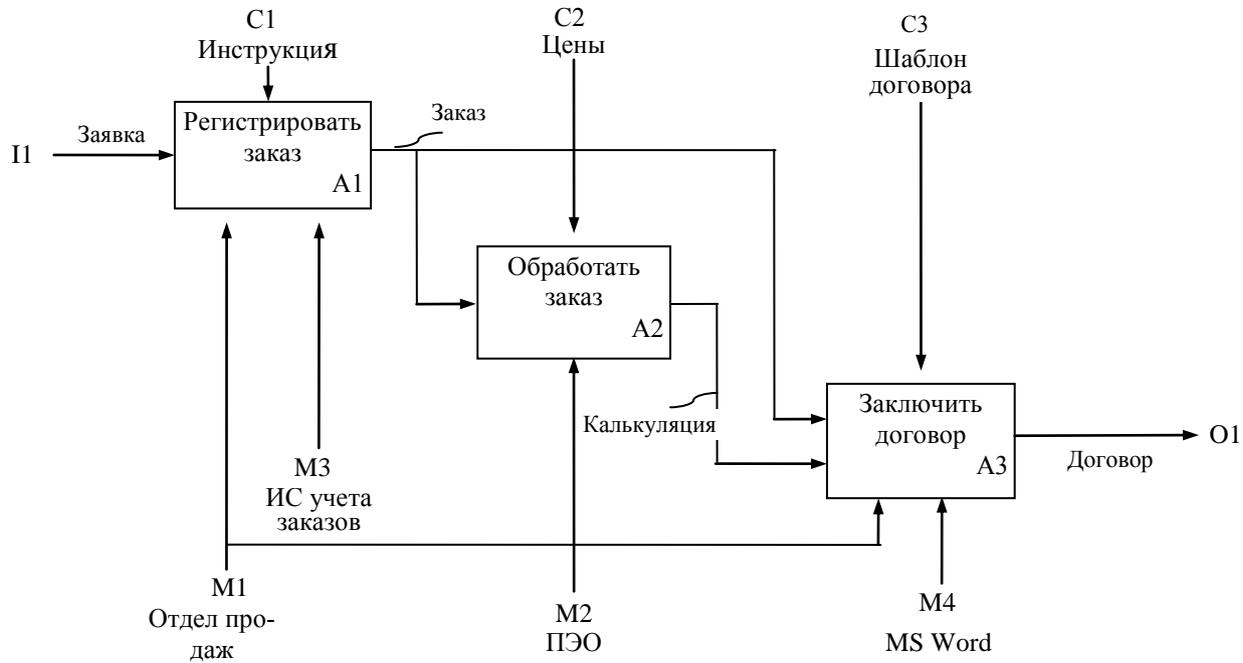


Рис. 5.23. IDEF0-диаграмма процесса обработки заказа



Рис. 5.24. Событийная цепочка процесса (eEPC)

Для удобства оценки желательно структурировать весь массив используемых в компании знаний путем декомпозиции по категориям. Разделение может осуществляться по областям знаний, таким как знания об управлении проектами, знания о технологии производства, знания о клиентах и конкурентах, знания о системах менеджмента качества и т. д. Могут быть выделены также классы явного (документированного) знания и неявного. Классификация может осуществляться по источникам знаний и форме представления.

Наглядным средством отображения различных категорий знаний является диаграмма структуры знаний, входящая в методологию ARIS. На рис. 5.25 приведен пример диаграммы, описывающей знания о менеджменте качества [84].

Для оценки отдельных категорий знаний могут быть использованы следующие показатели [84]:

- частота корректировки — как часто обновляются знания данной категории;
- степень охвата — насколько знания распространены среди персонала компании;
- использование знаний — интенсивность применения категории знаний;
- важность (ценность) — насколько облегчает данная категория знаний принятие решений.

Используются либо числовые значения (например, процент или число от 0 до 1), либо лингвистические (например: низкий уровень, средний, высокий). При оценке по каждому показателю определяется желаемый и фактический уровень.

Пример оценки знаний по менеджменту качества приведен в табл. 5.9. Используются следующие множества значений:

- для показателя «частота корректировки» — ежедневно, еженедельно, ежемесячно, ежегодно, редко, никогда;
- для показателя «степень охвата» — процент от общей численности персонала; для показателя «использование знаний» — количество запросов на получение информации (за год);
- для показателя «важность» — экспертная оценка по 10-балльной шкале.

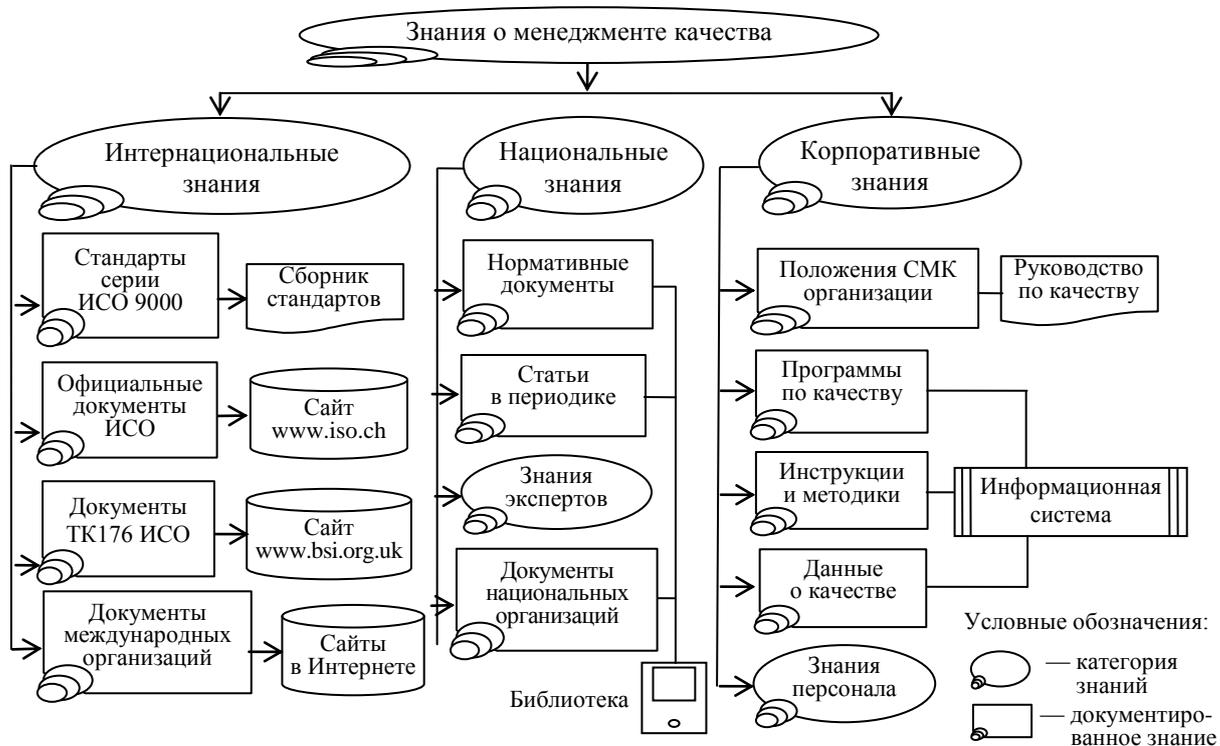


Рис. 5.25. Модель структуры знаний

Таблица 5.9

## Оценка категорий знаний

Категория знаний	Частота корректировки		Степень охвата, %		Использование знаний		Важность	
	ж.	ф	ж	ф	ж	ф	ж	ф
Программы по качеству	ежегодно	ежегодно	75	30	50–100	38	10	8
Данные о качестве	ежемесячно	ежегодно	75	60	50–100	27	10	6

Примечание: ж — желаемое значение;  
ф — фактическое значение

Поскольку основной задачей является определение проблем, связанных с отдельными категориями знаний, вычислять интегральную оценку в данном случае нет смысла. Необходимо зафиксировать расхождения между желаемым и фактическим значениями по каждой из категорий. Величина расхождения определяет глубину соответствующей проблемы. По результатам оценки необходимо составить список выявленных проблем, которые могут быть проранжированы по важности.

**Построение онтологий.** Онтологии (от др.-греч. *онтос* — сущее и *логос* — учение, понятие) используются для структурирования знаний об объектах, понятиях и связях между ними. Другими словами, это концептуальные знания в виде формально представленной системы категорий, являющейся следствием определенного взгляда на мир [83]. Онтологии могут выступать основой для построения баз знаний, баз данных, репозитариев. Знания, представленные в онтологии, могут использоваться различными приложениями, отчуждаться от конкретных разработчиков и разделяться пользователями.

Онтологию можно задать как взаимосвязанную совокупность трех компонентов [83]:

- конечного множества концептов (понятий, терминов) предметной области;
- множества отношений между концептами;
- множества логических аксиом, заданных на концептах или их отношениях.

Как правило, построение онтологии начинается с формирования глоссария основных понятий и таксономии — иерархической структуры, в которой понятия связаны отношениями «общее-частное» или «быть элементом класса» (is-a). Это иерархия классов (см. п. 2.5, 4.3.2). На нижнем уровне представлены экземпляры, сопоставленные конкретным объектам, выше располагаются классы объектов, на верхних уровнях — метаклассы, т. е. понятия высокого уровня обобщения. На рис. 5.26 представлен пример таксономии (составлен на основе [83]).

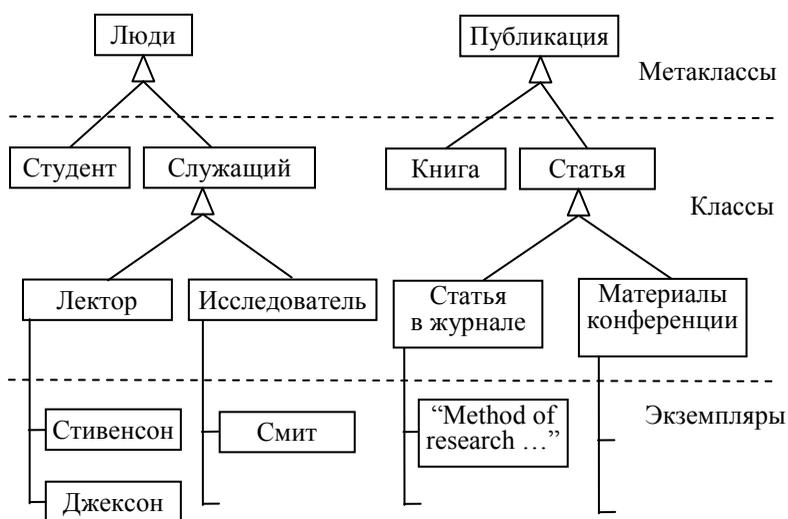


Рис. 5.26. Структура таксономии понятий

Помимо отношений типа «общее-частное» между концептами могут быть установлены разнообразные бинарные отношения, имеющие различную семантику. Каждое отношение может быть представлено в виде тройки [82]: <субъект – предикат – объект>. Субъект и объект представляют собой соответственно исходный и конечный элементы отношения, предикат – само отношение. Как правило, наименования субъекта и объекта выражены в виде существительного, предиката – глаголом. Примеры бинарных отношений:

<Служащий – Работает в – Организация>,  
 <Служащий – Возглавляет – Проект>,  
 <Исследователь – Имеет – Статья в журнале>.

Множество бинарных отношений удобно представлять в виде размеченных ориентированных графов. Пример такого графа приведен на рис. 5.27 (составлен на основе [83]).

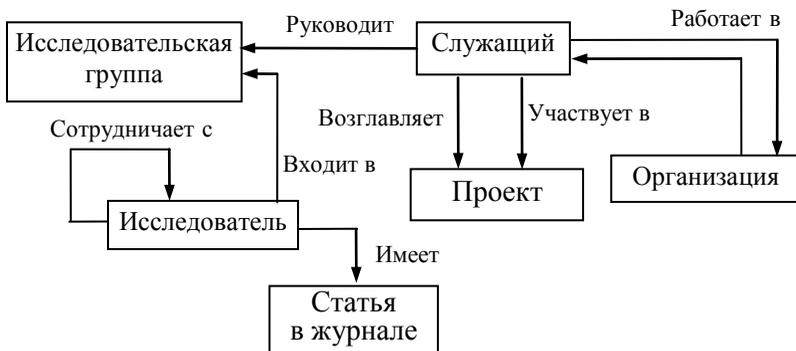


Рис. 5.27. Фрагмент диаграммы бинарных отношений

Понятия, входящие в глоссарий, а также бинарные отношения могут характеризоваться множеством атрибутов. С помощью присвоения атрибутам конкретных значений специфицируются экземпляры понятий. По сути, используется объектно-ориентированное представление знаний (см. п. 4.3.2). На рис. 5.28 приведены примеры описания классов.

Служащий	Статья в журнале	Бинарное отношение
Фамилия Имя Отчество Должность Научная степень E-mail ...	Наименование Авторы Журнал Год издания Номер Страницы ...	Имя отношения Субъект Объект Кардинальность Инверсное отношение Ссылки ...

Рис. 5.28. Примеры описаний классов понятий и отношений

Бинарные отношения могут быть определены не только декларативно, но и процедурно, в частности с помощью аксиом. Аксиомы позволяют «достраивать» онтологии автоматически. Пример описания аксиомы приведен на рис. 5.29 (составлен на основе [83]).

Возглавляет–Проект–Участвует в–Проекте	
Описание	«Служащий, возглавляющий проект, участвует в проекте»
Субъект	Служащий
Переменные	Е: Служащий, Р: Проект
Определение	Для всех (Е,Р) Возглавляет (Е,Р) → Участвует в (Е,Р)
...	

Рис. 5.29. Пример описания аксиомы

С помощью аксиом определяются такие свойства отношений, как транзитивность и симметричность. Кроме того, они позволяют выявлять семантические ошибки.

Онтологии используются для поиска некоторой целевой ситуации, содержащей информацию о понятиях и/или отношениях, на основе описания исходной ситуации. Логический вывод на сети понятий заключается в том, что от узлов исходной ситуации распространяются волны активации, использующие свойства отношений, останавливающиеся при достижении целевой ситуации или превышении длительности выполнения вывода [83].

Для формального описания онтологий используются различные языки, например: язык разметки XML (eXtensible Markup Language), язык описания структуры ресурсов RDF (Resource Description Framework), язык Web-онтологий OWL (Ontology Web Language) [82]. Разработано также множество инструментальных систем для работы с онтологиями (достаточно обширный обзор таких систем приведен в [82]). Основными функциями инструментариев являются [82]:

- создание онтологий с помощью редактора;
- анализ семантической согласованности онтологий;

- автоматическое извлечение информации (в частности, из документов на естественном языке, веб-страниц);
- автоматическая классификация и аннотирование документов;
- семантическая интеграция разнородного контента;
- слияние нескольких онтологий;
- логический вывод, поиск, основанный на понятиях;
- выполнение поисковых запросов на естественном языке.

В настоящее время активно разрабатываются самые разнообразные онтологии для различных целей, задач и предметных областей. Существуют различные классификации онтологий. По уровню универсальности выделяют три типа онтологий [82, 83]:

1) онтологии верхнего уровня (метаонтологии), описывающие общие понятия (например, «объект», «свойство», «значение»), независимые от задач и предметных областей;

2) онтологии предметных областей и онтологии задач, описывающие общие понятия, широко используемые либо в некоторых предметных областях (медицина, химия, коммерция и др.), либо при решении определенных типов задач (диагностика, поиск релевантной запросу информации и т. д.);

3) прикладные онтологии, содержащие понятия, зависящие как от конкретной предметной области, так и от задач, которые в них решаются.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что является предметом экономического анализа? Каковы его результаты и цели проведения?

2. Приведите известные вам классификации видов экономического анализа.

3. На чем базируется методология экономического анализа?

4. Каковы основные принципы разработки экономико-математических моделей?

5. Опишите классификации моделей, используемых в экономическом анализе, по таким признакам, как степень абстрактности, учет фактора неопределенности, учет фактора времени.

6. Дайте характеристику основных этапов экономического анализа, предусмотренных его системным описанием.

7. Каким образом реализуются этапы экономического анализа при решении задачи факторного анализа финансовой устойчивости предприятия?

8. Что такое имитационное моделирование? Каковы основные методы и средства его проведения?

9. Опишите последовательность анализа бизнес-процесса, выполняемого с помощью системы имитационного моделирования «Арена».

10. Что представляет собой структура организации и как формируются ее составляющие – структура подчиненности, структура полномочий, структура коммуникаций?

11. Дайте характеристику основных типовых организационных структур – простой, функциональной, дивизиональной, матричной.

12. Как осуществляется экспертная оценка эффективности организационной структуры?

13. Как осуществляется формирование вариантов оргструктуры методом морфологического анализа? Приведите пример.

14. Каким образом осуществляется выбор типа организационной структуры на модели зависимостей атрибутов?

15. Опишите основные этапы развития систем организационного управления.

16. Что понимается под информационными ресурсами предприятия?

17. Приведите известные вам классификации знаний.

18. Что такое корпоративная память? Каковы ее основные компоненты? Как осуществляется структурирование компонентов корпоративной памяти?

19. Опишите основные стадии жизненного цикла управления информационными ресурсами.

20. Как выполняется анализ необходимой информации посредством построения моделей бизнес-процессов?

21. Как осуществляется оценка уровня управления знаниями?

22. Что такое онтологии? Каковы основные компоненты онтологий?

23. Приведите пример таких компонентов онтологий, как иерархия понятий, множество бинарных отношений, описание классов и аксиом.

24. Каковы основные функции инструментальных средств для работы с онтологиями?

25. Опишите три основных типа онтологий.

## **Заключение**

Потребность в применении аппарата теории систем и системного анализа в практической деятельности высока. Нередко можно услышать из уст политиков, руководителей различного ранга, специалистов рассуждения о том, что к решению определенной проблемы нужно подходить «системно», «с системных позиций», «с точки зрения системного подхода» и т. д. Однако, к сожалению, зачастую имеется в виду лишь принцип комплексного рассмотрения проблемы. Данный принцип, несомненно, очень важен, но к нему не сводится системный подход. Науки о системах накопили богатый арсенал понятий, принципов, законов, методов, моделей, методологий и технологий. Авторы данного учебного пособия представили всю «систему знаний о системах» в виде иерархии — от основополагающих терминов, являющихся фундаментом, до конкретных универсальных и специализированных технологий. Приведенные в пособии примеры практического применения теории систем и системного анализа призваны показать прикладную направленность этой научной дисциплины и побудить читателя к использованию полученных знаний в своей профессиональной деятельности.

Конечно, исследователь, обладающий высокоразвитыми способностями к структурированию, анализу, нахождению причинно-следственных связей, выстраиванию логических цепочек, сможет справиться с проблемой (особенно если она не слишком сложная) и без применения аппарата системного подхода. Однако с помощью этого аппарата можно ускорить процесс поиска решения, снизить трудозатраты, повысить качество и обоснованность результата. Применение методов и моделей системного анализа наиболее эффективно в случаях, если речь идет о проблемосодержащих системах, характеризующихся высокой сложностью, неопределенностью, разнородностью компонентов и связей, множественностью заинтересованных сторон и их целей.

Авторы желают успеха читателям в дальнейшем освоении науки о системах, углублении познаний в этой области и их применении в различных сферах деятельности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: учебник для студентов вузов. – Изд. 2-е перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 512 с.
2. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа: учебник. – 2-е изд., доп. — Томск: Изд-во НТЛ, 1997. – 396 с.
3. Богданов А.А. Всеобщая организационная наука (тектология): в 3 т. – М., 1905. – 1924.
4. Берталанфи Л. фон. Общая теория систем: критический обзор // Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 23–82.
5. Винер Н. Кибернетика. – М.: Сов. радио, 1968. – 324 с.
6. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М.: Прогресс, 1986.
7. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 240 с.
8. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций: пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 534 с.
9. Гуд Г.Х., Макол Р.Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. – М.: Сов. радио, 1962. – 383 с.
10. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1985. – 199 с.
11. Мельников Г.П. Системология и языковые аспекты кибернетики / под ред. Ю.Г. Косарева. – М.: Сов. радио, 1978. – 368 с.
12. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.
13. Темников Ф.Е. Высокоорганизованные системы // Большие системы: теория, методология, моделирование. – М.: Наука, 1971. – С. 85–94.
14. Берталанфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования: ежегодник, 1972. – М.: Наука, 1973. – С. 20–37.
15. Философский словарь. – М.: Политиздат, 1981. – 445 с.
16. Основы системного подхода и их приложение к разработке территориальных автоматизированных систем управления / Б.А. Гладких, В.М. Люханов, Ф.И. Перегудов [и др.]. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1976. – 244 с.
17. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. – М.: Мысль, 1978. – 272 с.
18. Сагатовский В.Н. Основы систематизации всеобщих категорий. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1973. – 431 с.

19. Черняк Ю.И. Системный анализ в управлении экономикой. – М.: Экономика, 1975. – 191 с.
20. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. – М.: Сов. радио, 1969. – 216 с.
21. Большая советская энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://bse.sci-lib.com/>.
22. Основы менеджмента: учеб. пособие для вузов / под ред. А.А. Радугина. — М.: Центр, 1997. – 432 с.
23. Математика и кибернетика в экономике: словарь-справочник. – М.: Экономика, 1975. – 700 с.
24. Лопатников Л. И. Экономико-математический словарь: словарь современной экономической науки. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Дело, 2003. — 520 с.
25. Мильнер Б.З. Теория организаций. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 336 с.
26. Крайзмер Л.П. Кибернетика. – М.: Экономика, 1977. – 279 с.
27. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
28. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. – М.: Знание, 1990. — 48 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Математика, кибернетика»; № 5).
29. Гиг Дж. ван. Прикладная общая теория систем. В 2-х кн. – М.: Мир, 1981. Кн. 1. – 341 с., кн. 2 – 342 с.
30. Социология: энциклопедия / сост. А.А. Грицанов, В.Л. Абушенко, Г.М. Велькин и др. – Минск: Книжный Дом, 2003. – 1312 с.
31. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. – 432 с.
32. Энциклопедия кибернетики. В 2 т. Т.1 / В.М. Глушков [и др.]. – Киев: Главная редакция Украинской Советской Энциклопедии, 1974. – 607 с.
33. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи / В. Н. Волкова, В. А. Воронков, А. А. Денисов и др. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
34. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
35. Шеннон Р.Ю. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
36. Тельнов Ю.Ф. Интеллектуальные информационные системы в экономике / Московский гос. ун-т экономики, статистики и информатики. – М., 1998. – 174 с.

37. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
38. Евланов Л.Г. Теория и практика принятия решений / редкол.: Е.М. Сергеев и др. – М.: Экономика, 1984. – 176 с.
39. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева [и др.]. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
40. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
41. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
42. Силич В.А. Проектирование автоматизированных систем управления на основе иерархических семантических моделей: дис... д-ра техн. наук : 05.13.06. – Томск, 1995. – 421 с.
43. Силич В.А. Декомпозиционные алгоритмы построения моделей сложных систем. – Томск: Изд-во ТГУ, 1982. – 136 с.
44. Силич В.А. Содержательные модели систем и их использование при проектировании АСУ. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. – 115 с.
45. Половинкин А.И. Методы инженерного творчества : учеб. пособие. – Волгоград: Изд-во ВПИ, 1984. – 366 с.
46. Ехлаков Ю.П. Теоретические основы автоматизированного управления: учебник. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управ. и радиоэлектроники, 2001. – 337 с.
47. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
48. Леоненков А.В. Самоучитель UML. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 304 с.
49. Янг С. Системное управление организацией. – М.: Сов. радио, 1972. – 455 с.
50. Квейд Э. Анализ сложных систем. – М.: Сов. радио, 1969. – 520 с.
51. Планкетт Л., Хейл Г. Выработка и принятие управленческих решений : сокр. пер. с англ. – М.: Экономика, 1984. – 168 с.
52. Федоренко Н.П. О методах социально-экономического прогнозирования // Методология прогнозирования экономического развития СССР. – М.: Экономика, 1971. – 631 с.
53. Никаноров С. П. Конструирование организаций – состояние, значение, проблемы // Системное управление организацией. – М.: Сов. радио, 1972. – С. 5–22.

54. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ: учебник. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 186 с.
55. Оптимизация бизнес-процессов. Документирование, анализ, управление, оптимизация: пер. с англ. / Дж. Харрингтон, К.С. Эсселинг, Х. Нимвеген. – СПб.: Азбука БМикро, 2002. – 318 с.
56. Джонс Дж. К. Методы проектирования: пер. с англ. – 2-е изд., доп. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
57. Андерсен Бьёрн. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования: пер. с англ. С.В. Ариничева. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2003. – 272 с.
58. Повилейко Р.П. Инженерное творчество / Серия техника. – М.: Знание, 1977. – 62 с.
59. Методология IDEF0. Стандарт. Русская версия. – М.: Метатехнология, 1993. – 107 с.
60. Силич М.П. Системная технология: объектно-ориентированный подход: монография. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 224 с.
61. Силич М.П. Технология разработки целевых программ на основе объектно-ориентированного подхода: монография. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 208 с.
62. Слюсарчук В.Ф. Системные технологии // Вестник Красноярского государственного технического университета: сб. науч. тр. / под ред. Б.П. Соустина; КГТУ. – Красноярск, 1998. – С. 293 – 296.
63. Зиндер Е.З. Новое системное проектирование: информационные технологии и бизнес-реинжиниринг // СУБД. – 1995. – №4. – С. 37–49.
64. Кириллов В.П. SSADM – передовая технология разработки автоматизированных систем // Компьютеры + программы. – 1994. – №2 (10). – С. 8–16.
65. Калянов Г.Н. CASE структурный системный анализ (автоматизация и применения). – М.: Изд-во Лори, 1996. – 242 с.
66. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя: пер. с англ. / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон. – М.: ДМК, 2000. – 432 с.
67. Хаммер М., Чампи Дж. Реинжиниринг корпорации: Манифест революции в бизнесе: пер. с англ. – СПб.: Изд. СПб ун-та, 1997. – 332 с.
68. Ойхман Е.Г., Попов Э.В. Реинжиниринг бизнеса: реинжиниринг организаций и информационные технологии. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 336 с.

69. Силич В.А., Силич М.П. Реинжиниринг бизнес-процессов: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 200 с.
70. Разработка САПР: в 10 кн. – Кн. 1: Проблемы и принципы создания САПР / А.В. Петров, В.М. Черненький. – М.: Высшая школа, 1990. – 143 с.
71. Создание систем автоматизации поддержки инженерных решений / А. В. Рыбаков, С. А. Евдокимов, А. А. Краснов // Автоматизация проектирования. – 1997. – №5. – С. 44–51.
72. Гореткина Е. Как САПР нам строить и жить помогает // ИТ-бизнес. CRN. – 2004. – №4 (201).
73. Романова Л.К. Анализ хозяйственной деятельности: краткий курс лекций. – М.: Юрайт-Издат, 2003. – 220 с.
74. Грищенко О.В. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 112 с.
75. Шермет А.Д. Теория экономического анализа: учебник. – 2-е изд., доп. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 366 с.
76. Абрютин М.С., Грачев А.В. Анализ финансово-экономической деятельности предприятия: учеб.-практ. пособие. – М.: Дело и Сервис, 2001. – 272 с.
77. Силич М.П., Горбатов З.В., Хабибулина Н.Ю. Информационная система оценки финансово-экономического состояния предприятия // Вестник Томского государственного университета. – 2004. – Т. 284. – С. 90–95.
78. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование: классика CS. – 3-е изд.. – СПб.: Питер; Киев; Изд. группа BHV, 2004. – 847 с.
79. Замятина О.М. Компьютерное моделирование: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 115 с.
80. Силич М.П. Теория организации: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – 136 с.
81. Википедия [Электронный ресурс]. – URL: <http://ru.wikipedia>.
82. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии). – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 260 с.
83. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
84. Моделирование бизнеса. Методология ARIS / М.С. Каменнова, А.И. Громов, М.М. Ферапонтов [и др.]. – М.: Весть-Мета-Технология, 2001. – 333 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА</b>	
1.1. Определение системы .....	11
1.2. Закономерности систем: статический подход ..	16
1.3. Закономерности систем: динамический подход	24
1.4. Информационный подход к анализу систем ...	35
1.5. Классификация систем .....	44
<b>2. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА</b>	
2.1. Моделирование .....	51
2.2. Базовые модели систем .....	62
2.3. Измерение/оценивание систем .....	71
2.3.1. Типы шкал .....	71
2.3.2. Методы измерений/оценки в условиях определенности .....	81
2.3.3. Методы измерений/оценки в условиях неопределенности .....	94
2.4. Декомпозиция/композиция систем .....	106
2.4.1. Методы декомпозиции .....	106
2.4.2. Методы композиции .....	114
2.5. Модели иерархических многоуровневых систем	123
<b>3. МЕТОДОЛОГИИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА</b>	
3.1. Базовая методология системного анализа .....	131
3.1.1. Предмет системного анализа .....	131
3.1.2. Этапы системного анализа .....	134
3.1.3. Методы организации экспертиз .....	146
3.2. Методологии структурного анализа систем ...	151
3.2.1. Сущность структурного анализа .....	151
3.2.2. Методология ИСМ .....	153
3.2.3. Методология IDEF0 .....	162
3.3. Методологии логического анализа систем .....	171
3.3.1. Сущность логического анализа .....	171
3.3.2. Методологии построения дерева целей .....	173
3.3.3. Методология анализа иерархий .....	181

<b>4. ТЕХНОЛОГИИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА</b>	
4.1. Понятие технологии системного анализа .....	192
4.2. Специализированные технологии системного анализа .....	195
4.2.1. CASE-технологии разработки информационных систем .....	195
4.2.2. Технологии реинжиниринга бизнес-процессов	200
4.2.3. Технологии проектирования технических систем .....	204
4.3. Объектно-ориентированная технология системного анализа .....	206
4.3.1. Принципы разработки технологии .....	206
4.3.2. Объектно-ориентированная методология моделирования .....	217
4.3.3. Регламент объектно-ориентированной технологии .....	231
<b>5. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИСТЕМ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА</b>	
5.1. Экономический анализ .....	255
5.1.1. Содержание и методы проведения экономического анализа .....	255
5.1.2. Системное описание экономического анализа	265
5.1.3. Анализ финансовой устойчивости предприятия .....	273
5.1.4. Имитационное моделирование экономических процессов .....	281
5.2. Анализ систем организационного управления	291
5.2.1. Понятие организационной структуры .....	291
5.2.2. Типы организационных структур .....	295
5.2.3. Методы анализа и синтеза оргструктур	303
5.2.4. Развитие систем организационного управления	310
5.3. Анализ информационных ресурсов .....	314
5.3.1. Информационные ресурсы предприятия	314
5.3.2. Жизненный цикл управления информационными ресурсами .....	318
5.3.3. Методы анализа и синтеза информационных ресурсов .....	320
Заключение .....	332
Литература .....	333

Учебное издание

**Силич Мария Петровна, Силич Виктор Алексеевич**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ  
И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

Учебное пособие

Верстка Коновалова Н.В.

Подписано в печать 28.12.13. Формат 60х84/16.

Усл. печ. л. 19,8. Тираж 100 экз. Заказ 1279.

Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 53-30-18.