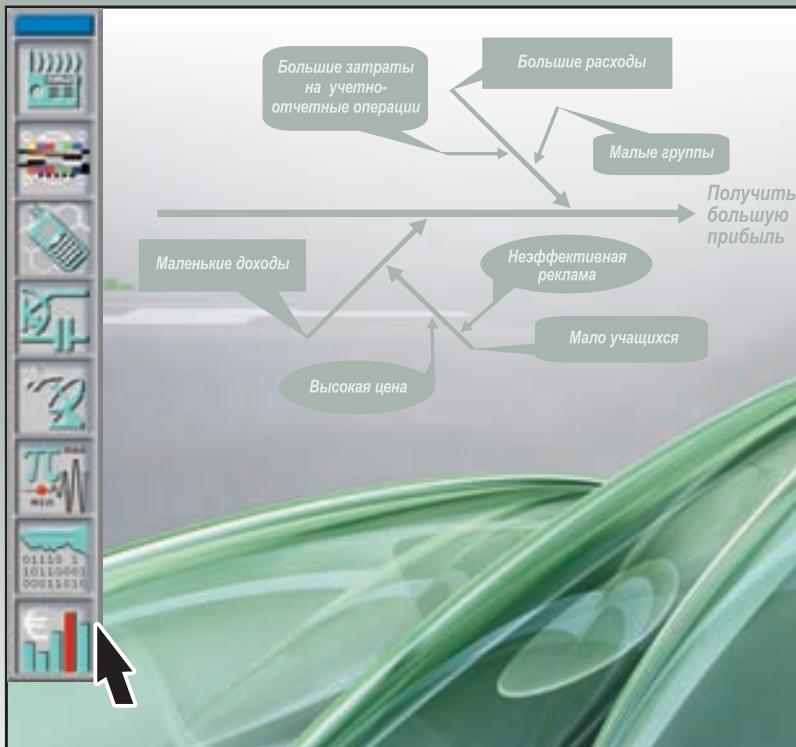


УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ДЛЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ



Основы теории систем и системного анализа



В. В. Качала

2-е издание

В. В. Качала

Основы теории систем и системного анализа

*Допущено УМО по образованию в области
прикладной информатики в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальности «Прикладная информатика (по областям)»*

**Москва
Горячая линия – Телеком
2012**

УДК 338.24 (075)
ББК 65.9(2)26.я73
К30

Рецензенты:

доктор педагогических наук, профессор *А. Г. Абросимов*;
доктор философских наук, профессор *В. А. Гошевский*

Качала В. В.

К30 Основы теории систем и системного анализа. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 210 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0249-7.

Рассмотрены понятия системы и системного подхода, вопросы целеобразования и моделирования, общесистемные закономерности и классификации систем, подходы к их анализу и проектированию.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная информатика (по областям)», а также студентов и аспирантов экономических и других специальностей, может быть полезным для широкого круга лиц, интересующихся вопросами системного анализа.

ББК 65.9(2)26.я73

Адрес издательства в Интернет www.techbook.ru

Учебное издание

Качала Вадим Васильевич

Основы теории систем и системного анализа

Учебное пособие для вузов

Обложка художника В. Г. Ситникова

Верстка Ю. Н. Чернышева

Подписано в печать 09.02.12. Формат 60×90/16.

Усл. изд. л. 13,12. Тираж 500 экз. (1-й завод 100 экз.) Изд. № 120249

ISBN 978-5-9912-0249-7

© В. В. Качала, 2007, 2012

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2012

Предисловие

В отличие от таких традиционных дисциплин, как физика, математика, химия и др., курс теории систем и системного анализа не имеет канонической структуры. Более того, каждый из авторов вкладывает в этот курс свое понимание того, что должно в нем содержаться. При этом диапазон областей знаний, претендующих занять центральное место в этом курсе, очень широк. В одних рабочих программах по системному анализу основное внимание уделяется прикладным статистическим исследованиям, в других — системный анализ отождествляется с исследованием операций. В одних книгах системный анализ рассматривается как раздел философии, в других — как инструмент для решения проблем некоторой предметной области (экономики, политики, социологии и др.). Последнее напоминает появление в свое время разных «кибернетик»: педагогической, юридической, химической и т. д.

Теория систем предпринимает попытку описать с единых позиций системы различной (в пределе — любой) природы: технические, биологические, социально-политические, экономические. Это в свое время провозгласила и кибернетика: законы управления универсальны, одинаковы для любых систем. К сожалению, пока не удастся создать единую теорию систем, но можно говорить о некотором наборе понятий, принципов, закономерностей, которые присущи практически любым системам. То же относится и к системному анализу: имеется ряд достаточно универсальных методов исследования, описания, проектирования и управления. При этом можно впасть в другую крайность и рассматривать некие абстрактные общие теории, которые, безусловно, имеют право на жизнь, однако специалистам-практикам важны прикладные аспекты теории систем и системного анализа.

В связи с вышеизложенным, построение учебного курса, действительно, представляет собой сложную задачу. Дополнительные трудности возникают при определении места дисциплины в учебном процессе. Дело в том, что, с одной стороны, дисциплину следует давать на младших курсах, до изучения систем предметной области, что позволит рассматривать последнюю с системных позиций. С другой стороны, изучение дисциплины на младших курсах не позволяет приводить примеры из соответствующей предметной области, дисциплины которой изучаются на старших курсах. По мнению автора, курс по

теории систем и системному анализу надо читать на втором и третьем курсах, приводя примеры из окружающей жизни или из изучаемой предметной области на уровне, доступном студентам младших курсов.

Структура данного пособия формировалась в течение многолетнего чтения курса студентам, обучающимся по специальностям «Прикладная информатика» и «Менеджмент», а также аспирантам экономических специальностей.

Пособие ориентировано на специалистов экономико-гуманитарного профиля, в связи с чем до минимума сведен используемый математический аппарат. Также следует отметить, что в этой работе мало говорится о конкретных экономических объектах — основное внимание будет уделено изучению общих основ и принципов системного подхода к анализу, описанию, проектированию и управлению объектами вне зависимости от их природы. Особое внимание уделено примерам, поскольку с их помощью усвоение многих положений теории проходит более успешно.

Пособие в первую очередь предназначено для специалистов по информационным системам в экономике, менеджменте, юриспруденции и других областях (учебная специальность «Прикладная информатика (по областям)»), поскольку системная аналитическая работа является важной частью их профессиональной деятельности. Важно, чтобы приемы системного анализа стали органической частью деятельности специалистов, способом их мышления.

Автор отдает себе отчет в том, что данное пособие не лишено недостатков. Любые замечания и пожелания будут встречены со вниманием и благодарностью. С автором можно связаться по электронному адресу: vvk21@ya.ru.

Введение

Любая человеческая деятельность направлена на достижение определенных целей. При этом принятие решения о характере и направлении деятельности требует знаний об окружающем нас мире, и чем сложнее этот мир, тем труднее принять верное решение. В двадцатом столетии мир, окружающий человека, очень сильно изменился; с середины века он становится все более динамичным и нестабильным, а по мере ускорения темпов перемен возрастает и сложность встающих перед человеком проблем [1].

В результате научно-технической революции середины XX века появилось много сложных объектов (атомные электростанции, космическая техника, электроника, компьютеры и т. п.), исследование, описание, проектирование и управление которыми представляет определенные трудности и проблемы.

Один из ярких примеров усложнения окружающего мира — всеобщая компьютеризация. Компьютер — изначально инструмент узких специалистов — ученых и исследователей, стал массовым явлением в наших домах и на рабочих местах. Кроме компьютеров, в квартирах достаточно другой, хотя и менее сложной, но все же непροстой для использования и понимания техники.

Круг общения человека за столетие расширился во много раз, человек в течение дня имеет в сотни раз больше контактов с другими людьми, десятки раз в день сталкивается с ситуациями, требующими принятия решения, часто в условиях неопределенности.

В общественно-экономической и политической сферах наблюдается усиление взаимовлияния, взаимозависимости, взаимодействия всех составных частей современного общества. Все более тесно переплетаются экономические, политические, социальные, духовные процессы, теснее взаимодействуют государство и общество, производство и наука, культура и бытовая сфера. Все это порождает трудности в познании, прогнозировании и управлении [9].

Сложные ситуации независимо возникли и в других сферах практической деятельности человека. При этом, чем сложнее проблемы, тем больше времени требуется для их решения; чем быстрее темп изменений, тем быстрее изменяются проблемы, которые необходимо решить, и тем меньше времени будут верны найденные решения [1]. Следовательно, к тому времени, как будут найдены решения проблем,

сами проблемы изменятся настолько, что эти решения утратят актуальность и эффективность.

В ответ на все возрастающую сложность окружающего мира в разных областях разрабатывались разные подходы, формировались новые направления, получившие названия: «системотехника», «исследование операций», «политология», «системный подход» и другие. В результате сопоставления решаемых проблем в различных областях человеческой деятельности выявлялось частичное их совпадение, что привело к понятию «система». Постепенно ученые пришли к выводу о том, что данное понятие может быть использовано в самых разных сферах исследовательской и практической деятельности. К началу 80-х гг. все теоретические и прикладные дисциплины образуют как бы единый поток, «системное движение», все шире используются понятия «системный подход», «системный анализ», а в последнее десятилетие все чаще можно слышать о «системном мышлении», «системном кризисе» и т. п.

Можно с уверенностью констатировать, что XX век был не только веком покорения атома и сотворения компьютера. Главное его достижение — создание системного мировоззрения и системного метода получения знаний, которые в конечном итоге предопределили и использование атомной энергии, и появление компьютера, и еще сотни тысяч достижений в области науки, техники, производства, политики и культуры [16].

Однако системные представления не являются открытием XX века. Слово «система» появилось в Древней Греции 2000–2500 лет назад и означало «сочетание», «организм», «устройство», «организация», «строй», «союз». Первоначально оно было связано с формами социально-исторического бытия, позднее принцип порядка был перенесен на Вселенную. В античной философии термин «система» характеризовал упорядоченность и целостность естественных объектов, а термин «синтагма» — упорядоченность и целостность искусственных объектов [15].

В конце XIX — начале XX веков возникают три варианта нового направления, которое предполагает обобщенное описание организации, «поведения» систем любой природы и управления ими: *тектология*, *общая теория систем* и *кибернетика**.

Тектология Александра Александровича Богданова (Малиновского), 1873–1928 гг. (название заимствовано А.А. Богдановым у Эрнста Геккеля, который употреблял это слово по отношению к законам

* Более подробно о предыстории современного системного анализа можно посмотреть в [15].

организации живых существ) [4]. Основная идея тектологии заключается в единстве строения и развития самых различных систем («комплексов» по его терминологии) независимо от того конкретного материала, из которого они состоят [17]. Это системы любых уровней организации — от атомных и молекулярных до биологических и социальных. Тектология Богданова — всеобъемлющая наука об универсальных типах и закономерностях структурного преобразования любых систем, общая теория организации и дезорганизации. Для построения грандиозного здания своей всеобщей организационной науки Богданов использовал материал самых различных наук, как естественных, так и общественных. Богданову удалось заложить основы новой синтетической науки, охватывающей все области человеческого знания. Исторически тектология была первой системно-методологической концепцией, хотя она не оказала практически никакого влияния на формирование системного мышления вплоть до 60-х гг. XX века [13].

Общая теория систем Людвиг фон Берталанфи, конец 40-х гг. XX века [3]. Впервые термин «*теория систем*» был использован биологом-теоретиком и философом Людвигом фон Берталанфи в лекциях, прочитанных в 1937–1938 гг. в Чикагском университете, а первые публикации на эту тему относятся к 1947–1950 гг. [13]. Именно ему обязана своим существованием область знаний под названием «общая теория систем». В теории Берталанфи главное понятие — «открытая система».

Кибернетика Норберта Винера. В 1948 г. выходит знаменитая книга Н. Винера «Кибернетика» [5], в которой провозглашается единство принципов управления в биологических и технических системах, а позднее — и в социальных [6] (в настоящее время кибернетику чаще квалифицируют как часть теории систем). Чтобы понять комплексность системных исследований, обратимся к воспоминаниям Н. Винера, в которых он указывает, что так или иначе емугодились в работе математика, математическая логика, статистика, биология, медицина, физиология, нейрофизиология, психология, социология, теория связи, теоретическая электротехника и электроника [15].

Потребности практики (в первую очередь, в военной сфере) и становление *теории систем* привели к возникновению области науки, занимающейся разработкой методов принятия решений в задачах организации управления. Она называется *исследованием операций* [7].

Постепенно различные виды системных теорий интегрируются в *системологию*, которая включает в себя *общую теорию систем*, *отраслевые* и *специальные теории систем*, *системотехнику* [16].

1. *Общая теория систем* интегрирует наиболее обобщенное знание о системах. Она находится под воздействием двух наук: фило-

софии, которая дает ей обоснование категориального аппарата, методы и приемы познания, качественное видение систем, и математики, обеспечивающей количественный анализ систем. Огромную роль в развитии общей теории систем играют логика, теория множеств, кибернетика и другие науки.

2. *Отраслевые теории систем* раскрывают специфику систем различной природы. Речь идет о теории физических, химических, биологических, экономических, социальных систем, которые курируются соответствующими отраслями наук.

3. *Специальные теории систем* направлены на отражение их отдельных сторон, аспектов, срезов, этапов. Они находятся под влиянием соответствующих теорий. Например, теория диссипативных систем, теория переходных систем, теория эволюции систем и т. п.

4. Наконец, *системотехника* (прикладная инженерная дисциплина) находится под воздействием техники, моделирования, проектирования и конструирования, т. е. технической, биологической, информационной и социальной инженерии.

В начале 80-х гг. уже стало очевидным, что все теоретические и прикладные дисциплины образуют как бы единый поток, «системное движение», методологической базой которого стал так называемый *«системный подход»*. Он широко использовался в первые годы приложения теории систем к практическим задачам, но был несколько скомпрометирован большим числом работ неконструктивного характера.

Однако системный подход — это всего лишь подход и не более. Остро ощущалась нехватка некоего прикладного научного направления, которое явилось бы «мостом» между абстрактными теориями и живой системной практикой. Сначала такие направления возникали в разных областях под разными названиями, но затем сформировалось направление, получившее название *«системный анализ»* — наиболее конструктивное из прикладных направлений системных исследований*.

Сам термин «системный анализ» впервые появился в работах корпорации RAND в 1948 г. Первой разработкой, которая была представлена как «система», стало проектирование сверхзвукового бомбардировщика В-58, начавшееся в 1952 г. [10].

Как направление кибернетики системный анализ стал рассматриваться в начале 50-х гг. при исследовании сложных систем в биологии, макроэкономике и создании автоматизированных экономико-организационных систем управления.

* Более подробно о становлении системного анализа можно прочесть в работе [10].

Имеется много вариантов определения понятия «системный анализ» [2, 12, 14 и др.]. Остановимся на следующем:

☒ **Системный анализ** является областью деятельности, направленной на выявление причин сложностей, возникших перед «обладателем проблемы» (конкретная организация, учреждение, предприятие, коллектив или индивид), и на выработку вариантов их устранения.

Таким образом, задачи системного анализа состоят не только в понимании функционирования системы (собственно анализ*) — задачами более высокого уровня выступают проектирование нужной системы, ее создание и управление ею [8].

Системный анализ в настоящее время представляет собой слабосвязанную совокупность приемов и методов формального и неформального характера [11]. Не успев сформироваться в полноценную научную дисциплину, системный анализ вынужден существовать и развиваться в условиях, когда общество начинает ощущать потребность в применении еще недостаточно разработанных и апробированных методов и результатов и не в состоянии отложить решение связанных с ними задач на завтра [2]. В этом источник как силы, так и слабости системного анализа: силы — потому, что он постоянно ощущает воздействие потребности практики, вынужден непрерывно расширять круг объектов исследования и не имеет возможности абстрагироваться от реальных потребностей общества; слабости — потому, что нередко применение «сырых», недостаточно проработанных методов системных исследований ведет к принятию скороспелых решений, пренебрежению реальными трудностями.

Области применения системного анализа обширны: от техники до экономики, от математики до социального планирования, от космических исследований до процессов. Казалось бы, должно существовать общее изложение системного анализа, удовлетворяющее все эти области. Однако — и это выглядит парадоксальным — такого изложения пока нет. Имеются многочисленные публикации по этой теме, но нет учебника или монографии, где были бы систематизированы те принципы, рассуждения и методики, на которых основано множество прикладных работ.

Изучающим теорию систем и системный анализ необходимо учесть, что, прочтя даже гору соответствующих книг, нельзя стать специалистом в этой области — системным аналитиком. Профессионализм приобретается в процессе практической деятельности.

* Анализ — метод научного исследования, состоящий в мысленном или фактическом разложении целого на составные части.

Литература

1. *Акофф Р.* Акофф о менеджменте. — СПб.: Питер, 2002. — 448 с.
2. *Антонов А.В.* Системный анализ. — М.: Высшая школа, 2004. — 453 с.
3. *Берталанфи Л.* Общая теория систем: Обзор проблем и результатов // Системные исследования: Ежегодник. — М.: Наука, 1969. С. 30–54.
4. *Богданов А.А.* Тектология. — М.: Экономика, 1989. — 655 с.
5. *Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине. — М.: Наука, 1983. — 334 с.
6. *Винер Н.* Кибернетика и общество. — М.: Тайдекс Ко, 2002. — 184 с.
7. *Волкова В.Н.* Из истории развития системного анализа в нашей стране // Экономическая наука современной России. 2001. № 2–3.
8. *Губанов В.А., Захаров В.В., Коваленко А.Н.* Введение в системный анализ: Учебное пособие. — Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1988. — 232 с.
9. *Камионский С.А.* Менеджмент в российском банке: опыт системного анализа и управления. — М.: Деловая библиотека Омскпромстройбанка, 1998. — 112 с.
10. *Никаноров С.П.* Системный анализ: этап развития методологии решения проблем в США. // Системное управление — проблемы и решения. 2001. Выпуск 12. С. 62–87.
11. *Николаев В.И., Брук В.М.* Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985. — 199 с.
12. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.
13. *Садовский В.Н.* Людвиг фон Берталанфи и развитие системных исследований в XX веке. // Системный подход в современной науке. — М.: Прогресс-Традиция, 2004. С. 7–36.
14. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. *В.Н. Волковой, В.Н. Козлова.* — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.
15. *Смотрицкий Е.Ю.* Становление системного мышления в первой половине XX века. — <http://www.smotr.iatp.org.ua/text/system-theory-history-1.htm>.
16. *Сурмин Ю.П.* Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. — Киев: МАУП, 2003. — 368 с.
17. *Таштадзян А.Л.* Слово о тектологии. — <http://www.bogdinst.ru/HTML/Bogdanov/Tektology/AboutTektology.htm>.

Г Л А В А 1

Цели и трудности целеполагания

Любая деятельность является направленной. Системный анализ также представляет собой направленную деятельность по анализу, описанию, проектированию и управлению. В любой направленной деятельности можно выделить двух участников: *субъекта и объект* (рис. 1.1).

☒ *Активного участника направленной деятельности будем называть **субъектом**, а пассивного — **объектом**.*

В зависимости от решаемых субъектом задач будем его называть: *наблюдателем* — субъект только наблюдает за объектом и не оказывает никаких воздействий на него;

исследователем — субъект воздействует на объект с целью получения информации о нем;

проектировщиком — субъект проектирует будущий объект;

управляющим — субъект воздействует на объект с целью достижения заданных свойств.

В качестве *субъекта* чаще всего представляют человека, но иногда может выступать и техническое устройство. *Объектом* же может быть явление, предмет, устройство, проблема, предприятие и т. п.

1.1. Цели

1.1.1. Целенаправленная деятельность

Всякая деятельность (движение, изменение, развитие и т. п.) является *целенаправленной* — направлена на достижение определенной цели [5].

Примеры. Студент учится, чтобы получить профессию. Рабочий обтачивает заготовку, чтобы получить деталь. Спортсмен тренируется, что завоевать медали и чемпионские звания. Целевой характер имеют отдых, развлечения, прогулки, игры, физзарядка, чтение, коллекционирование и т. п.

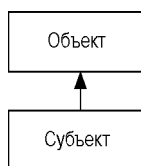


Рис. 1.1.
Взаимодействие
объекта и
субъекта

☑ **Цель** — это субъективный образ желаемого состояния объекта.

Причинной и движущей силой любой деятельности является наличие противоречия — своеобразной «разности потенциалов» между имеющимся и желаемым (целевым) состояниями объекта. Если пути устранения противоречия не являются очевидными, то противоречие становится проблемой.

1.1.2. Цели и проблемы

Цели тесно связаны с проблемами: с одной стороны, поставленная цель порождает проблему ее достижения, а с другой — для решения проблемы ставится цель как путь ее решения. При этом проблемы могут иметь объективный или субъективный характер, а цели могут носить характер желания или направления деятельности.

Примем за аксиому, что высшая цель — сохранение функционирования и развития объекта. Это порождает потребность в обменных явлениях: в материальных, энергетических и информационных потоках подводимых ресурсов и отводимых потоках продуктов функционирования.

☑ **Потребность** — это объективная необходимость во взаимодействии с окружающей средой для сохранения функционирования и развития объекта.

Следует различать *удовлетворенную* и *неудовлетворенную* потребности. Неудовлетворенная потребность порождает проблемную ситуацию — проблему, которую назовем *объективной проблемой*.

☑ **Объективная проблема** — это разность между необходимым и существующим.

Пример. Для управления необходима информация, для жизни человека — воздух и т. п. Если всего этого хватает, то нет никаких проблем; они начинаются, если потребность не удовлетворена.

Решение объективной проблемы формируется в виде *желания*.

☑ **Желание** — это субъективно осознанная потребность, соотношенная с конкретным результатом ее удовлетворения.

Субъективность желания состоит в том, что, с одной стороны, мы можем желать только то, о чем знаем и понимаем (или нам кажется, что понимаем); с другой стороны, чтобы появилось желание, надо осознать, что потребность имеется.

Примеры. 1. Для управления имеется объективная потребность в информации, и когда ее не хватает (или кажется, что не хватает), возникает желание внедрить информационную систему. Если руководитель не понимает, что такое информационная система, он может пожелать принять на работу дополнительных сотрудников, которые бы собирали, передавали и обрабатывали информацию.

2. Мы желаем приобрести мобильный телефон и принимаем это за потребность. Но это не объективная потребность, а только желание. Потребность у нас может быть, например, в оперативной связи, и удовлетворить ее можно и другими средствами.

Желание носит целевой характер, но эта цель — только *цель-желание* — без критического осмысления ее достижимости.

☒ **Цель-желание** — субъективный образ состояния объекта (или конкретное средство), которое удовлетворило бы осознанную потребность.

Далее оценивается достижимость желания: если реализация желания не имеет известного (простого) решения, то возникает *субъективная проблема* (не желайте и не будет у вас проблем!).

☒ **Субъективная проблема** — разность между желаемым и действительным, ликвидация которой не является очевидной.

Примеры. 1. Пусть появилось желание установить в организации информационную систему. При этом могут появиться проблемы: недостаточность финансовых средств, отсутствие требуемых помещений, отсутствие соответствующих квалифицированных кадров для ее внедрения и эксплуатации и, наконец, проблема выбора — на рынке имеется несколько систем, а нужна одна — какую выбрать?

2. Мы желаем приобрести мобильный телефон, и тут появляются проблемы: нет денег на его приобретение, нет телефонов с желаемыми функциями и т. п.

Из субъективной проблемной ситуации вытекает *цель-намерение*.

☒ **Цель-намеренье** — субъективный образ несуществующего, но желаемого состояния объекта, которое решило бы возникшую проблему и на достижение которого будет направлена деятельность.

Таким образом, *цель находится в непосредственной зависимости от потребности и желания* — является их прямым следствием.

А что является источником потребности? Потребность определяется объектом. Если есть серьезная проблема удовлетворения потребности, то надо менять объект: на другой объект или изменять существующий (последнее в экономике называется реорганизацией).

Пример. Если есть проблема с бензином для автомобиля, то ставим на него газовую установку или заменяем его электромобилем.

При исследовании объектов необходимо разделять потребности и желания. Потребности можно считать константой, если объект не предполагается изменять. Желания же могут корректироваться. Это может происходить при изменении потребностей, а также при получении субъектом целеполагания новой информации об объекте исследования. В связи с этим задача системного аналитика — помочь субъекту целеполагания, предоставив ему дополнительную информацию.

1.1.3. Цель и точка зрения

В системном анализе цель занимает центральное место, собственно сам системный анализ и начинается с формулирования целей.

Однако, говоря о цели, нельзя упускать из виду, что **выбор цели глубоко субъективен**. Если ставится или имеется цель, то всегда существует субъект целеполагания, *точка зрения* которого отражается в ней. Дело в том, что выбранная цель направлена на удовлетворение конкретной жизненной потребности конкретного субъекта. При этом выбор цели всегда ограничен конкретными знаниями и пониманием субъекта — нельзя желать того, о чем не знаешь.

В связи с вышесказанным, при исследовании всегда необходимо определяться с тем, чья точка зрения на объект берется за основу. При системном анализе цель можно рассматривать с позиций субъекта и объекта исследования.

Цель с позиции субъекта определяет цель анализа, описания, проектирования (создания или реорганизации) и управления:

- *цель анализа* объекта — выявить наличие и место противоречий (проблемной ситуации), причин их возникновения и способов устранения;
- *цель описания* объекта — представить проблемную ситуацию в виде, удобном для анализа;
- *цель проектирования* — разрешить проблемную ситуацию с помощью нового объекта или реорганизации старого;
- *цель управления* — разрешить проблемную ситуацию путем удержания функционирования объекта в заданном состоянии или перевода его в новое состояние.

При всем при этом субъект преследует свои цели, удовлетворяет свои потребности (например, получение прибыли, самореализация и т. п.). К тому же сам субъект анализа часто является сосредоточием субъектов целеполагания: это отдельные исполнители (каждый имеет свою цель), это и руководители различного уровня.

Цель с позиции объекта определяет цель его функционирования (существования), которая может быть заложена при его создании либо формироваться внутри него.

Примеры. 1. Если анализируется проблемная ситуация в некотором техническом устройстве, то вначале необходимо понять назначение этого устройства.

2. При анализе экономического или организационного объекта иногда выясняется, что фактическая цель его функционирования отличается от цели, с которой он создавался.

И здесь мы также имеем нескольких субъектов целеполагания: коллектив или индивидуумы объекта исследования, руководитель объекта, руководитель вышестоящего уровня и т. д.

Кроме того, в качестве субъекта целеполагания может выступать заказчик анализа. Таким образом, можно говорить о трех группах целей участников анализа, имеющих различные потребности, а отсюда и разные цели — аналитику приходится решать три задачи, связанные с целью: понимание целей заказчика; определение внутренних целей объекта анализа; формулировка своих целей анализа.

1.2. Формирование критериев

В общем случае цели имеют либо конкретную, либо расплывчатую формулировку. Поэтому различают два типа целей:

- *цель-результат* — конкретная, измеримая цель (рис. 1.2,а);
- *цель-направление* — идеальная, качественная цель (рис. 1.2,б).

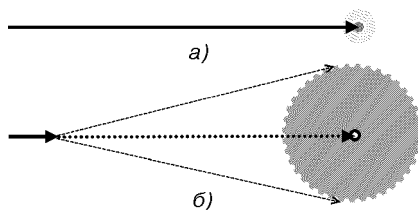


Рис. 1.2. Цель-результат (а) и цель-направление (б)

Пример. Увеличение выпуска продукции в два раза — цель-результат, а повышение образовательного уровня работников — цель-направление.

1.2.1. Критерии как модели целей

Для количественной оценки степени достижения цели используются *критерии* (особенно для идеальной цели). В этом смысле *критерии можно рассматривать как количественные модели качественных целей*.

Примеры. 1. Цель-результат: построить дачный домик. Если не ввести критерии, то построение любого сооружения от сарая до дворца можно считать достижением поставленной цели.

2. Цель-направление: повышение образовательного уровня сотрудников. Для ее конкретизации можно ввести такие критерии:

- процент сотрудников, имеющих высшее образование;
- количество сотрудников, имеющих сертификаты о дополнительном образовании.

Необходимость в критериях возникает также в задачах управления, в частности, в задачах оптимизации и принятия решений, когда возникает необходимость оценки имеющихся альтернатив. Определение значения критерия для данной альтернативы является, по существу, косвенным измерением степени ее пригодности (ценности) как средства достижения цели.

1.2.2. Многокритериальность реальных задач

Многокритериальность реальных задач связана с тем, что одну цель редко удается выразить одним критерием, хотя к этому обычно стремятся [5]. Конечно, возможны случаи, когда единственный критерий отвечает требованиям практики.

Пример. По международным стандартам одним из основных критериев, отражающих качество и уровень медицинского обслуживания, является детская смертность до года.

Очень редко единственный критерий удачно отображает цель, поскольку критерий лишь приближенно (как и всякая модель) отображает цель, и адекватность одного критерия может оказаться недостаточной.

Пример. Формирование критериев для достаточно ясной цели: улучшить уборку мусора в большом городе [5]. В результате анализа были отвергнуты как неадекватные следующие, на первый взгляд, подходящие критерии: расходы по уборке мусора в расчете на одну квартиру, число тонн убираемого мусора в расчете на один рабочий человеко-час, общий вес вывозимого мусора — эти критерии ничего не говорят о качестве работы. Более удачными были признаны такие критерии, как процент жилых кварталов без заболеваний, снижение числа пожаров из-за возгорания мусора, уменьшение числа укусов людей крысами, количество обоснованных жалоб жителей на скопление мусора. Впрочем, очевидно, что и эти критерии отражают только отдельные стороны качества уборки мусора в городе.

Всегда следует помнить о том, что *дело не только и не столько в количестве критериев, сколько в том, чтобы они достаточно полно «покрывали» цель.* Это означает, что критерии должны описывать по возможности все важные аспекты цели, но при этом желательно минимизировать число необходимых критериев.

1.3. Трудности целеполагания

1.3.1. Ограничения целеполагания

Решение любой реальной задачи сталкивается с ограничениями, которые можно разделить на две группы:

- объективные — законы природы и ресурсные ограничения;
- субъективные — ограниченность понимания действительности и система ценностей субъекта целеполагания.

Целеполагание также подвержено влиянию как внешних, так и внутренних факторов, а также времени.

Пример. При постановке и решении задач системного анализа необходимо учитывать не только цели, на достижение которых он направлен, но и возможности, которыми обладают стороны для решения поставленных задач и которые позволяют снять выявленные проблемы [1]. В первую очередь необходимо учитывать ресурсы, имеющиеся у сторон. К ресурсам следует отнести:

- денежные ресурсы, которые заказчик согласен выделить системным анализам для решения поставленной задачи;

- ресурсы исполнителя: людские ресурсы, ресурсы вычислительные (наличие вычислительной техники, ее количество и т. д.), материальные ресурсы, требуемые для решения задач (например, наличие канцелярских товаров, транспорта, ресурсов связи);
- временные ресурсы; сроки решения задач системного анализа, как правило, оговариваются.

При формулировке задачи системного анализа необходимо также учитывать интересы окружающей среды.

В практике системного анализа встречаются случаи, когда наложенные ограничения столь сильны, что делают нереальным достижение цели. Тогда системный аналитик должен ставить перед лицом, принимающим решение, вопрос о том, нельзя ли данные ограничения ослабить или снять совсем.

1.3.2. Проблематика

Если для традиционных наук определение цели — начальный, отправной этап работы, то при работе со сложными объектами — это промежуточный результат, которому предшествует длительная, кропотливая и сложная работа по *формулировке исходной проблемы* [5]. Дело в том, что проблемосодержащий объект не является изолированным — он связан с другими объектами, в различной степени причастными к данной проблеме, и входит как часть в некий мегаобъект. Кроме того, исследуемый объект обычно сам состоит из множества микрообъектов, имеющих свои потребности, желания, проблемы и цели. В связи с этим к любой реальной проблеме необходимо априори относиться не как к отдельно взятой, а как к «клубку» взаимосвязанных проблем в том смысле, что решение нашей проблемы чаще всего приведет к образованию совокупности проблем в окружающих систему объектах. Будем использовать для обозначения этой совокупности термин *проблематика*.

☒ **Проблематика** — совокупность проблем, возникающих в соседних объектах при решении проблем исследуемого объекта.

Примеры. 1. Лечение больного органа порождает проблемы в соседних.
2. Решение проблемы одного члена семьи порождает проблемы у других.
3. Решение проблемы одной части организации порождает проблемы у других.

Таким образом, исследование всякой проблемы следует начинать с ее расширения до *проблематики*. Необходимо определить и рассмотреть проблемы, существенно связанные с исследуемой, без учета которых она не может быть решена.

В англоязычной литературе часто используется понятие *stakeholders*, что означает «перечень заинтересованных лиц» [5]. В этот перечень на первых порах рекомендуется включать:

1) *заказчика*, который ставит проблему, заказывает и оплачивает системный анализ;

2) *лиц, принимающих решения*, от полномочий которых непосредственно зависит решение проблемы;

3) *участников*, как активных, т. е. тех, чьи действия потребуются при решении проблемы, так и пассивных — тех, на ком скажутся (положительным или отрицательным образом) последствия решения проблемы;

4) *самого системного аналитика и его сотрудников*, главным образом, для того чтобы предусмотреть возможность минимизации его влияния на остальных заинтересованных лиц, — своеобразная «мера безопасности».

Под «заинтересованными» лицами следует понимать и тех, кто на самом деле *не заинтересован* в решении проблемы и будет сопротивляться возможным переменам.

Каждая из сторон имеет свое видение проблемы; отношение к ней, существование или исчезновение проблемы связано с существованием или появлением их собственных проблем.

Таким образом, при построении проблематики системный аналитик определяет, кто из заинтересованных лиц и в чем заинтересован, какие изменения и почему они хотят внести. При этом сам аналитик не должен влиять на мнения обследуемых лиц. После рассмотрения проблематики формулируется окончательная цель.

Для коммерческих организаций (в какой-то мере и для некоммерческих) можно рассматривать три базовых круга проблематики (рис. 1.3):



Рис. 1.3. Круги проблематики

- внутренняя среда (подразделения организации);
- бизнес-окружение;
- внешняя среда.

Для оценки влияния решения наших проблем на другие заинтересованные объекты можно построить матрицу проблематики, включающую перечень заинтересованных объектов, вид (выгода или потеря) и степень влияния на них наших решений, их поддержку или противодействие.

Пример. Матрица проблематики для задачи создания внедренческой фирмы по автоматизации бухгалтерского учета:

№ п/п	Заинтересованный объект	Вид влияния (выгода/потери) на объект	Степень влияния ¹
1	Налоговая инспекция	1. Облегчение работы с организациями, имеющими автоматизированный бухучет 2. Увеличение собираемых налогов	3
2	Жители города	Получают новые рабочие места	5
3	Вузы города	Получают места практики и работы для студентов и выпускников	10
4	Клиенты	Получают возможность выбора или товар (услугу), которого раньше не было	10
5	Конкуренты	Потеря прибыли	–5
6	Регион	1. Получение дополнительных налогов 2. Снижение безработицы	10
Примечание. ¹ Степень влияния наших решение на объект может варьироваться от –10 до 10.			

1.3.3. Неопределенность целеполагания

Еще древними философами были замечены свойства любой человеческой деятельности: полученные результаты всегда отличаются от запланированных целей, т. е. *цель всегда несет в себе элементы неопределенности*.

Причина этой неопределенности кроется в слабой изученности свойств окружающей действительности, неполноте информации о ней.

Зачастую человек в своей деятельности руководствуется принципом совпадения целей и результатов, и поэтому нередко попадает впросак, удивляясь, что планировал одно, а получил иное. Особенно это опасно при организации бизнеса, который может закончиться крахом.

Опасность расхождения целей и результата возникает в том случае, если целевые результаты служат основой для планирования дальнейшей деятельности. В этом случае могут возникать серьезные проблемы.

Примеры. 1. Начинающий бизнесмен берет кредит в банке под залог своей квартиры, планируя через определенное время получить прибыль, достаточную для того, чтобы расплатиться за кредит и иметь деньги на развитие. Однако в случае недостижения цели, лишается и бизнеса и квартиры.

2. При газификации домов, когда вырыты траншеи и подведены трубы, жильцы ломают свои печи в надежде, что они больше не понадобятся. Но в силу разных причин (отсутствие некоторых устройств, рабочих перевели на выполнение другой срочной работы) к зиме у жильцов запланированного газа нет, как нет и альтернативного средства обогрева в виде печей.

* * *

Современные представления о расхождении целей и результатов деятельности связаны с именем российского философа Н.Н. Трубецкого, который утверждал, что их причиной является «двойственность» используемых средств [3]. Действительно, когда средства подбираются для реализации намеченной цели, например определенная структура, технология, персонал и т. д., то, будучи еще не опробованными в реальной деятельности, они представляют собой идеальные средства, т. е. средства, лишь мысленно подходящие для достижения целей. И как идеальные средства они, казалось бы, способны обеспечить реализацию запланированных целей. Но когда они становятся реальными средствами, то дают результат, в чем-то не совпадающий с целями.

Кроме неопределенности, в цели проявляется ее вторая сторона: *цель можно рассматривать в качестве средства оценки будущего результата.*

1.3.4. Опасность подмены целей средствами

Часто субъект, цели которого должны быть выявлены, сам не может их четко осознать, даже если и дает им четкие формулировки [5].

Дело в том, что *любая цель обладает двойственностью, являясь одновременно и целью, и средством для достижения вышестоящей цели.* Достижение цели всегда базируется на некоторых средствах этого достижения, т. е. существует пара «средство \rightarrow цель». Но цель, в свою очередь, может являться средством для достижения вышестоящей цели, и наоборот, средство достижения цели необходимо иметь, получить, спроектировать, создать, т. е. средство на некотором этапе само становится целью. Таким образом, мы имеем дело с теоретически бесконечной цепочкой: i -я цель (Π_i) достигается благодаря i -му средству (C_i), i -я цель является $(i + 1)$ -м средством для $(i + 1)$ -й цели и т. д.:

$$\dots C_i \rightarrow \Pi_i = C_{i+1} \rightarrow \Pi_{i+1} = C_{i+2} \rightarrow \Pi_{i+2} \dots$$

В связи с этим субъекту целеполагания бывает очень трудно разобратся в этой цепочке и выявить, что же является конечной целью.

Пример. ... Хорошо учиться в школе, чтобы поступить в институт.

Цель поступления в институт? Получить специальность. (Значит, поступление в институт только средство, а не цель!)

А зачем получать специальность? Чтобы получить хорошую работу.

А зачем нужна хорошая работа? Чтобы получать хорошие деньги.

А зачем получать хорошие деньги? Чтобы ...

Рассмотрим примеры ошибок при предварительном определении цели, когда *средства принимались за цели*.

Примеры. 1. В одном исследовании проблемы «где лучше разместить новую больницу» выяснилось, что действительная цель — улучшение медицинского обслуживания населения, и среди предложенных альтернатив нашлись более эффективные способы использования ресурсов, нежели строительство новой больницы [5].

2. Перед изобретателем поставили задачу: придумать устройство для мытья больших окон в цехе металлообработки. Но впоследствии оказалось, что цель была не чистые окна, а освещенность рабочего места токарей и фрезеровщиков. После уточнения цели было предложено установить электрические лампы на каждый станок, а чистота окон — это уже другая задача, например, эстетики или культуры производства.

3. Какую бы вы поставили цель перед пожарной командой? В 20-х гг. был введен своеобразный критерий оплаты труда пожарных — время пребывания на пожаре [7]. В соответствии с этим производилась оплата труда пожарных. Первый пожар был потушен через 15 мин и... пожарные остались без зарплаты. Затем они «поумнели» и стали тушить пожары в течение нескольких часов. Как выяснилось позже, иногда они сами поджигали дома.

1.3.5. Влияние ценностей на цели

Надо быть готовым к тому, что на выбор целей субъекта существенное влияние оказывает общая идеология, система ценностей, которой он придерживается [5].

☒ *Под ценностями обычно понимаются персональные или социальные предпочтения или приемлемость путей их достижения [4].*

В систему ценностей могут входить познавательные, моральные, экономические, политические, этические, эстетические, материальные, либеральные, моральные, религиозные, экологические, политические ценности. К путям достижения цели относятся такие ценности как честность, пацифизм и др.

Поэтому одно из направлений исследования в ходе выявления цели может состоять в изучении системы ценностей, прежде всего той, которой обладают лица, принимающие решения; однако в ряде случаев может оказаться необходимым принять во внимание системы ценностей и остальных заинтересованных сторон [5].

1.3.6. Опасность смешения целей

Разновидностью влияния ценностей на цели является смешение целей. В этом случае узкопрофессиональные ценности превалируют над общественными. Обычно такая ситуация возникает, когда в решении проблем участвуют специалисты-профессионалы, навязывающие свое видение мира и тем самым подменяющие главные цели своими [5].

Примеры. 1. «Операция прошла успешно, но пациент умер», — это не дурная шутка, а действительно встречающееся среди хирургов высказывание.

2. Внешне очень элегантное здание, построенное в университетском городке, получило золотую медаль Королевского Общества архитекторов, но его внутренняя планировка оказалась непригодна ни для учебных, ни для административных целей.

3. Имеется большое количество рекламной продукции, отмеченной различными призами, но которая не оказала никакого влияния на сбыт рекламируемой продукции.

1.3.7. Множественность целей

Случаи, когда у субъекта имеется только одна цель, встречаются редко, чаще всего их несколько и важно не упустить какую-нибудь существенную из них. В частности, чем выше уровень управления, тем больше целей, даже если текстуально они объединены одной формулировкой — «глобальная цель».

Пример. Цель современного предприятия не может быть сведена к получению максимальной прибыли: она представляет собой сумму целей всех его работников, собственников, потребителей и, строго говоря, всех остальных субъектов общества, как-то связанных с ним.

Цели человека обладают *внутренней неустранимой парадоксальностью*: каждая человеческая потребность присутствует в целях человека вместе с ее противоположностью [3]. Человек *одновременно* стремится:

- к стабильности и к развитию;
- к осуществлению своей индивидуальности и к принадлежности к коллективам;
- к познанию и в то же время отбрасывает «лишнюю» или негативную информацию;
- к свободе, но боится ее бремени;
- к соблюдению этических норм, но часто испытывает недобрые побуждения и т. д.

1.3.8. Изменение целей со временем

Представление и формулировка цели зависят от стадии познания объекта и времени [7]. Цели могут изменяться как по мере изменения и понимания объекта, так и по мере появления и понимания

новых средств решения проблем. Потребность в корректировке целей возникает и у заказчика, и у исполнителя, что иногда порождает конфликтные ситуации.

При этом цели более высоких уровней долговечнее. В социальных системах цели высших уровней часто формулируются как интересы будущих поколений, сроки целей нижних уровней связаны с настоящими действиями и с действиями в ближайшем будущем.

1.4. Требования к цели

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать требования к цели. Правильно сформулированные цели должны удовлетворять следующим основным требованиям [2]:

Конкретность — при определении цели необходима точность отражения ее содержания, объема и времени. Удовлетворение цели может принести только конкретный результат, полученный с помощью конкретных средств в конкретных условиях.

Измеримость — цель должна быть представлена количественно или каким-либо другим способом для оценки степени ее достижения.

Достижимость — цели должны быть реальными, не выходящими за рамки возможностей исполнителей.

Согласованность — цели следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи.

Приемлемость — необходимо учитывать потребности, желания, традиции, сложившиеся в обществе ценности.

Гибкость — возможность внесения корректировки по мере происходящих в среде изменений.

1.5. «Деревья» в целеполагании

Анализ процессов формулирования глобальной цели в сложной системе показывает, что эта цель возникает в сознании руководителя или коллектива как некоторая, достаточно «размытая» область. На любом уровне цель возникает вначале в виде «образа» цели. При этом достичь одинакового понимания общей цели всеми исполнителями, по-видимому, принципиально невозможно без ее детализации в виде упорядоченного или неупорядоченного набора взаимосвязанных подцелей, которые делают ее понятной и более конкретной для разных исполнителей. Таким образом, задача формулирования общей цели в сложных системах должна быть сведена к задаче структуризации цели. Для облегчения задачи целеполагания применяется декомпозиция (детализация) цели в виде неупорядоченного или упорядоченного набора взаимосвязанных подцелей (структуризация), которые делают

ее более конкретной и понятной для всех участников процесса целеобразования. Для наименования подцелей в конкретных приложениях используют разные названия: направления, программы, задачи, а начиная с некоторого уровня — функции.

Поскольку любая цель обладает двойственностью, являясь одновременно и целью, и средством для достижения вышестоящей цели, то описание отношений между целями и средствами может быть отражено специальной схемой (графом), носящей название «дерево целей». Термин был введен в 1957 г. У. Черчменом, который предложил метод дерева целей в связи с проблемами принятия решений в промышленности [3]. Эта схема была с успехом использована в ряде крупных военных и промышленных программ в США, а в настоящее время является повседневным инструментом практически любого современного менеджера.

При использовании метода «дерево целей» в качестве средства принятия решений часто применяют термин *«дерево решений»*. При применении метода для выявления и уточнения функций системы управления говорят о *«дереве целей и функций»*. При структуризации тематики научно-исследовательской организации пользуются термином *«дерево проблемы»*, а при разработке прогнозов — *«дерево направлений развития (прогнозирования развития)»* или *«прогнозный граф»*.

Для системного анализа организаций с целью их реорганизации или автоматизации можно предложить следующие виды «деревьев»:

а) «дерево целей» объекта, которое можно определить как «дерево желаний»;

б) «дерево проблем» объекта (или диаграмма Исикавы);

в) «дерево целей» субъекта;

г) «дерево стратегий» или «дерево решений».

Первоначально строится «дерево целей» с позиции объекта, т. е. «дерево желаний». В нем отражаются главные желания, как правило, связанные с существованием и развитием объекта. Далее они декомпозируются на более детальные цели, удовлетворение которых приведет к удовлетворению главных.

На следующем этапе анализируется проблемность удовлетворения потребностей и желаний объекта и выделяется ключевая проблема (проблемы), которая декомпозируется в виде «дерева проблем».

Далее строится «дерево целей» с позиции субъекта как позитивное отражение «дерева проблем».

И наконец, строится «дерево стратегий», в котором «дерево целей» дополняется вариантами (стратегиями) решения выявленных проблем.

До окончательной формулировки целей необходимо решить два вопроса. Во-первых, рассмотреть проблематику — множество проблем, которые порождаются решением наших проблем. Это может потребовать корректировки намеченных целей. Во-вторых, необходим аналитический, а чаще всего экспертный анализ для выбора альтернатив решения проблем.

После выбора стратегий формулируются задачи (функции) и назначаются их исполнители.

1.5.1. Построение «дерева целей (желаний)»

Сначала формируется основная цель (желание), формулировка которой, как правило, имеет следующую структуру: глагол — действие, пояснение, объект — цель. Построение «дерева целей» начинается с процедуры структуризации, расчленения основной цели на составные элементы, называемые подцелями, каждая из которых является средством, направлением или этапом ее достижения. Затем каждая из подцелей в свою очередь рассматривается как цель и расчленяется на компоненты. Если все эти элементы представить графически, то получится так называемое «дерево целей», обращенное кроной вниз. Деление прекращается, когда подцель становится неделимой и объективно измеримой.

Построение «дерева» происходит по следующим принципам:

- если очередная подцель является **средством** для предыдущей, то она опускается на уровень ниже первой;
- если она является **целью**, то поднимается на один уровень вверх;
- если она не является ни целью, ни средством, то остается на том же уровне иерархии.

Для проверки полноты и внутренней непротиворечивости дерева целей существуют четыре простых правила [8].

1. При чтении сверху вниз подцель должна отвечать на вопрос: что нужно сделать, чтобы реализовать цель предыдущего уровня?

2. При чтении снизу вверх цель более высокого уровня должна отвечать на вопрос: для чего необходима цель, лежащая непосредственно под ней?

3. При чтении подцелей, необходимых для достижения одной цели, следует уточнить, все ли подцели действительно необходимы для ее достижения.

4. При чтении подцелей, необходимых для достижения одной цели, следует уточнить, какие еще подцели этого уровня необходимы для достижения цели.

Пример. «Дерево целей» для коммерческого учебного центра, показанное на рис. 1.4.

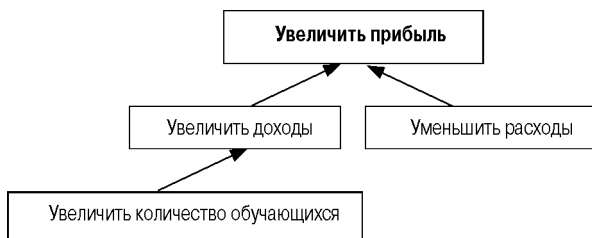


Рис. 1.4. «Дерево целей» для коммерческого учебного центра

1.5.2. Построение «дерева проблем»

Вначале выбирается и сжато формулируется одна (или несколько) из ключевых проблем достижения целей-желаний. А затем одна за другой формулируются другие проблемы, выстраиваемые в «дерево» по следующим принципам:

- если очередная проблема является *причиной* для предыдущей, то она опускается на уровень ниже первой;
- если она является *следствием*, то поднимается на один уровень вверх;
- если она не является ни причиной, ни следствием, то остается на том же уровне иерархии.

Пример. «Дерево проблем» для коммерческого учебного центра, показанное на рис. 1.5.

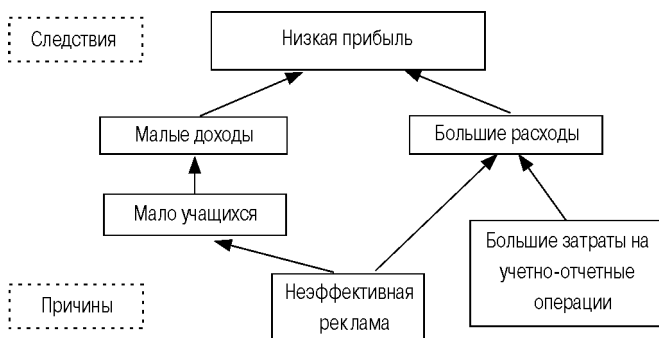


Рис. 1.5. «Дерево проблем» для коммерческого учебного центра

Альтернативой «дерева проблем» является диаграмма Исикавы (Ишикавы), представляющая собой «дерево проблем», повернутое на 90° [6].

Пример. Диаграмма Исикавы для коммерческого учебного центра, показанная на рис. 1.6.

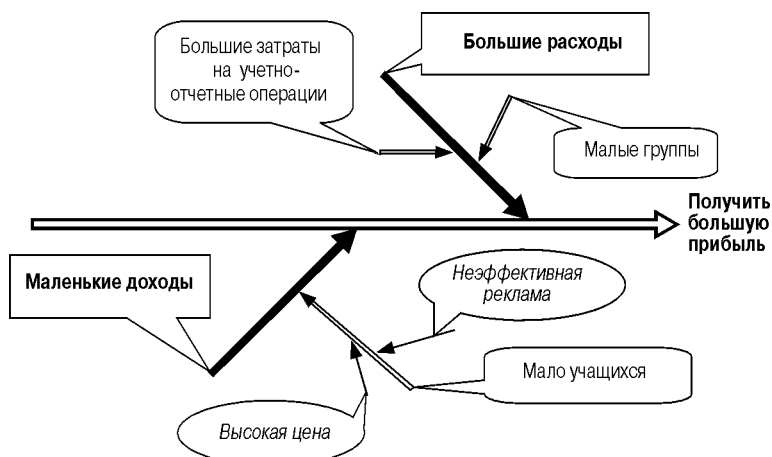


Рис. 1.6. Диаграмма Исикавы для коммерческого учебного центра

1.5.3. Построение «дерева целей» субъекта и «дерева стратегий»

При анализе путей решения имеющихся проблем строится «дерево целей», которое является позитивным зеркальным отражением негативного дерева проблем. И к этому дереву в качестве «веток» пристраиваем возможные стратегии решения проблем (достижения целей).

Пример. «Дерево целей» с вариантами стратегий для коммерческого учебного центра, показанное на рис. 1.7.

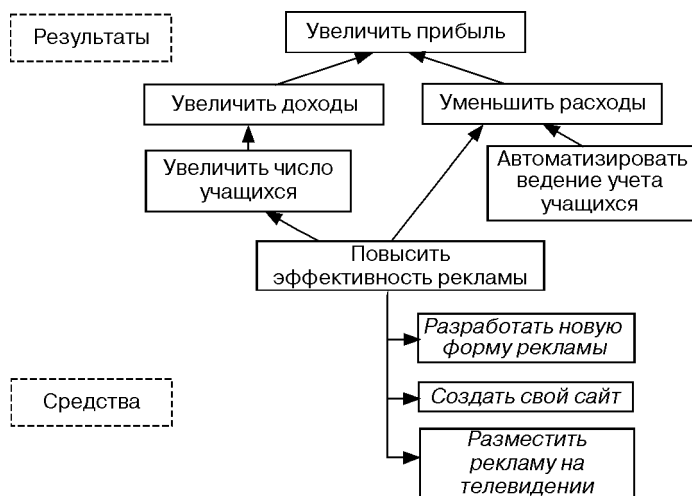


Рис. 1.7. «Дерево целей» с вариантами стратегий для коммерческого учебного центра

Далее следует провести анализ и выбор стратегий (средств достижения целей), для чего можно построить соответствующую таблицу.

Пример. Таблица стратегий:

Цель	Стратегия	Преимущества	Недостатки
Уменьшить расходы	1. Переехать в помещение меньшей площади	Ощутимое сокращение расходов	Тесное помещение плохо скажется на имидже компании, что приведет к падению прибыли
	2. Переехать в менее престижную часть города	Ощутимое сокращение расходов	Плохо скажется на имидже компании, что приведет к падению прибыли
	3. Автоматизировать ведение учета учащихся с последующим сокращением числа сотрудников компании	Улучшение качества обработки информации, улучшение культуры обслуживания	Большие начальные расходы

Резюме

1. Любая деятельность является целенаправленной.
2. Источник цели — потребность. При неудовлетворении потребности появляется желание, отсутствие очевидного пути достижения которого порождает проблему, и тогда появляется цель как нечто, что решит проблему.
3. Выбор цели сугубо субъективный. Если ставится или имеется цель, то всегда существует субъект целеполагания, точка зрения которого отражается в ней. Субъективность цели выражается, с одной стороны, знаниями и пониманием действительности того, кто ставит цель, а с другой — цель направлена на удовлетворение его конкретной жизненной потребности.
4. Следует различать цели с позиции субъекта и объекта. Цель с позиции субъекта определяет цель анализа, описания, проектирования (создания или реорганизации) и управления. Цель с позиции объекта определяет цель его функционирования (существования), которая может быть заложена при его создании либо формироваться внутри него.
5. Цель может быть конкретной и размытой. В последнем случае необходимо вводить критерии для оценки степени достижения цели.
6. Целеполагание сталкивается с рядом проблем, связанных с объективными и субъективными ограничениями, изменением целей со

временем, неопределенностью целеполагания, опасностями подмены целей средствами и смешением целей и др.

7. Прежде чем формулировать окончательную цель, необходимо провести исследование решаемой проблемы. В частности, следует расширить проблему до проблематики: определить и рассмотреть проблемы, существенно связанные с исследуемой, без учета которых она не может быть решена.

8. Правильно сформулированные цели должны быть конкретными, измеримыми, достижимыми, согласованными, приемлемыми и гибкими.

9. Существенную помощь при целеполагании оказывают «деревья» целей и проблем. При реорганизации или автоматизации объекта можно рекомендовать построение следующей цепочки «деревьев»: «дерево» целей (желаний) объекта, «дерево» проблем объекта, «дерево» целей субъекта. В последнем «дереве» рассматриваются возможные стратегии решения проблем.

Литература

1. Антонов А.В. Системный анализ. — М.: Высшая школа, 2004. — 453 с.
2. Визанский О. Требования к целям. — <http://www.inventech.ru/lib/strateg/strateg0051>.
3. Камионский С.А. Менеджмент в российском банке: опыт системного анализа и управления. — М.: Деловая библиотека Омскпромстройбанка, 1998. — 112 с.
4. Матвеев Л.А. Компьютерная поддержка решений. — СПб.: Изд-во «Специальная литература», 1998. — 472 с.
5. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.
6. Причинно-следственная диаграмма (диаграмма Исикавы) — <http://www.spc-consulting.ru/app/Isikava.htm#top>
7. Растригин Л.А., Граве П.С. Кибернетика как она есть. — М.: Молодая гвардия, 1975. — 208 с.
8. Чувакин Н. Дерево целей. — <http://www.nlpr.ru/texts/faqs/aimtree.shtml>.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятий:
 - а) «объект» и «субъект»;
 - б) «потребность» и «желание»;
 - в) «проблема» и «цель».
2. Чем различаются понятия «желание» и «цель»?
3. Что понимается под точкой зрения в целеполагании?
4. Чем различаются цель-результат и цель-направление?
5. Поясните необходимость использования критериев.
6. Поясните причины многокритериальности.
7. Что понимается в системном анализе под целью с позиции субъекта?
8. Что понимается в системном анализе под целью с позиции объекта?
9. Что понимается под проблематикой?

10. Чьи интересы могут затрагиваться при изменении организации?
11. Приведите пример матрицы проблематики.
12. Перечислите основные особенности целей.
13. Раскройте суть особенности субъективности целеполагания.
14. Поясните опасность того, что цель всегда несет в себе элементы неопределенности.
15. Перечислите основные требования к цели.
16. Перечислите основные проблемы целеполагания.
17. Укажите ограничения целеполагания:
 - а) субъективные;
 - б) объективные.
18. Раскройте суть:
 - а) подмены целей средствами;
 - б) влияния ценностей субъекта на целеполагание;
 - в) опасности смешения целей.
19. Почему необходимо строить «дерево целей»?
20. Перечислите принципы построения:
 - а) «дерева целей»;
 - б) «дерева проблем».
21. Чем отличается диаграмма Исикавы от классического «дерева проблем»?
22. Постройте таблицу стратегий для задачи выбора транспорта для поездки в отпуск.

Г Л А В А 2

Модели и моделирование

Исследуя объекты окружающего мира, мы вынуждены как-то отображать результаты исследования для того, чтобы, с одной стороны, представить их в виде, удобном для анализа, а с другой — для их хранения и передачи в пространстве или времени. Проектируя, создавая что-то новое, мы первоначально формируем некоторый образ этого нового. Управляя чем-либо, мы, как правило, пытаемся анализировать, к каким последствиям приведет управление. Перечисленные задачи требуют фиксации (представления) информации об объекте в виде некоторого образа (словесного, графического и т. п.).

В связи с этим в познавательной и практической деятельности человека большую, если не ведущую, роль играют модели и моделирование. Особенно незаменимо моделирование при работе со сложными объектами (в частности, экономическими). Все это делает моделирование важнейшим инструментом системного анализа.

2.1. Моделирование

Модель в широком понимании — это образ (в том числе условный или мысленный) какого-либо объекта или системы объектов, используемый при определенных условиях в качестве их «заместителя» или «представителя» [10].

☒ **Модель** — это упрощенное подобие объекта, которое воспроизводит интересующие нас свойства и характеристики объекта-оригинала или объекта проектирования.

Примеры. Моделью Земли служит глобус, а звездного неба — экран планетария. Чучело животного есть его модель, а фотография на паспорте или любой перечень паспортных данных — модель владельца паспорта [10].

Моделирование связано с выяснение или воспроизведением свойств какого-либо реального или создаваемого объекта, процесса или явления с помощью другого объекта, процесса или явления.

☑ **Моделирование** — это построение, совершенствование, изучение и применение моделей реально существующих или проектируемых объектов (процессов и явлений).

Почему мы прибегаем к использованию моделей вместо попыток «прямого взаимодействия с реальным миром»? Можно назвать три основные причины [6].

Первая причина — сложность реальных объектов. Число факторов, которые относятся к решаемой проблеме, выходит за пределы человеческих возможностей. Поэтому одним из выходов (а часто единственным) в сложившейся ситуации является упрощение ситуации с помощью моделей, в результате чего уменьшается разнообразие этих факторов до уровня восприимчивости специалиста.

Вторая причина — необходимость проведения экспериментов. На практике встречается много ситуаций, когда экспериментальное исследование объектов ограничено высокой стоимостью или вовсе невозможно (опасно, вредно, ограниченность науки и техники на современном этапе).

Третья причина — необходимость прогнозирования. Важное достоинство моделей состоит в том, что они позволяют «заглянуть в будущее», дать прогноз развития ситуации и определить возможные последствия принимаемых решений.

Среди других причин можно назвать следующие:

- исследуемый объект либо очень велик (модель Солнечной системы), либо очень мал (модель атома);
- процесс протекает очень быстро (модель двигателя внутреннего сгорания) или очень медленно (геологические модели);
- исследование объекта может привести к его разрушению (модель самолета, автомобиля).

2.1.1. Цели моделирования

Человек в своей деятельности обычно вынужден решать две задачи — *экспертную* и *конструктивную* [3].

В экспертной задаче на основании имеющейся информации описывается прошлое, настоящее и предсказывается будущее. Суть конструктивной задачи заключается в том, чтобы создать нечто с заданными свойствами.

Для решения экспертных задач применяют так называемые *описательные модели*, а для решения конструктивных — *нормативные*.

2.1.2. Описательное моделирование

Описательные модели (*дескриптивные, познавательные*) предназначены для описания свойств или поведения реальных (существующих) объектов. Они являются формой представления знаний о действительности.

Примеры. План города, отчет о деятельности фирмы, психологическая характеристика личности.

Можно назвать следующие цели описательного моделирования в зависимости от решаемых задач:

- *изучение объекта* (научные исследования) — наиболее полно и точно отразить свойства объекта;
- *управление* — наиболее точно отразить свойства объекта в рабочем диапазоне изменения его параметров;
- *прогнозирование* — построить модель, способную наиболее точно прогнозировать поведение объекта в будущем;
- *обучение* — отразить в модели изучаемые свойства объекта.

Построение описательной модели происходит по следующей схеме: *наблюдение, кодирование, фиксация* (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Последовательность построения описательной модели

Модель объекта можно построить, только наблюдая за ним. То, что мы наблюдаем, необходимо закодировать либо с помощью слов, либо символов, в частности, математических, либо графических образов, либо в виде физических предметов, процессов или явлений. И наконец, закодированные результаты наблюдения надо зафиксировать в виде модели.

Отражение свойств объекта в модели не является полным в силу разных причин: особенностей восприятия, наличия и точности измерительных приборов, потребности и, наконец, психического состояния субъекта. Если обозначить полную информацию об объекте через I_0 , а воспринимаемую информацию — $I_{\text{в}}$, то отражение математически можно сформулировать следующим образом:

$$I_{\text{в}} = F(I_0),$$

где $I_{\text{в}} \subset I_0$, или в линейном приближении (рис. 2.2):

$$I_{\text{в}} = k_{\text{с}} k_{\text{и}} k_{\text{ц}} k_{\text{п}} I_0,$$

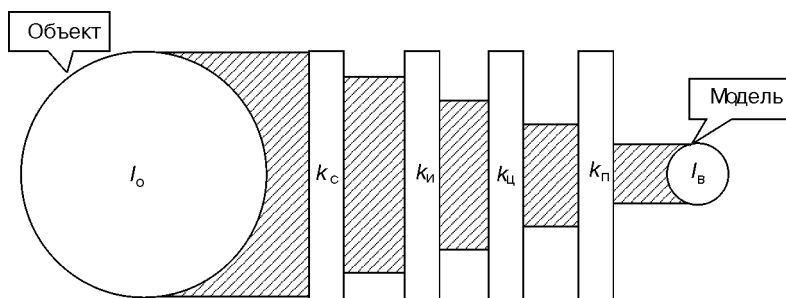


Рис. 2.2. Фильтрация информации об объекте

где k_c — информационная проницаемость среды — свойство среды по передаче информации от объекта к субъекту ($0 \leq k_c \leq 1$);

$k_{и}$ — коэффициент измерительной способности (вооруженности) субъекта — способность субъекта воспринимать (измерять) информацию ($0 < k_{и} < 1$);

$k_{ц}$ — целевая избирательность субъекта — связана с потребностью в конкретных свойствах объекта ($0 < k_{ц} < 1$);

$k_{п}$ — психологическая избирательность субъекта — связана с его психологическим состоянием ($0 < k_{п} \leq 1$).

Хотелось бы обратить внимание на субъективный характер моделей. Во все, что ни делает человек, в том числе и построение моделей, он вкладывает свою точку зрения. Это, в частности, может привести к тому, что мы принимаем свою точку зрения за единственную, а карту местности — за саму местность, которую она представляет.

Существуют следующие субъективные факторы, влияющие на качество создаваемых моделей [8].

Избирательность. Модель строится на основании наблюдений за объектом, но человек замечает свойства объекта избирательно. На это влияют образование, мировоззрение, опыт, а также настроение, чувства, заботы и общее самочувствие. В результате формируется модель, не отвечающая целям моделирования.

Конструирование — обратный аналог избирательности: мы начинаем видеть то, чего нет. Мы заполняем пробелы в информации о мире, чтобы он приобрел некий смысл и предстал перед нами в том виде, каким, по нашему мнению, он должен быть. Длительная эволюция воспитала нас дополнять увиденные фрагменты до полного образа: если мы видим из-за дерева голову волка, то мысленно дорисовываем его туловище и хвост. Поэтому когда при исследовании объекта мы получаем неполную информацию о нем, то невольно заполняем информационные «пробелы», исходя из своего опыта. В результате можем получить модель, не адекватную объекту.

Искажение. Искажение проявляется в том, что мы строим модели окружающего мира, выделяя одни его составляющие за счет замалчивания других. В частности, искажение лежит в основе творческих способностей (поэта, художника, композитора) и некоторых болезней, например паранойи.

Обобщения. Пользуясь обобщением, мы создаем мысленные модели, взяв за основу один случай и обобщив его на все возможные случаи. Обобщение является основой статистических выводов, но при условии так называемой репрезентативной (представительной) выборки ситуаций. Опасность обобщения состоит в том, что, взяв какую-либо ситуацию, человек расценивает ее как типичную и распространяет извлеченные из нее выводы на все сходные, по его мнению, ситуации (что, в частности, и является основой суеверия).

Таким образом, не все свойства объекта нам доступны из-за свойств окружающей среды, а из доступных — не все мы можем измерить или оценить. Из тех, что можем измерить, не все нам необходимо. Из необходимых свойств мы не все из них адекватно воспринимаем из-за психического состояния (невнимательности, субъективного предпочтения, страха и т. п.).

На основании воспринимаемой информации об объекте I_b и формируется его образ, называемый *моделью*.

В заключение хотелось бы заметить, что для моделирования свойственны некоторые парадоксы [10]. Поскольку к моделированию мы прибегаем из-за сложности изучаемого объекта, то *модель заведомо проще оригинала*. Целевая избирательность отсекает несущественные, на наш взгляд (!), качества объекта. Однако в процессе исследования никогда нет 100%-ной уверенности в том, что несущественные качества действительно являются несущественными с точки зрения конкретной исследовательской задачи, поэтому есть угроза «с водой выплеснуть ребенка».

Другой парадокс, который можно назвать парадоксом «одноразовой посуды», связан с тем, что *каждая модель создается под определенную исследовательскую задачу и не всегда применима к решению других*, какой бы привлекательной модель ни была. Распространенный в науке перенос моделей с одной задачи на другую далеко не всегда оправдан и обоснован.

2.1.3. Нормативное моделирование

Моделировать можно не только то, что существует, но и то, чего еще нет. *Нормативные модели (прескриптивные, прагматические)* предназначены для указания целей деятельности и определенного порядка (алгоритма) действий для их достижения.

☑ **Цель** — образ желаемого будущего, т. е. модель состояния, на реализацию которого и направлена деятельность [9].

☑ **Алгоритм** — образ (модель) будущей деятельности [9].

При нормативном моделировании обычно не используют слово «модель» — чаще говорят «проект», «план».

Примеры. Проекты машин, зданий; планы застройки; законы; уставы организаций и должностные инструкции, бизнес-планы, программы действий, управленческие решения.

* * *

Подведем итог. *Описательные модели* отражают существующее, их развитие направлено на *приближение модели к реальности* (в структурном системном анализе [5] такая модель называется *моделью «Как есть»* — «As-Is»).

Нормативные модели показывают не существующее, но *желаемое*. Здесь решается задача *приближения реальности к модели*, поскольку модель играет роль стандарта или образца, под который «подгоняются» как сама деятельность, так и ее результаты (в структурном системном анализе она называется *моделью «Как должно быть»* — «To-Be»).

2.2. Классификация моделей

Выше была рассмотрена классификация моделей по *целевому назначению* (см. разд. 2.1.1). Кроме того, познавательные и прагматические модели можно классифицировать по *характеру выполняемых функций, форме, зависимости объекта моделирования от времени*.

2.2.1. Функциональное назначение моделей

Можно выделить следующие функции, выполняемые моделями [10]:

- *исследовательская* — применяется в научном познании;
- *практическая* — применяется в практической деятельности (проектировании, управлении и т. п.);
- *тренинговая* — используется для тренировки практических умений и навыков специалистов в различных областях;
- *обучения* — для формирования у обучаемых знаний, умений и навыков.

2.2.2. Формы представления моделей

Модели по *форме* бывают:

- *физические* — материальные объекты, имеющие сходство с оригиналом (модель самолета, которая исследуется в аэродинамической трубе; модель плотины);

- *словесные (вербальные)* — словесное описание чего-либо (внешность человека, принцип работы устройства, структура предприятия);
- *графические* — описание в виде графических изображений (схемы, карты, графики, диаграммы);
- *знаковые* — описание в виде символов и знаков (дорожные знаки, условные обозначения на схемах, математические соотношения). Разновидностью знаковых моделей являются математические модели.

☒ **Математическая модель** (или *математическое описание*) — это система математических соотношений, описывающих изучаемый процесс или явление.

Примеры математических моделей: $X > 5$; $U = IR$; $A \supset B$; $34y + 5x = 0$.

* * *

Следует обратить внимание на то, что естественные языки, на которых говорят различные народы, являются своеобразными моделями мира [4]. Язык не только обозначает объекты, воспринимаемые, представляемые или мыслимые, но он организует наше восприятие, наши представления и наше понимание мира. Говоря об объектах, процессах, явлениях мира (внешнего или внутреннего, реального или воображаемого, воспринимаемого или мыслимого), мы пропускаем его через «сита» языка. Организующая роль языка сразу становится явной, когда обнаруживается, что разные языки по-разному организуют вселенную и, соответственно, ее восприятие, представление и понимание.

Язык отражает в своей структуре определенные действительные свойства и отношения реальности. Он устроен так, как устроен реальный мир. Но мир бесконечно богаче любой своей ограниченной модели, в том числе и языка. Структура действительности имеет многие всеобщие свойства и отношения. Язык отражает в своих лингвистических значениях только некоторые из этих свойств и отношений. И человек волей-неволей начинает воспринимать и представлять реальность преимущественно в рамках этих категорий.

Язык конкретной предметной области (ее тезаурус) также является моделью этой предметной области. Исследование этого языка стало частью системных исследований, что нашло свое воплощение в *онтологическом анализе* [2].

2.3. Виды моделирования

Моделирование широко распространено, поэтому достаточно полная классификация возможных видов моделирования крайне за-

труднительна хотя бы в силу многозначности понятия «модель», широко используемого не только в науке и технике, но и, например, в искусстве. Применительно к естественно-техническим, социально-экономическим и другим наукам принято различать следующие виды моделирования:

- *концептуальное моделирование*, при котором с помощью некоторых специальных знаков, символов, операций над ними или с помощью естественного или искусственного языков истолковывается основная мысль (концепция) относительно исследуемого объекта;
- *интуитивное моделирование*, которое сводится к мысленному эксперименту на основе практического опыта работников (широко применяется в экономике);
- *физическое моделирование*, при котором модель и моделируемый объект представляют собой реальные объекты или процессы единой или различной физической природы, причем между процессами в объекте-оригинале и в модели выполняются некоторые соотношения подобия, вытекающие из схожести физических явлений;
- *структурно-функциональное моделирование*, при котором моделями являются схемы (блок-схемы), графики, чертежи, диаграммы, таблицы, рисунки, дополненные специальными правилами их объединения и преобразования;
- *математическое (логико-математическое) моделирование*, при котором моделирование, включая построение модели, осуществляется средствами математики и логики;
- *имитационное (программное) моделирование*, при котором логико-математическая модель исследуемого объекта представляет собой алгоритм функционирования объекта, реализованный в виде программного комплекса для компьютера.

Перечисленные выше виды моделирования не являются взаимоисключающими и могут применяться при исследовании сложных объектов либо одновременно, либо в некоторой комбинации. Отдельно следует сказать о *компьютерном моделировании*, являющемся развитием имитационного моделирования.

Компьютерное моделирование. Первоначально под компьютерным моделированием (или, как говорили, моделированием на ЭВМ) понималось лишь имитационное моделирование. Исторически случилось так, что первые работы по компьютерному моделированию были связаны с физикой. Затем разработанные подходы распространились на задачи химии, электроэнергетики, биологии и некоторые

другие дисциплины, причем схемы моделирования не слишком отличались друг от друга. Этот вид моделирования все еще широко распространен и в научных, и прикладных исследованиях.

Однако сегодня понятие «компьютерное моделирование» чаще связывают не с фундаментальными дисциплинами, а в первую очередь с системным анализом. Следует заметить, что компьютер может быть весьма полезен при всех видах моделирования (за исключением физического моделирования, где компьютер тоже может использоваться, но, скорее, для целей управления процессом моделирования). Изменилось и понятие *компьютерной модели*. Раньше под компьютерной моделью чаще всего понимали *имитационную модель* — отдельную программу, совокупность программ или программный комплекс, позволяющий с помощью последовательности вычислений и графического отображения их результатов воспроизводить (имитировать) процессы функционирования объекта. В настоящее время под компьютерной моделью чаще всего понимают *структурно-функциональную модель* — условный образ объекта, описанный с помощью взаимосвязанных компьютерных таблиц, блок-схем, диаграмм, графиков, рисунков, анимационных фрагментов, гипертекстов и отображающий структуру и взаимосвязи между элементами объекта*.

Таким образом, мы видим, что понятие «компьютерное моделирование» значительно шире традиционного понятия «моделирование на ЭВМ» и нуждается в уточнении, учитывающем сегодняшние реалии.

☒ **Компьютерное моделирование** — это метод решения задачи анализа или синтеза объекта на основе использования его компьютерной модели.

Суть компьютерного моделирования заключена в получении количественных и качественных результатов по имеющейся модели. Качественные выводы, получаемые по результатам анализа, позволяют обнаружить неизвестные ранее свойства объекта. Количественные выводы в основном носят характер прогноза некоторых будущих или объяснения прошлых значений переменных, характеризующих систему.

Предметом компьютерного моделирования могут быть: экономическая деятельность фирмы или банка, промышленное предприятие, информационно-вычислительная сеть, технологический процесс, любой реальный объект или процесс, например процесс инфляции. Цели компьютерного моделирования могут быть различными, однако

* Примерами новых направлений в компьютерном моделировании являются так называемые CASE-технологии, используемые для структурного системного анализа и объектного моделирования [1, 5].

наиболее часто моделирование является, как уже отмечалось ранее, центральной процедурой системного анализа.

Резюме

1. Необходимость фиксации информации об объекте исследования или проектирования для хранения и передачи в пространстве или времени приводит к задаче моделирования.

2. Моделирование направлено на построение, совершенствование, изучение и применение моделей реально существующих или проектируемых объектов.

3. Модель представляет собой упрощенное подобие объекта, которое воспроизводит только интересующие нас свойства.

4. Необходимость моделирования связана со многими причинами, основные из которых: сложность изучаемых объектов, необходимость экспериментировать и прогнозировать, несоответствие пространственных и временных масштабов объекта и наших возможностей.

5. В практической деятельности применяются два основных вида моделей: *описательные* — для описания свойств реально существующих объектов и *нормативные* — в задачах проектирования новых объектов.

6. Описательные модели применяются для научных исследований, управления, прогнозирования и обучения.

7. При описательном моделировании, в силу объективных (ограниченной информационной проницаемости среды и ограниченной измерительной возможности) и субъективных (в силу целевой и психологической избирательности) ограничений, происходит лишь частичное отражение информации об объекте в модели. Исходя из этого, модель всегда проще оригинала и есть опасность, что в модели не отражены важные для целевой задачи свойства.

8. Психологическая избирательность связана с такими факторами, как избирательность, конструирование, искажение и обобщение.

9. Основные функции моделей: исследовательская, практическая, тренинговая и учебная.

10. По форме модели бывают: физические, вербальные, графические и знаковые. При этом математические модели являются разновидностью знаковых.

11. Из основных видов моделирования, применяемых в естественнотехнических, социальноэкономических и других науках, различают: концептуальное, интуитивное, физическое, структурнофункциональное, логикоматематическое и имитационное (программное). Особое место сегодня занимает компьютерное моделирование.

Литература

1. Вендров А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. — М.: Финансы и статистика, 1998. — 176 с.
2. Верников Г. Стандарт онтологического исследования IDEF 5. — http://www.consulting.ru/main/soft/texts/m5/056_idef.htm.
3. Жилин Д.М. Теория систем: опыт построения курса. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 184 с.
4. Ительсон Л.Б. Лекции по общей психологии. — М.: ООО «Издательство АСТ», 2000. — 896 с.
5. Калянов Г.Н. CASE-технологии. Консалтинг при автоматизации бизнес-процессов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2000. — 320 с.
6. Кулагин О.А. Принятие решений в организациях. — СПб.: Изд-во «Сентябрь», 2001. — 148 с.
7. Модель // БСЭ. Изд. 3-е. — М.: Большая советская энциклопедия, 1974. Т. 16. С. 399–400.
8. О'Конор Д., Мак-Дермот Я. Искусство системного мышления. Творческий подход к решению проблем и его основные стратегии. — Киев: София, 2001. — 304 с.
9. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.
10. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. — Киев: МАУП, 2003. — 368 с.

Контрольные вопросы и задания

1. По каким причинам специалисты прибегают к моделированию?
2. Дайте определение понятия «моделирование».
3. Дайте определение понятия «модель».
4. Приведите основные причины, объясняющие использование моделей вместо попыток «прямого взаимодействия с реальным миром».
5. Укажите стадии построения модели.
6. Объясните причины неполного отражения свойств объекта в модели.
7. Укажите субъективные факторы, влияющие на качество создаваемых моделей.
8. В чем заключается угроза того, что модель проще оригинала?
9. Почему модель можно сравнить с одноразовой посудой?
10. Как разделяются модели по целевому назначению?
11. Укажите цели построения познавательных моделей.
12. Укажите назначение моделей: а) дескриптивных; б) нормативных.
13. В каком случае объект приближается к модели?
14. Укажите главные функции, которые могут выполнять модели.
15. Перечислите формы представления моделей.
16. Дайте определение математической модели и приведите примеры таких моделей.
17. Перечислите виды моделирования.
18. Определите суть компьютерного моделирования.

Г Л А В А 3

Измерительные шкалы

В основе любого наблюдения и анализа лежат *измерения*.

✓ **Измерение** — это алгоритмическая операция, которая данному наблюдаемому состоянию объекта ставит в соответствие определенное обозначение: число, номер или символ [4].

Обозначим через x_i , $i = 1, \dots, t$, наблюдаемое состояние (свойство) объекта, а через y_i , $i = 1, \dots, t$, — обозначение для этого свойства. Чем теснее соответствие между состояниями и их обозначениями, тем больше информации можно извлечь в результате обработки данных. Менее очевидно, что степень этого соответствия зависит не только от организации измерений (т. е. от экспериментатора), но и от природы исследуемого явления, и что сама степень соответствия в свою очередь определяет допустимые (и недопустимые) способы обработки данных!

✓ **Множество обозначений, используемых для регистрации состояний наблюдаемого объекта, называется *измерительной шкалой***.

Измерительные шкалы в зависимости от допустимых на них операций различаются по их силе. Самые слабые — номинальные шкалы, а самые сильные — абсолютные [5].

Выделяют три основных атрибута измерительных шкал, наличие или отсутствие которых определяет принадлежность шкалы к той или иной категории [3]:

1) *упорядоченность* данных означает, что один пункт шкалы, соответствующий измеряемому свойству, больше, меньше или равен другому пункту;

2) *интервальность* пунктов шкалы означает, что интервал между любой парой чисел, соответствующих измеряемым свойствам, больше, меньше или равен интервалу между другой парой чисел;

3) *нулевая точка* (или точка отсчета) означает, что набор чисел, соответствующих измеряемым свойствам, имеет точку отсчета,

обозначаемую за ноль, что соответствует полному отсутствию измеряемого свойства.

Кроме того, выделяют следующие группы:

— неметрические или качественные шкалы, в которых отсутствуют единицы измерений (номинальная и порядковая шкалы);

— количественные или метрические (шкала интервалов, шкала отношений и абсолютная шкала).

3.1. Шкалы наименований

Шкала наименований (*номинальная* или *классификационная*) представляет собой конечный набор обозначений *для никак не связанных между собой состояний (свойств) объекта* (рис. 3.1). Здесь отсутствуют все главные атрибуты измерительных шкал, а именно упорядоченность, интервальность, нулевая точка [3].

Измерение будет состоять в том, чтобы, проведя эксперимент над объектом, определить принадлежность результата к тому или иному состоянию и записать это с помощью символа (набора символов), обозначающего данное состояние.

Это самая простая шкала из тех, что могут рассматриваться как измерительные, хотя фактически эта шкала не ассоциируется с измерением и не связана с понятием «величина» [3]. Она используется только с целью отличить один объект от другого.

Если классифицируются *дискретные* по своей природе объекты и явления, то естественнее всего использовать шкалу наименований.

Примеры. Для обозначения в номинальной шкале могут быть использованы [4]:

- слова естественного языка (например, географические названия, собственные имена людей и т. д.);
- произвольные символы (гербы и флаги государств, эмблемы родов войск, всевозможные значки и т. д.);
- номера (регистрационные номера автомобилей, официальных документов, номера на майках спортсменов);
- их различные комбинации (например, почтовые адреса, экслибрисы личных библиотек, печати и пр.).

Однако необходимость классификации возникает и в тех случаях, когда классифицируемые состояния образуют *непрерывное множество* (или континуум). Задача сводится к предыдущей, если все множество разбить на конечное число подмножеств, искусственно образуя тем самым классы эквивалентности; тогда принадлежность состояния к какому-либо классу снова можно регистрировать в шкале наименований [4]. Однако условность введенных классов (не их

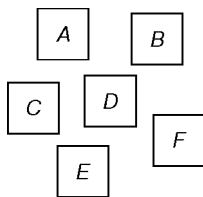


Рис. 3.1. Номинальная шкала

шкальных обозначений, а самих классов) рано или поздно проявится на практике.

Примеры [4] 1. Например, возникают трудности точного перевода с одного языка на другой при описании цветовых оттенков: в английском языке голубой, лазоревый и синий цвета не различаются.

2. Названия болезней также образуют шкалу наименований. Психиатр, ставя больному диагноз «шизофрения», «паранойя», «маниакальная депрессия» или «психоневроз», использует номинальную шкалу; и все же иногда врачи не зря вспоминают, что «нужно лечить больного, а не болезнь»: название болезни лишь обозначает класс, внутри которого на самом деле имеются различия, так как эквивалентность внутри класса носит условный характер.

Необходимо понимать, что обозначения классов — это только символы, даже если для этого использованы номера. С этими номерами нельзя обращаться как с числами — это только цифры.

Пример. Если у одного спортсмена на спине номер 1, а другого — 2, то никаких других выводов, кроме того, что это разные участники соревнований, делать нельзя: например, нельзя сказать, что второй «в два раза лучше».

При обработке экспериментальных данных, зафиксированных в номинальной шкале, непосредственно с самими данными можно выполнять только *операцию проверки их совпадения или несовпадения*.

3.2. Порядковые шкалы

Следующей по силе за номинальной шкалой идет порядковая шкала (*ординальная, ранговая*). Она применяется в тех случаях, когда наблюдаемый (измеряемый) признак состояния имеет природу, не только позволяющую отождествить состояния с одним из классов эквивалентности, но и дающую возможность в каком-то отношении сравнивать разные классы [4].

Порядковая шкала не имеет определенной количественной меры. При этом присутствует упорядоченность, но отсутствуют атрибуты интервальности и нулевой точки [3].

Единственными типами отношений между неколичественными значениями шкалы могут быть:

- а) равенство одинаковых значений порядковых переменных величин, соответствующих объектам одной категории;
- б) неравенство разных значений переменных величин, соответствующих объектам одной категории;
- в) отношения «больше» или «меньше» между разными значениями переменных величин, соответствующих объектам одной категории.

Измерение в шкале порядка может применяться, например, в следующих ситуациях [5]:

- когда необходимо упорядочить объекты во времени или пространстве. Это ситуация, когда интересуются не сравнением степени

выраженности какого-либо их качества, а лишь взаимным пространственным или временным расположением этих объектов;

- когда нужно упорядочить объекты в соответствии с каким-либо качеством, но при этом не требуется производить его точное измерение;
- когда какое-либо качество в принципе измеримо, но в настоящий момент не может быть измерено по причинам практического или теоретического характера.

3.2.1. Типовые порядковые шкалы

Обозначив такие классы символами и установив между этими символами отношения порядка, мы получим *шкалу простого порядка* (рис. 3.2).

$$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$$

Рис. 3.2. Порядковая шкала

Примеры. Нумерация очередности, воинские звания, призовые места в конкурсе, социально-экономический статус («низший класс», «средний класс», «высший класс»).

Разновидностью шкалы простого порядка являются *оппозиционные шкалы* [2]. Они образуются из пар антонимов (например, *сильный-слабый*), стоящих на разных концах шкалы, где за середину берется позиция, соответствующая среднему значению наблюдаемой сущности. Как правило, остальные позиции никак не шкалируются.

Иногда оказывается, что не каждую пару классов можно упорядочить по предпочтению: некоторые пары считаются равными — одновременно $A \geq B$ и $B \geq A$, т. е. $A = B$. Шкала, соответствующая такому случаю, называется *шкалой слабого порядка*.

Иная ситуация возникает, когда имеются пары классов, несравнимые между собой, т. е. ни $A \leq B$, ни $B \leq A$. В таком случае говорят о *шкале частичного порядка*. Шкалы частичного порядка часто возникают в социологических исследованиях субъективных предпочтений. Например, при изучении покупательского спроса субъект часто не в состоянии оценить, какой именно из двух разнородных товаров ему больше нравится (например, клетчатые носки или фруктовые консервы, велосипед или магнитофон и т. д.); затрудняется человек и упорядочить по предпочтению любимые занятия (чтение литературы, плавание, вкусная еда, слушание музыки).

Характерной особенностью порядковых шкал является то, что *отношение порядка ничего не говорит о дистанции между сравниваемыми классами*. Поэтому порядковые экспериментальные данные,

даже если они изображены цифрами, нельзя рассматривать как числа. Например, нельзя вычислять выборочное среднее порядковых измерений.

Пример. Рассматривается испытание умственных способностей, при котором измеряется время, затрачиваемое испытуемым на решение тестовой задачи. В таких экспериментах время хотя и измеряется в числовой шкале, но как мера интеллекта принадлежит порядковой шкале.

Порядковые шкалы определяются только для заданного набора сравниваемых объектов, у этих шкал нет общепринятого, а тем более абсолютного стандарта.

Примеры. 1. При определенных условиях правомерно выражение «первый в мире, второй в Европе» — просто чемпион мира занял второе место на всеевропейских соревнованиях.

2. Само расположение шкал является примером порядковой шкалы.

3.2.2. Модифицированные порядковые шкалы

Опыт работы с сильными числовыми шкалами и желание уменьшить относительность порядковых шкал, придать им хотя бы внешнюю независимость от измеряемых величин побуждают исследователей к различным модификациям, придающим порядковым шкалам некоторое (чаще всего кажущееся) усиление [4]. Кроме того, многие величины, измеряемые в порядковых (принципиально дискретных) шкалах, имеют действительный или мыслимый непрерывный характер, что порождает попытки модификации (усиления) таких шкал. При этом иногда с полученными данными начинают обращаться как с числами, что приводит к ошибкам, неправильным выводам и ре- шениям.

Примеры [4]. 1. В 1811 г. немецкий минералог Ф. Моос предложил установить стандартную шкалу твердости, постулируя только десять ее градаций. За эталоны приняты следующие минералы с возрастающей твердостью: 1 — тальк, 2 — гипс, 3 — кальций, 4 — флюорит, 5 — апатит, 6 — ортоклаз, 7 — кварц, 8 — топаз, 9 — корунд, 10 — алмаз. Из двух минералов тверже тот, который оставляет на другом царапины или вмятины при достаточно сильном соприкосновении. Однако номера градаций алмаза и апатита не дают основания утверждать, что алмаз в два раза тверже апатита.

2. В 1806 г. английский гидрограф и картограф адмирал Ф. Бофорт предложил балльную шкалу силы ветра, определяя ее по характеру волнения моря: 0 — штиль (безветрие), 4 — умеренный ветер, 6 — сильный ветер, 10 — шторм (буря), 12 — ураган.

3. В 1935 г. американский сейсмолог Ч. Рихтер предложил 12-балльную шкалу для оценки энергии сейсмических волн в зависимости от последствий прохождения их по данной территории. Затем он развил метод оценки силы землетрясения в эпицентре по его магнитуде (условная величина, характеризующая общую энергию упругих колебаний, вызванных землетрясением или взрывами) на поверхности земли и глубине очага.

3.3. Шкалы интервалов

Следующая по силе шкала — *шкала интервалов (интервальная шкала)*, которая в отличие от предыдущих, качественных, шкал уже является количественной шкалой. Эта шкала применяется, когда упорядочивание значений измерений можно выполнить настолько точно, что известны интервалы между любыми двумя из них (рис. 3.3) [4].

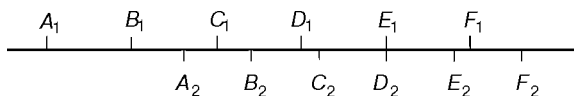


Рис. 3.3. Шкалы интервалов

В шкале интервалов присутствуют упорядоченность и интервальность, но нет нулевой точки [3]. Шкалы могут иметь произвольные начала отсчета, а связь между показаниями в таких шкалах является линейной:

$$y = ax + b,$$

где $a > 0$; $-\infty < b < \infty$.

Для этой шкалы справедливо следующее свойство:

$$\frac{x_1 - x_2}{x_3 - x_4} = \frac{y_1 - y_2}{y_3 - y_4} = \text{const}.$$

Примеры. 1. Температура, время, высота местности — величины, которые по физической природе либо не имеют абсолютного нуля, либо допускают свободу выбора в установлении начала отсчета.

2. Часто можно услышать фразу: «Высота ... над уровнем моря». Кого моря? Ведь уровень морей и океанов разный, да и меняется со временем. В России высоты точек земной поверхности отсчитывают от среднегололетнего уровня Балтийского моря в районе Кронштадта [6].

В этой шкале только интервалы имеют смысл настоящих чисел и только над интервалами следует выполнять арифметические операции. Если произвести арифметические операции над самими отсчетами по шкале, забыв об их относительности, то имеется риск получить бессмысленные результаты [4].

Пример. Нельзя сказать, что температура воды увеличилась в два раза при ее нагреве от 9 до 18° по шкале Цельсия, поскольку для тех, кто привык пользоваться шкалой Фаренгейта, это будет звучать весьма странно, так как в этой шкале температура воды в том же опыте изменится от 37 до 42°.

3.4. Шкалы разностей

Частным случаем интервальных шкал являются шкалы разностей: *циклические (периодические)* шкалы, шкалы, *инвариантные к*

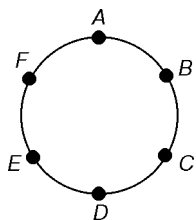


Рис. 3.4.

Шкала разностей

сдвигу. В такой шкале значение не изменяется при любом числе сдвигов (рис. 3.4):

$$y = x + nb,$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$.

Постоянная b называется *периодом* шкалы.

Примеры. В таких шкалах измеряется направление из одной точки (шкала компаса, роза ветров и т. д.), время суток (циферблат часов), фаза колебаний (в градусах или радианах) [4].

Однако соглашение о хотя и произвольном, но едином для нас начале отсчета шкалы позволяет использовать показания в этой шкале как числа, применять к ним арифметические действия (до тех пор, пока кто-нибудь не забудет об условности нуля, например при переходе на летнее время или обратно).

3.5. Шкалы отношений

Следующей по силе шкалой является шкала *отношений* (*подобий*). Измерения в такой шкале являются «полноправными» числами, с ними можно выполнять любые арифметические действия, здесь присутствуют все атрибуты измерительных шкал: упорядоченность, интервальность, нулевая точка. Величины, измеряемые в шкале отношений, имеют естественный, абсолютный нуль, хотя остается свобода в выборе единиц (рис. 3.5):

$$y = ax,$$

где $a \neq 0$.

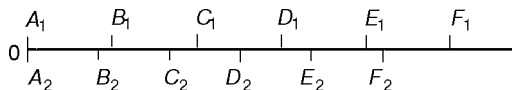


Рис. 3.5. Шкалы отношений

Примеры. Вес, длина, электрическое сопротивление, деньги — величины, природа которых соответствует шкале отношений.

Из значений шкалы отношений видно, во сколько раз свойство одного объекта превосходит такое же свойство другого объекта.

3.6. Абсолютная шкала

Абсолютная (метрическая) шкала имеет и абсолютный нуль ($b = 0$), и абсолютную единицу ($a = 1$). В качестве шкальных значений при измерении количества объектов используются натуральные числа, когда объекты представлены целыми единицами, и действительные числа, если кроме целых единиц присутствуют и части объектов [1].

Именно такими качествами обладает числовая ось, которую естественно назвать *абсолютной шкалой*.

Важной особенностью абсолютной шкалы по сравнению со всеми остальными является отвлеченность (безразмерность) и абсолютность ее единицы [4]. Указанная особенность позволяет производить над показаниями абсолютной шкалы такие операции, которые недопустимы для показаний других шкал, — употреблять эти показания в качестве показателя степени и аргумента логарифма.

Примеры. 1. Абсолютные шкалы применяются, например, для измерения количества объектов, предметов, событий, решений и т. п.

2. Примером абсолютной шкалы также является шкала температур по Кельвину.

Числовая ось используется как измерительная шкала в явной форме при счете предметов, а как вспомогательное средство присутствует во всех остальных шкалах.

3.7. Шкалирование

Шкалирование представляет собой отображение какого-либо свойства объекта или явления в числовом множестве.

Можно сказать, что чем сильнее шкала, в которой производятся измерения, тем больше сведений об изучаемом объекте, явлении, процессе дают измерения. Поэтому так естественно стремление каждого исследователя провести измерения в возможно более сильной шкале. Однако важно иметь в виду, что выбор шкалы измерения должен ориентироваться на объективные отношения, которым подчинена наблюдаемая величина, и лучше всего производить измерения в той шкале, которая максимально согласована с этими отношениями. Можно измерять и в шкале более слабой, чем согласованная (это приведет к потере части полезной информации), но применять более сильную шкалу опасно: полученные данные на самом деле не будут иметь той силы, на которую ориентируется их обработка.

Иногда же исследователи усиливают шкалы; типичный случай — «оцифровка» качественных шкал: классам в номинальной или порядковой шкале присваиваются номера, с которыми дальше «работают» как с числами. Если в этой обработке не выходят за пределы допустимых преобразований, то «оцифровка» — это просто перекодировка в более удобную (например, для ЭВМ) форму. Однако применение других операций сопряжено с заблуждениями и ошибками, так как свойства, навязываемые подобным образом, на самом деле не имеют места.

По мере развития соответствующей области знания тип шкалы может меняться.

Пример. Температура сначала измерялась по порядковой шкале (холоднее — теплее), затем — по интервальным шкалам (Цельсия, Фаренгейта, Реомюра), а после открытия абсолютного нуля температур — по абсолютной шкале (Кельвина).

Резюме

1. В основе любого наблюдения и анализа лежат измерения, которые представляют собой алгоритмические операции: данному наблюдаемому состоянию объекта ставится в соответствие определенное обозначение: число, номер или символ. Множество таких обозначений, используемых для регистрации состояний наблюдаемого объекта, называется измерительной шкалой.

2. В зависимости от допустимых операций на измерительных шкалах их различают по их силе.

3. Самой слабой шкалой является номинальная шкала, представляющая собой конечный набор обозначений для никак не связанных между собой состояний (свойств) объекта.

4. Следующей по силе считается порядковая шкала, дающая возможность в каком-то отношении сравнивать разные классы наблюдаемых состояний объекта, выстраивая их в определенном порядке. Различают шкалы простого, слабого и частичного порядка. Численные значения порядковых шкал не должны вводить в заблуждение относительно допустимости математических операций над ними.

5. Еще более сильная шкала — шкала интервалов, в которой, кроме упорядочивания обозначений, можно оценить интервал между ними и выполнять математические действия над этими интервалами. Разновидностью шкалы интервалов является шкала разностей, или циклическая.

6. Следующей по силе идет шкала отношений. Измерения в такой шкале являются «полноправными» числами, с ними можно выполнять любые арифметические действия (правда, при условии однотипности единиц измерения).

7. И, наконец, самая сильная шкала — абсолютная, с которой можно выполнять любые математические действия без каких-либо ограничений.

8. Отображение какого-либо свойства объекта или явления в числовом множестве называется шкалированием. Чем сильнее шкала, в которой производятся измерения, тем больше сведений об изучаемом объекте, явлении, процессе дают измерения. Однако применять более сильную шкалу опасно: полученные данные на самом деле не будут иметь той силы, на которую ориентируется их обработка. Лучше всего производить измерения в той шкале, которая максимально

согласована с объективными отношениями, которым подчинена наблюдаемая величина. Можно измерять и в шкале, более слабой, чем согласованная, но это приведет к потере части полезной информации.

Литература

1. *Анфилатов В.С.* и др. Системный анализ в управлении: Учебное пособие / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин; Под ред. А.А. Емельянова. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 368 с.
2. *Белов С.В.* Шкалы в системах мягких измерений // Труды II Межд. Конф. по мягким вычислениям и измерениям. — СПб., 25–28 мая 1999. Т. 1. С. 81—84.
3. *Дубина И.Н.* Математические основы проектирования и анализа результатов эмпирических социально-экономических и гуманитарных исследований: Дистанционно-очный учебный курс. Тема 1. Измерение и типы измерительных шкал // Образовательно-исследовательский центр Context. — <http://www.context.ru/files/theme1.pdf>.
4. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.
5. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. *В.Н. Волковой, В.Н. Козлова*. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.
6. Уровень моря // БСЭ. Изд. 3-е. — М.: Большая советская энциклопедия, 1977. Т. 27. С. 81.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятия «измерение».
2. Дайте определение измерительной шкалы.
3. Объясните суть номинальной шкалы.
4. Приведите примеры номинальных шкал:
 - а) для дискретных состояний;
 - б) для непрерывных множеств состояний.
5. Укажите допустимые операции в шкалах наименований.
6. Как номинальная шкала применяется для случая, когда классифицируемые состояния образуют континуум?
7. Объясните суть и особенности порядковой шкалы.
8. Укажите допустимые операции в порядковых шкалах.
9. Объясните суть модифицированных порядковых шкал.
10. Объясните суть ошибок при работе с модифицированными порядковыми шкалами.
11. Объясните суть шкалы интервалов.
12. Укажите допустимые операции в интервальных шкалах.
13. Объясните суть шкалы отношений.
14. Укажите допустимые операции в шкалах отношений.
15. Объясните суть циклической шкалы.
16. Укажите допустимые операции в абсолютных шкалах.
17. Покажите последствия применения шкал, не адекватных наблюдаемым явлениям.

Г Л А В А 4

Системы

Мы часто слышим слово «система». Существуют системы: кровообращения, общественно-политическая, солнечная, нервная, отопительная, уравнений, показателей, взглядов и убеждений, застройки микрорайона, финансов, управления и т. д.

Понятие «система» пока не имеет однозначного определения — можно найти более 40 определений (см. обзоры [5, 22, 25]). Не будем их все рассматривать, а остановимся только на тех, которые в наибольшей степени соответствуют нашему курсу.

Чем же отличается система от просто объекта исследования? Любой ли объект можно назвать системой?

Прежде чем говорить о первом определении, рассмотрим такие понятия, как «объект» и «предмет» исследования.

Объект исследования — это та реальность, которая изучается; **предмет исследования** формируется самим исследователем. В качестве предмета исследования берется какая-либо сторона объекта, интересующая исследователя.

Рассмотрим взаимодействие объекта и окружающей среды.

4.1. Связь объекта с окружающей средой

4.1.1. Окружающая среда объекта

Объект «погружен» в окружающую среду (ОС). Формально окружающую среду можно определить как «все, что не объект» (при этом с позиции объекта субъект также является частью ОС и наоборот). Дадим прагматичное определение:

☒ **Окружающая среда** — это совокупность объектов, которые окружают исследуемый объект и прямо или косвенно взаимодействуют с ним.

При системном исследовании организации большое внимание уделяется ее целевой среде.

☑ **Целевая среда организации** — это совокупность условий и факторов, действующих в непосредственном окружении организации и оказывающих прямое воздействие на установление целей и способов их реализации.

В целевую среду организации входят: потребители, поставщики ресурсов и технологий, конкуренты, государственные органы, налоговая инспекция, акционеры, кредиторы, профсоюзы, служба занятости (биржи труда), посреднические организации, профессиональные ассоциации и криминальные структуры. Все эти факторы являются факторами целевой среды, так как связаны с целями организации и средствами достижения этих целей.

Между ОС и объектом существует бесконечное множество взаимных связей, с помощью которых реализуется процесс взаимодействия среды и объекта. Будем считать, что связь (взаимодействие) объекта с внешней средой реализуется через некоторые условные точки — *входы и выходы* (входные и выходные координаты). На входы объекта поступают из ОС материальные, энергетические и информационные потоки, а объект выдает все это на выходы в преобразованном виде.

Упрощенно можно рассматривать взаимодействие ОС и объекта (рис. 4.1) как получение системой из окружающей среды различных ресурсов и передачу в ОС конечных продуктов деятельности (ПД).

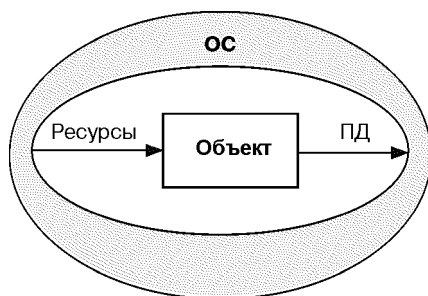


Рис. 4.1. Взаимоотношения объекта и окружающей среды

Пример. Для экономических объектов конечные продукты деятельности системы можно разделить, с одной стороны, на товары (вещественные, энергетические, информационные) и услуги (производственные, образовательные, медицинские и др.), а с другой — на отходы.

4.1.2. Кибернетическая модель объекта

С кибернетической точки зрения объект представляется *только преобразователем информации* (входной в выходную). При этом все материальные и энергетические потоки представляются их количественными характеристиками.

Объект, имеющий n входов $\{x_1, \dots, x_n\}$ и m выходов $\{y_1, \dots, y_m\}$, условно представляется кибернетической моделью или в векторном виде $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ и $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ (рис. 4.2, а и б соответственно).

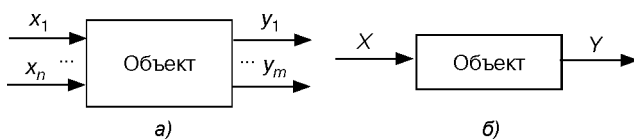


Рис. 4.2. Условное представление объекта кибернетической моделью (а) и в векторном виде (б)

Таким образом, объект в общем виде рассматривается как преобразователь входов в выходы.

4.1.3. Классификация входов и выходов объекта

Выше говорилось о рассмотрении объекта как некоторого преобразователя ресурсов в продукты деятельности. Но в реальности дело обстоит несколько сложнее. Действительно, у каждого преобразователя имеются ресурсы на входе и продукты деятельности на выходе. Но также имеются входные факторы, которые влияют (в отрицательном или положительном смысле) на процесс преобразования (функционирование объекта) и побочные продукты деятельности, которые, в лучшем случае, не нужны, а в худшем — оказывают негативное воздействие на окружающую среду и находящегося в ней потребителя продуктов.

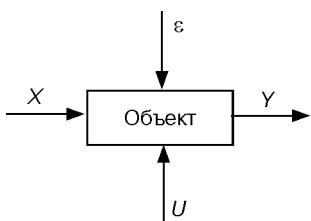


Рис. 4.3. Типы входов

В связи с этим в системном анализе представляет большой интерес классификация и анализ входов и выходов объекта. В отношении входов важно понять, какие из них могут контролироваться (т. е. их значения можно измерить в какой-либо шкале) и управляться (т. е. их значения могут изменяться в зависимости от необходимости).

Исходя из критериев контролируемости и управляемости входы условно разбивают на следующие типы (рис. 4.3):

- **возмущения** — *контролируемые* переменные, т. е. можно измерять их значения (будем обозначать вектор возмущений через X);
- **помехи**, или *шум*, — *неконтролируемые* переменные, если, например, для их измерения не существует соответствующих измерительных приборов или методик (будем обозначать вектор помех через ε);

- **управления** — *управляемые* переменные, т. е. можно изменять их значения; поскольку их изменение приводит к изменению выходов, то их можно считать и *управляющими* — изменяя их, можно влиять на работу объекта (будем обозначать вектор управляющих переменных через U).

Пример. Рассмотрим некоторый объект, который формирует температуру в комнате. Возмущением в этом случае будет температура на улице; неконтролируемым входом — температура воды в трубах отопления (она задается далеко в котельной, и мы не имеем возможности ее измерять); управляющим входом — мощность электрокамина.

При классификации выходов будем выделять так называемые *целевые выходы*, т. е. выходы, которые полезны потребителю (для создаваемых систем это те выходы, ради которых и создавалась система) либо соответствующи цели исследования.

Примеры. 1. Автомобиль создавался как средство быстрой доставки груза или пассажиров из одного пункта в другой (целевой выход — скорость передвижения), но помимо этого мы имеем загрязнение окружающей среды, шум, угрозу здоровью и жизни других участников движения.

2. Река является источником питьевой воды, воды для полива, транспортной магистралью, средством укрепления здоровья при купании и т. п., но в то же время она — причина наводнений и гибели людей при купании и т. д.

3. Полезными выходами компьютера являются скорость и точность вычисления, но если нас волнует шум вентилятора, который хотелось бы уменьшить, то целевым выходом будет именно уровень шума.

4.2. Объект и система

Первое определение системы очень близко к понятию «предмет исследования».

☒ **Система** — это упорядоченное представление об объекте исследования с точки зрения поставленной цели.

Примеры. 1. Предприятие является объектом исследования, а предметом исследования могут быть: финансовая система, система охраны труда, противопожарная система, технологическая система и т. д.

2. Объект исследования — автомобиль, но выделяются: система электропитания, тормозная система, система подачи топлива и т. д.

3. При исследовании человека рассматриваются системы: мышечная, зрительная, кровеносная, сердечно-сосудистая и т. д.

Отметим первое свойство систематизации, системного представления о рассматриваемом объекте — *наличие цели*. Цель как бы вычленяет, очерчивает в объекте систему — в нее войдет из объекта только то, что определяет свойства, необходимые для достижения цели. Если один и тот же объект может реализовать несколько целей, то относительно каждой он выступит как самостоятельная система.

Далее стоит обратить внимание на слово «представление», которое подчеркивает субъективный характер понятия «система», о чем

речь пойдет ниже. Кроме того, из данного определения вытекает близость понятий системы и модели. Можно сказать, что система есть вариант модельного представления объекта. С другой стороны, система может иметь разные по форме и по полноте представления модели.

Данное определение системы отражает только одну сторону этого сложного понятия, да и практически любое определение системы, встречающееся в литературе, является слишком узким или упрощенным. Далее, в разд. 4.4, будет дано уточняющее определение системы.

4.3. Выделение системы

Система, являясь отражением объекта, включена в окружающую среду, и одна из первых задач системного анализа — *выделение системы из окружающей среды*.

Для выделения системы необходимы [12]:

- *объект исследования*;
- *цель*, для реализации которой формируется система;
- *субъект наблюдения* («наблюдатель»), формирующий систему;
- *входные и выходные переменные*, отражающие взаимосвязь системы с окружающей средой.

Как видим, границы системы условны — они диктуются конкретной задачей исследования. Частным случаем выделения системы является определение ее через входы и выходы, т. е. фактически представление ее в виде «черного ящика».

Необходимо обратить внимание на субъективный характер понятия «система». *Система не существует объективно* — она такая, какой ее определил субъект наблюдения в соответствии с поставленной целью. Это связано, в частности, и с субъективностью целеформирования.

В связи с этим нельзя говорить об анализе предприятия как системы, не определив цели анализа. Ведь на предприятии можно выделить много систем: систему оплаты труда, систему техники безопасности, систему хранения материальных ценностей, финансовую систему, систему производства, систему снабжения и т. д. Так что же такое предприятие? Это система вышеназванных систем. Аналогично можно рассматривать человека как совокупность систем: можно говорить о нервной, мышечной, зрительной, кровеносной и других системах. Поэтому бессмысленное занятие — обследовать предприятие или человека вообще.

Примеры. 1. Пусть цель — совершенствование работы предприятия. Нужно ли нам знать фамилии работников и их должностные оклады? Нет, нам важно знать число наименований выпускаемой продукции, потребность в ней. Если же нам нужно проанализировать систему оплаты труда, тогда вышеназванная информация является необходимой.

2. Рассмотрим мясорубку. Один исследователь ставит задачу анализа механических процессов в мясорубке, и он формирует свое понятие системы: рычаг, шнек, рука. Другого интересует качество фарша, и он формирует другую систему: ножи, подача мяса.

4.4. Система как совокупность элементов

Слово «система» появилось в древней Греции 2000–2500 лет назад и означало сочетание, организм, устройство, организацию, строй, союз [11]. Исходя из этого рассмотрим второе, «внутреннее», определение системы [7].

☒ **Система** — это совокупность (множество) объектов и процессов, называемых элементами, взаимосвязанных и взаимодействующих между собой; они образуют единое целое, обладающее свойствами, не присущими составляющим его элементам, взятым в отдельности.

Следовательно, система должна состоять, по крайней мере, из двух элементов. Кроме того, каждый элемент системы прямо или косвенно связан с другими элементами. Хотя система может являться частью большой системы, ее нельзя разделить на независимые части — система как таковая перестанет существовать.

При этом очень важно понять следующее. Согласно распространенной мировоззренческой позиции мир устроен целостно и неделимо. Разделение мира на отдельные составные части (его структурирование) условно и делается человеком ради достижения определенных целей, решения определенных задач. Дело в том, что особенность человеческой логики, которая в основе своей дискретна (часто бинарна), не позволяет понять континуальное (непрерывное) целое, не разбив его на части и не установив те или иные логические (функциональные) отношения между ними [5]. Таким образом, системное представление является способом воспроизведения и отражения нашего сознания, нашей логики, или, другими словами, *система — это дискретная модель непрерывного бытия*.

Отсюда следует, что система — это только один из способов представления объекта исследования наряду с другими, несистемными, представлениями [21].

Систему можно описать в виде множества элементов, связей и их свойств.

4.4.1. Свойство

Свойство относится к трудно определяемым понятиям.

☒ **Свойство** — это сторона объекта, обуславливающая его различие или сходство с другими объектами, проявляющееся во взаимосвязи с ними [26].

Свойства имеют следующие основные особенности.

1. Всякое свойство относительно. По отношению к дереву железо твердое, а по отношению к алмазу оно мягкое.

2. Каждая вещь обладает бесчисленным количеством свойств, совокупность которых означает ее **качество**. Для каждого конкретного исследования существенны только некоторые из свойств. Следовательно, существенность тех или иных свойств может меняться с изменением цели исследования.

3. Свойства дают возможность описывать объекты системы количественно, выражая их в единицах, имеющих определенную размерность.

☒ *Меру количественного описания свойства называют **параметром**.*

Когда говорят о входных или выходных параметрах системы, имеют в виду значения ее входных или выходных переменных, а говоря о внутренних параметрах системы, имеют в виду значения ее внутренних свойств.

4. Свойства вещей присущи самим вещам, т. е. объективны. Отделить их от вещей можно лишь мысленно.

В системном анализе большое внимание уделяется так называемым **интегративным** свойствам.

☒ ***Интегративные свойства** — это свойства, которые имеются у системы в целом, но отсутствуют у ее элементов.*

Интегративное свойство отражает сущность системы, что показано в одном из определений [1]: «Система S на объекте A относительно интегративного свойства есть совокупность таких элементов, находящихся в таких отношениях, которые порождают данное интегративное свойство».

4.4.2. Элементы системы

Элемент — это внутренняя исходная единица, функциональная часть системы, собственное строение которой не рассматривается, а учитываются лишь ее свойства, необходимые для построения и функционирования системы. Совокупность однородных элементов системы иногда называют **компонентами**.

☒ ***Элемент системы** — это объект, выполняющий определенные функции и не подлежащий дальнейшему разделению в рамках поставленной задачи [10].*

Понятие «элемент» не тождественно понятию «часть». Слово «часть» указывает лишь на внутреннюю принадлежность чего-либо

объекту, а «элемент» всегда обозначает функциональную единицу. Всякий элемент — часть, но не всякая часть — элемент.

Примеры. Элементы системы: атомы, звезды, переключатели, пружины, электронные приборы, газы, переменные, уравнения, правила и законы, технологические процессы, производственные подразделения, станки и т. д.

В иерархических структурах элемент тоже может быть рассмотрен как система, а система, в свою очередь, является элементом системы более высокого уровня. В связи с этим вводят понятия «*подсистема*» и «*надсистема*» [8].

☒ Система, являющаяся элементом данной системы, называется *подсистемой* данной системы.

☒ Система, элементом которой является данная система, называется *надсистемой* данной системы.

Формально любая совокупность элементов системы вместе со связями между ними может рассматриваться как ее подсистема. Использование этого понятия оказывается особенно плодотворным в тех случаях, когда в качестве подсистем фигурируют некоторые более или менее самостоятельно функционирующие части системы, способные выполнять относительно независимые функции, имеющие подцель, направленную на достижение общей цели системы [2, 9, 15].

Совокупность всех элементов, из которых состоит система, образуют ее **состав**. Состав системы сводится к полному перечню ее элементов.

При этом нужно понимать, что системы, имеющие одинаковый состав, могут обладать разными свойствами. Определяющим для системы является организация ее элементов, или структура.

4.4.3. Классификации элементов

Если условно считать, что элементы обладают однонаправленным действием, то, взяв за основу предложения В.А. Карташева [9], можно рассматривать следующую классификацию элементов по реакции на возмущение (табл. 4.1).

Имеются и другие классификации элементов, например предложенная Ю.П. Сурминым [23] (табл. 4.2).

4.4.4. Связи

Понятие «связь» входит в любое определение системы, потому что связь обеспечивает возникновение и сохранение целостности ее свойств. Это понятие одновременно характеризует и строение (статическую), и функционирование (динамику) системы.

Таблица 4.1

Классификация элементов по реакции на возмущение

Название	Характеристика	Изображение
Упругий	Однозначно передает входное воздействие на выход (повторитель)	
Рефлексивный	Осуществляет внутреннее преобразование входа в выход по какому-либо алгоритму	
Потребитель	Воспринимает входное воздействие без образования выходного («черная дыра»)	
Отторгатель	Не воспринимает входное воздействие (отклоняет его)	
Источник	Генерирует выходное воздействие в отсутствие входного («фантом»)	
Полирецепторный	Рефлексивный элемент с несколькими входами и одним выходом	
Полиэффекторный	Рефлексивный элемент с одним входом и несколькими выходами	
Полиэлемент	Рефлексивный элемент с несколькими входами и несколькими выходами	
Полипотребитель	Потребитель, воспринимающий воздействия по нескольким входам	
Полиисточник	Источник, генерирующий несколько выходных воздействий	

Таблица 4.2

Классификация элементов системы, предложенная Ю.П. Сурминым

Основание классификации	Элемент	
	Тип	Характеристика
Степень самостоятельности элемента	Программный	Действует по жесткой программе
	Адаптивный	Обладает способностью приспособления
	Инициативный	Обладает способностью изменять действительность
Длительность существования	Постоянный	Отличается относительно длительным временем существования
	Временный	Существующий временно
Временная принадлежность	Прошлого (атавизм)	Остался от прошлых этапов жизни системы
	Настоящего	Характерен для настоящего времени существования системы
	Будущего	Свойственен для будущего данной системы (инновационный элемент)

Окончание табл. 4.2

Основание классификации	Элемент	
	Тип	Характеристика
Роль в системе	Основной	Играет главную роль в системе
	Неосновной	Играет второстепенную роль в системе
	Активный	Воздействует на процессы системы
	Пассивный	Слабо воздействует на процессы системы
	Определенный или предсказуемый	Оказывает вполне определенное воздействие на систему
Активность в системе	Неопределенный или непредсказуемый	Оказывает непредсказуемые воздействия на систему
Характер воздействия на систему		

Однако дать определение этому почти очевидному понятию довольно трудно — существуют десятки определений. В одних случаях связь — это «процесс ...», в других — «подсистема (элемент) ...» [6]. Можно говорить, что «связь» — это отдельный элемент, и в этом есть некоторый смысл, поскольку иногда канал связи имеет материальное воплощение со своими статическими и динамическими свойствами.

Самые простые определения звучат так:

- ☒ **Связи** — это то, что объединяет элементы в целое.
- ☒ **Связи** — это компоненты системы, осуществляющие взаимодействие между ее элементами, а также между системой в целом и средой.

При содержательном подходе связи подразделяются на:

- *материально-вещественные* — процессы передачи вещества между элементами системы;
- *энергетические* — процессы передачи энергии между элементами системы;
- *информационные* — представляют собой информационные потоки.

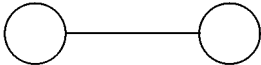
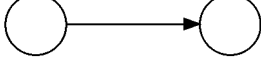
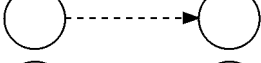
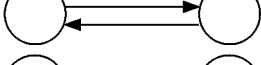
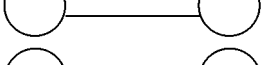
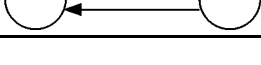
Связями первого порядка называются связи, функционально необходимые — реализующие основные функции системы. Дополнительные связи называются *связями второго порядка*. Если они присутствуют, то в значительной степени улучшают действие системы (проявление эффекта синергии см. в гл. 6), но не являются функционально необходимыми. Излишние или противоречивые связи называются *связями третьего порядка*.

Иногда связь определяют как ограничение свободы элементов [22]. Действительно, элементы, вступая в связь друг с другом, утрачивают часть своих свойств, которыми они потенциально обладали в свободном состоянии.

Существует несколько классификаций связей. Связи можно охарактеризовать *направлением, силой, характером* (или видом) [22]. По первому признаку связи делятся на *направленные* и *ненаправленные*. По второму — на *сильные* и *слабые*. По характеру (виду) различают связи *подчинения*, связи *порождения* (или *генетические*), *равноправные* (или *безразличные*), связи *управления*.

С формальной точки зрения можно рассматривать классификацию связей, представленную в табл. 4.3 [23].

Таблица 4.3
Классификация связей в системах (формальный подход)

Вид связи	Изображение
Ненаправленная непрерывная	
Направленная непрерывная	
Прерывистая, дискретная	
Двусторонняя	
Равноправные	
Неравноправные	

Если рассматривать вариант системы, состоящей из n элементов, в которой между двумя элементами допустима только одна связь, то максимальное количество связей в системе N_c определяется числом возможных сочетаний связей между элементами и может быть найдено по формуле

$$N_c = n(n - 1).$$

Примеры. Если система состоит из пяти элементов, то максимальное количество связей для нее равно 20, если из 100, то 9900, а при 1000 элементов система может иметь до миллиона связей.

Для кибернетических моделей систем, для которых связи условно считаются односторонними, более адекватным является такое определение:

☒ **Связь** — это способ взаимодействия входов и выходов элементов системы между собой и с окружающей средой.

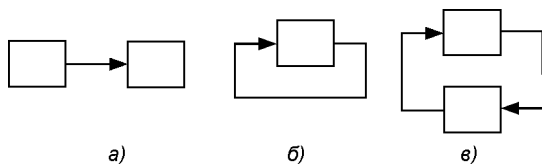


Рис. 4.4. Прямая (а) и обратная (б и в) связь между элементами

В свете такого определения связи делятся на прямые и обратные (рис. 4.4).

- ☒ **Прямая связь** — это непосредственное воздействие одного элемента на другой (связь между выходом одного элемента и входом другого).
- ☒ **Обратная связь** — это воздействие результатов функционирования элемента на характер этого функционирования (связь между выходом и входом одного и того же элемента).

Причем обратная связь может быть осуществлена непосредственно или при помощи других элементов системы (рис. 4.4, б и в).

Различают положительную (усиливающую) обратную связь и отрицательную (уравновешивающую). Если ограничиться только внешними причинами изменения выхода, то можно остановиться на таких определениях:

- ☒ **Обратная связь, уменьшающая влияние входного воздействия на выходную величину, называется отрицательной, а увеличивающая это влияние — положительной.**

В общем случае:

- ☒ **Положительная (усиливающая) обратная связь усиливает тенденцию изменения выхода системы, а отрицательная (уравновешивающая) — ее уменьшает.**

Таким образом, отрицательная обратная связь способствует восстановлению равновесия в системе, нарушенного внешним воздействием или некими внутренними причинами, а положительная — усиливает отклонение от равновесного состояния по сравнению с его величиной в системе без такой обратной связи.

Пример. Положительная обратная связь. На входе — вклад в банке, на выходе — сумма денег на счету. Если положить в банк 1000 р. под 10 % годовых, то через год на счету будет 1100 р., через 2 года — 1210 р. и т. д. Если взять в кредит в банке 1000 р. под 10 % годовых, то через год на счету будет 1100 р. долга, через 2 года — 1210 р. и т. д.

Обратная связь является основой саморегуляции, самоорганизации, развития системы, приспособления ее к меняющимся условиям

существования. Весь наш жизненный опыт состоит из циклов обратной связи.

Примеры. 1. Примеры *положительной обратной связи*: раковое заболевание, рост живых клеток, накопление знаний, распространение слухов, эпидемия, ядерная реакция, паника, рост коралловых рифов, лавина.

2. Примеры *отрицательной обратной связи*: воздушный кондиционер, регулирование температуры тела, процентного содержания сахара в крови и кровяного давления, выздоровление, езда на велосипеде, хищники и жертвы, спрос и предложение на рынке, регулирование ассортимента.

Имеется любопытная разновидность обратной связи — так называемая *упреждающая связь (feedforward)* [19]. В этом случае будущее оказывает влияние на настоящее. Например, если вы ожидаете провал, то, скорее всего, его и получите. И наоборот, если вы настраиваетесь на успех, ваша энергия и оптимизм помогают вам и повышают ваши шансы. Наши ожидания и тревоги, опасения и надежды способствуют формированию именно того будущего, которое мы себе представляем. Примером является ситуация с ожиданием дефицита. Особенность упреждающей связи состоит в том, что усилия, которые направлены на то, чтобы избежать нежелательных событий, как раз к ним и приводят. Примером является механизм бессонницы. Другой пример в виде парадокса «Будьте непринужденны!».

4.5. Структура

4.5.1. Понятие структуры

Структура (от латинского «structure», означающего *строение, расположение, порядок*) отражает определенные взаимосвязи элементов системы, ее строение. При описании сложных объектов структура системы включает не все элементы и связи между ними, а лишь наиболее существенные, которые мало меняются при текущем функционировании системы и обеспечивают ее существование и основные свойства.

☒ **Структура системы** — это устойчивая упорядоченность в пространстве и во времени ее элементов и связей между ними.

Структурные связи обладают относительной независимостью от элементов и при переходе от одной системы к другой могут переносить закономерности, выявленные и отраженные в структуре одной из них, на другие. При этом системы могут иметь различную физическую природу.

Одна и та же система может быть представлена разными структурами в зависимости от стадии познания объектов или процессов, от аспекта их рассмотрения, цели создания. По мере развития исследований или в ходе проектирования структура системы может изменяться.

Именно структура делает систему некоторым качественно определенным целым, так как структура предполагает взаимодействие элементов друг с другом по-разному, выдвигая на первый план те или иные стороны, свойства элементов. Структура является важнейшей характеристикой системы, так как при одном и том же составе элементов, но при различном взаимодействии между ними меняется и назначение системы, и ее возможности. В подтверждение этого на рис. 4.5 приведен пример пары различных систем, построенных из одних и тех же элементов [24].

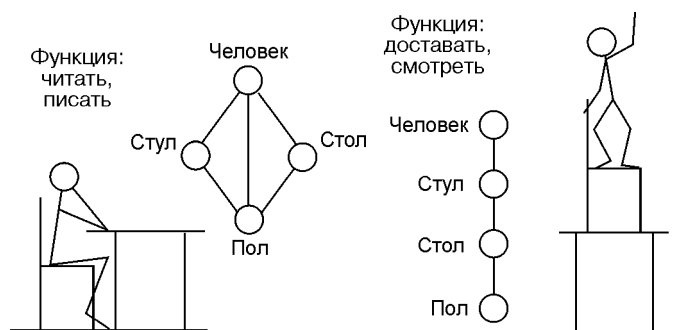


Рис. 4.5. Пример различных систем, состоящих из одних и тех же элементов

Кроме того, следует различать два определяющих понятия структуры: материальная структура и формальная структура [3].

✓ **Формальная структура** понимается совокупность функциональных элементов и их отношений, необходимых и достаточных для достижения системой поставленных целей.

Таким образом, формальная структура описывает нечто общее, присущее системам одного типа.

✓ **Материальная структура** является носителем конкретных типов и параметров элементов системы и их взаимосвязей.

Приведенные рассуждения позволяют сделать два вывода относительно сущности формальных структур:

- фиксированной цели соответствует, как правило, одна и только одна формальная структура;
- одной формальной структуре может соответствовать множество материальных структур.

4.5.2. Типы структур

Рассмотрим ряд типовых структур систем, использующихся при описании организационно-экономических, производственных и технических объектов.

Обычно понятие «структура» связывают с графическим отображением элементов и их связей. Однако структура может быть представлена и в матричной форме, в форме теоретико-множественного описания, с помощью языка топологии, алгебры и других средств моделирования систем [5].

Рассмотрим основные типы структур [3, 18, 20].

Линейная (последовательная) структура (рис. 4.6,а) характеризуется тем, что каждый элемент связан с двумя соседними. При выходе из строя хотя бы одного элемента (связи) структура разрушается. Примером такой структуры является конвейер.

Кольцевая структура (рис. 4.6,б) отличается замкнутостью, любые два элемента обладают двумя направлениями связи. Это повышает скорость обмена информацией, делает структуру более живучей.

Сотовая структура (рис. 4.6,в) характеризуется наличием резервных связей, что повышает надежность (живучесть) функционирования структуры, но приводит к повышению ее стоимости.

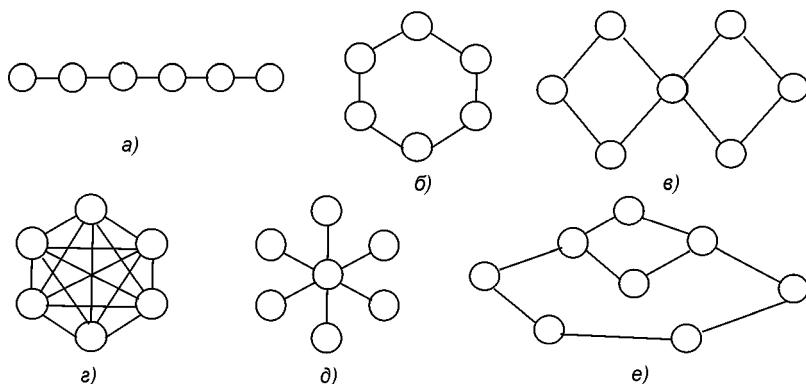


Рис. 4.6. Структуры: а — линейная; б — кольцевая; в — сотовая; г — многосвязная; д — звездная; е — графовая

Многосвязная структура (рис. 4.6,г) имеет структуру полного графа. За счет наличия кратчайших путей надежность ее функционирования максимальная, эффективность функционирования высокая, однако стоимость тоже максимальная.

Звездная структура (рис. 4.6,д) имеет центральный узел, который выполняет роль центра, все остальные элементы системы являются подчиненными.

Графовая структура (рис. 4.6,е) используется обычно при описании производственно-технологических систем.

Сетевая структура или сеть (разновидность графовой структуры) представляет собой декомпозицию системы во времени [5]. На-

пример, сетевая структура может отображать порядок действия технической системы (телефонная сеть, электрическая сеть и т. п.), этапы деятельности человека (при производстве продукции — сетевой график, при проектировании — сетевая модель, при планировании — сетевая модель, сетевой план и т. д.).

Иерархическая структура получила наиболее широкое распространение при проектировании систем управления. Все элементы, кроме верхнего и нижнего уровней, обладают как командными, так и подчиненными функциями управления. Иерархические структуры представляют собой декомпозицию системы в пространстве [5]. Все вершины (узлы) и связи (дуги, ребра) существуют в этих структурах одновременно (не разнесены во времени).

Иерархические структуры, в которых каждый элемент нижележащего уровня подчинен одному узлу (одной вершине) вышестоящего (и это справедливо для всех уровней иерархии), называют *древовидными* структурами (структурами *типа «дерева»*; структурами, на которых выполняются отношения древесного порядка; иерархическими структурами с *сильными* связями) (рис. 4.7,а).

Структуры, в которой элемент нижележащего уровня может быть подчинен двум и более узлам (вершинам) вышестоящего уровня, называют иерархическими структурами со *слабыми* связями (рис. 4.7,б).

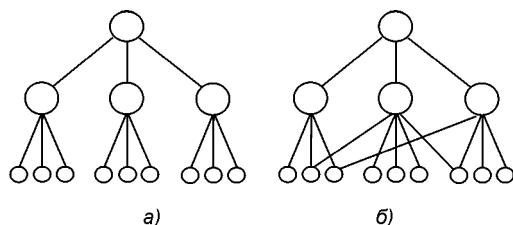


Рис. 4.7. Иерархические структуры с сильными (а) и слабыми (б) связями

В виде иерархических структур представляются конструкции сложных технических изделий и комплексов, структуры классификаторов и словарей, структуры целей и функций, производственные структуры, организационные структуры предприятий.

4.5.3. Стратификация и страты

В теории систем М. Месаровича предложены особые классы иерархических структур («страты», «слои», «эшелоны»), отличающиеся принципами взаимоотношений элементов в пределах уровня и различным правом вмешательства вышестоящего уровня в организацию

взаимоотношений между элементами нижележащего [5, 17]. Наиболее интересными для системного анализа являются *страты*.

При описании сложных систем основная проблема состоит в том, чтобы, с одной стороны, отразить в модели целостное представление об исследуемом или проектируемом объекте, а с другой — дать его детальное описание. Здесь уместна поговорка: «За деревьями не видно леса». Действительно, если мы начнем подробно описывать все элементы системы и их свойства, то потеряем общее представление о системе, и наоборот, если будем рассматривать систему как «черный ящик», то не поймем, как работает система. Один из путей решения этой проблемы — *стратификация*.

☑ **Стратификация** — это представление системы семейством моделей, каждая из которых описывает поведение системы с точки зрения соответствующего уровня абстрагирования.

Такое представление названо *стратифицированным*, а уровни абстрагирования — *стратами* [17].

Основные уровни (страты) изучения систем: макроскопический и микроскопический анализы [18].

☑ **Макроскопический анализ** заключается в игнорировании деталей структуры системы и наблюдении только общего поведения системы как целого.

Цель макроскопического анализа состоит в создании модели изучаемой системы в ее взаимодействии с окружением (модель «вход-выход» — модель типа «черный ящик»). Сюда относятся тип структуры и границы системы, характер взаимодействия «вход-выход», особенности функционирования и т. д.

☑ **Микроскопический анализ** детально описывает каждый из компонентов системы; центральным при этом является понятие элемента; изучаются связи и функции элементов, структура системы и др.

К задачам микроанализа можно отнести следующие:

- выделение элементов в системе;
- изучение каждого из элементов;
- установление структуры системы;
- выявление связи между элементами.

Однако для описания сложных систем двух страт недостаточно. В этом случае используется иерархическая структура описания системы, при котором более высокий уровень иерархии выступает в качестве макроописания для нижнего (микроуровня).

Примеры. 1. В стратифицированном описании ЭВМ можно рассмотреть в виде двух страт [17]:

нижняя — страта физических операций. Здесь система описывается на языке физических законов;

верхняя — страта математических и логических операций. Здесь описываются программирование и реализация программ, осуществляемые с помощью абстрактных, нефизических понятий, информационные потоки, команды языков программирования и т. д.

2. При разработке баз данных принято выделять концептуальный, логический и физический уровни.

3. Ю.И. Черняком [27] предложено выделение уровней абстрагирования системы от философского или теоретико-познавательного описания ее замысла до материального воплощения. Такое представление помогает понять, что одну и ту же систему на разных стадиях познания и проектирования можно (и нужно) описывать различными выразительными средствами, т. е. как бы на разных «языках»:

- философское или теоретико-познавательное описание замысла системы — вербальное описание, концепции;
- представление системы на языке выбранной научной теории — в форме моделей разного рода, помогающих глубже понять и раскрыть замысел системы;
- проектное представление системы — техническое задание и технический проект, для разработки и представления которого могут понадобиться математические расчеты, принципиальные схемы;
- конструкторская документация — конструкторские чертежи, сопровождающая их документация;
- технологическая документация — технологические карты, стандарты и другая технологическая документация (конструкторская и технологическая страты могут быть объединены);
- материальное воплощение, реализация системы — детали, блоки, собранное изделие или созданная системы, принципы функционирования которой отражены в соответствующей нормативно-технической и нормативно-методической документации (инструкциях по эксплуатации, положениях и т. п.).

Страты могут выделяться по разным принципам [5]. Например, при представлении системы управления предприятием страты могут соответствовать сложившимся уровням управления: управление *технологическими* процессами и *организационное* управление предприятием.

Стратифицированное представление может использоваться и как средство последовательного углубления представления о системе, ее детализации (от «леса» к «деревьям» и наоборот): а) чем ниже опускаемся по иерархии страт, тем более детальным становится раскрытие системы; б) чем выше поднимаемся, тем яснее становится смысл и значение всей системы.

Принципы стратификации реализованы в методологиях структурного системного анализа SADT, DFD и в серии стандартов IDEF [4, 13, 14, 16].

4.5.4. Матричные структуры

Как говорилось выше, структуры систем можно представлять не только в графическом виде, но и, в частности, в табличном (матрич-

ном), что позволяет представлять взаимоотношения между уровнями иерархической структуры [5].

Иерархическая структура с сильными связями может быть представлена матричной структурой (рис. 4.8,а). Такое представление иногда удобнее на практике, например при оформлении планов работ, когда нужно указать исполнителей, сроки выполнения, формы отчетности и другие сведения, необходимые для контроля выполнения плана.

1. ...	1.1. ...	1.1.1. ... 1.1.2. ...
	1.2. ...	1.2.1. ... 1.2.2. ... 1.2.3. ...
	1.3. ...	1.3.1. ... 1.3.2. ... 1.3.3. ...
	1.4. ...	1.4.1. ... 1.4.2. ...
	2.1. ...	2.1.1. ... 2.1.1. ...
	2.2. ...	2.2.1. ... 2.2.2. ... 2.2.3. ...

а)

	1	2
1.1	+	+
1.2	+	-
1.3	+	-
1.4	+	+
2.1	-	+
2.2	+	+

б)

Рис. 4.8. Табличное представление иерархических структур с сильными (а) и слабыми (б) связями

Взаимоотношения между уровнями иерархии со «слабыми» связями могут быть представлены в виде двумерной матричной структурой (рис. 4.8,б). Важной особенностью такого представления является возможность отразить не только наличие связей, но и их силу: либо словами («сильная» — «слабая»), либо путем введения количественных характеристик силы связи.

4.5.5. Оценка эффективности структур

Как говорилось выше, из одних и тех же элементов можно создать множество разных структур (систем), обладающих разными свойствами. Особую важность имеют структуры в системах управления, когда при одном и том же числе сотрудников эффективность управления в значительной степени зависит от организации их взаимодействия (структуры системы управления).

При выборе того или иного варианта структур целесообразно использовать некоторые показатели эффективности, например: оперативность, централизация, периферийность, живучесть, объем.

Оперативность оценивается временем реакции системы на воздействие внешней среды либо скоростью ее изменения и зависит в основном от общей схемы соединения элементов и их расположения.

Централизация определяет возможность выполнения одним из элементов системы руководящих функций. Численно централизация определяется средним числом связей центрального (руководящего) элемента со всеми остальными.

Периферийность характеризует пространственные свойства структур. Численно периферийность характеризуется показателем «центра тяжести структуры», при этом в качестве единичной оценки меры связности выступает «относительный вес» элемента структуры.

Живучесть системы определяется способностью системы сохранять основные свойства при повреждении ее части. Этот показатель может характеризоваться относительным числом элементов (или связей), при повреждении (уничтожении) которых показатели системы не выходят за допустимые пределы.

Объем является количественной характеристикой структуры и определяется обычно общим количеством элементов или связей либо тем и другим. Объем напрямую связан со стоимостью и другими характеристиками системы.

Пример. Если сравнивать топологию компьютерных сетей, то они отличаются количеством соединительных кабелей, что влияет на стоимость сети.

Интересный сравнительный анализ структур приведен в работах [5, 22].

4.6. Система как средство достижения цели

Люди предъявляют определенные требования к состоянию окружающей среды в соответствии с имеющимися потребностями. Но поскольку естественное состояние окружающей среды не всегда удовлетворяет человека, то возникает необходимость создавать искусственные системы, обеспечивающие потребности населения. В связи с этим целенаправленная деятельность человека заключается в отборе из окружающей среды объектов, свойства которых можно использовать для достижения цели, и на объединение этих объектов надлежащим образом, т. е. создание системы. В этом случае *система есть средство достижения цели* [20].

Примеры. 1. Для того чтобы знать в произвольный момент время, была создана система «часы».

2. Для обеспечения тепла в домах была разработана система отопления.

3. Для того чтобы обеспечивать лицо, принимающее решения, необходимой информацией, создается информационная система.

4. Для практически мгновенной передачи зрительной информации в звуковом сопровождении на большие расстояния было разработано телевидение.

5. Для обеспечения быстрого перемещения большого числа людей по их желанию в пределах города создается система городского транспорта.

Резюме

1. Объект «погружен» в окружающую среду, представляющую собой совокупность объектов, которые окружают исследуемый объект и прямо или косвенно взаимодействуют с ним.

2. При системном исследовании организации большое внимание уделяется ее целевой среде — совокупности условий и факторов, действующих в непосредственном окружении организации и оказывающих прямое воздействие на установление целей и способов их реализации.

3. Между окружающей средой и объектом существует бесконечное множество взаимных связей, реализуемых через некоторые условные точки — *входы* и *выходы*.

4. С кибернетической точки зрения объект представляется *только преобразователем информации* (входной в выходную).

5. Входы объекта можно разделить на возмущения (контролируемые переменные), управления (управляемые переменные) и шумы (неконтролируемые переменные).

6. Среди выходов объекта можно выделить целевые, которые полезны потребителю либо соответствуют цели исследования.

7. При исследовании (проектировании) объекта, в зависимости от цели, рассматривают какую-либо его сторону — выделяют *систему*, как представление об объекте исследования с точки зрения поставленной цели. Для выделения системы, кроме объекта, необходимо наличие цели выделения системы, наблюдателя, выделяющего систему, а также входных и выходных переменных, отражающих взаимосвязь системы с окружающей средой.

8. Традиционно системой считается совокупность взаимосвязанных элементов. Более строго систему можно определить как совокупность объектов, называемых элементами, взаимосвязанных и взаимодействующих между собой, которые образуют единое целое, обладающее свойствами, не присущими составляющим его элементам, взятым в отдельности.

9. Систему можно описать в виде множества *элементов, связей* и их *свойств*.

10. *Свойство* — это сторона объекта, обуславливающая его различие или сходство с другими объектами, проявляющееся во взаимосвязи с ними.

11. В системном анализе большое внимание уделяется так называемым *интегративным* свойствам, которые имеются у системы в целом, но отсутствуют у ее элементов.

12. *Элемент* — внутренняя исходная единица, функциональная часть системы, собственное строение которой не рассматривается, а учитываются лишь ее свойства, необходимые для построения и функционирования системы. Совокупность всех элементов, из которых состоит система, образует ее *состав*. Состав системы сводится к полному перечню ее элементов.

13. *Связи* в системе осуществляют взаимодействие между ее элементами, а также между системой в целом и средой.

14. С кибернетической точки зрения связь — это способ взаимодействия входов и выходов элементов системы между собой и с окружающей средой. Связь между выходом одного элемента и входом другого относится к *прямой связи*, а связь между выходом и входом одного и того же элемента — к *обратной связи*.

15. Различают положительные и отрицательные обратные связи. *Положительная* (усиливающая) обратная связь усиливает тенденцию изменения выхода системы, а *отрицательная* (уравновешивающая) — ее уменьшает.

16. Взаимосвязи элементов системы, ее строение отражает *структура* — устойчивая упорядоченность в пространстве и во времени ее элементов и связей между ними. Структура является важнейшей характеристикой системы, так как при одном и том же составе элементов, но при различном взаимодействии между ними меняется и назначение системы, и ее возможности.

17. Следует различать два определяющих понятия структуры: *формальная* структура и *материальная* структура. Первая — описывает нечто общее, присущее системам одного типа. Вторая — является носителем конкретных типов и параметров элементов системы и их взаимосвязей. При этом фиксированной цели соответствует, как правило, одна и только одна формальная структура, а одной формальной структуре может соответствовать множество материальных структур.

18. Существует множество разнообразных структур (линейная, кольцевая, сотовая, многосвязная, сетевая, звездная, иерархическая), которые могут быть представлены в графической или матричной форме, форме теоретико-множественного описания и др.

19. Большой интерес представляют *иерархические* структуры, которые получили наиболее широкое распространение при анализе и проектировании систем управления.

20. При описании сложных систем основная проблема состоит в том, чтобы, с одной стороны, отразить в модели целостное представление об исследуемом или проектируемом объекте, а с другой — дать его детальное описание. Здесь на помощь приходит иерархическое описание системы в виде *страт* (*стратификация*) — представление си-

системы семейством моделей, каждая из которых описывает поведение системы с точки зрения соответствующего уровня абстрагирования

21. Говоря о системах, созданных человеком, следует подчеркнуть, что система создается только тогда, когда человека не удовлетворяет существующее состояние окружающей среды. Он видит в создаваемой системе средство достижения своих целей, что направлено на удовлетворение имеющихся потребностей.

Литература

1. Агошкова Е.Б., Ахлибинский Б.В. Эволюция понятия системы // Вопросы философии. 1998. № 7. С. 170–179.
2. Антонов А.В. Системный анализ. — М.: Высшая школа, 2004. — 453 с.
3. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 368 с.
4. Вендров А.М. CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. — М.: Финансы и статистика, 1998. — 176 с.
5. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории управления и системного анализа. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. — 510 с.
6. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем). — М.: Сов. радио, 1976. — 296 с.
7. Ерохина Е.А. Теория экономического развития: системно-синергетический подход. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1999. — 160 с.
8. Жилин Д.М. Теория систем: опыт построения курса. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 184 с.
9. Карташев В.А. Система систем. Очерки общей теории и методологии. — М.: Прогресс-академия, 1995. — 416 с.
10. Колесник А.П. Компьютерные системы в управлении финансами. — М.: Финансы и статистика, 1994. — 312 с.
11. Миротин Л.Б., Ташибаев Б.Э. Системный анализ в логистике. — М.: ЭКЗАМЕН, 2002. — 480 с.
12. Мардас А.Н., Мардас О.А. Организационный менеджмент. — СПб.: Питер, 2003. — 336 с.
13. Калянов Г.Н. CASE-технологии: Консалтинг в автоматизации бизнес-процессов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2002. — 320 с.
14. Качала В.В. Структурный системный анализ. Ч. 1. Функциональное моделирование. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2002. — 62 с.
15. Красов А.В. Теория информационных процессов и систем. Лекция № 3. Классификация информационных систем по сложности. — <http://loge.narod.ru/tipis>.
16. Марка Д., МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования. — М.: МетаТехнология, 1993. — 240 с.
17. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973. — 344 с.
18. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985. — 199 с.
19. О'Конор Д., Мак-Дермот Я. Искусство системного мышления. Творческий подход к решению проблем и его основные стратегии. — Киев: София, 2001. — 304 с.
20. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.

21. *Прангишвили И.В.* Системный подход и общесистемные закономерности. — М.: СИНТЕГ, 2000. — 528 с.
22. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. *В.Н. Волковой, В.Н. Козлова*. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.
23. *Сурмин Ю.П.* Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. — Киев: МАУП, 2003. — 368 с.
24. *Титов В.В.* Системно-морфологический подход в технике, науке, социальной сфере. — <http://www.metodolog.ru/00039/00039.html>.
25. *Уёмов А.И.* Системный подход и общая теория систем. — М.: Мысль, 1978. — 272 с.
26. Философский словарь / Под ред. *М.М. Розенталя*. — М.: Политиздат, 1972. — 496 с.
27. *Черняк Ю.И.* Системный анализ в управлении экономикой. — М.: Экономика, 1975. — 191 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятия «окружающая среда».
2. Что входит в окружающую среду любого экономического объекта?
3. Покажите отличия внешней среды организации от ее целевой среды.
4. Что входит в целевую среду организации?
5. Что понимается под входами и выходами объекта?
6. Дайте определение понятия «черный ящик».
7. Перечислите типы входных переменных.
8. Укажите основные классификации входов объекта.
9. Что такое «целевой выход объекта»?
10. Дайте определения понятия «система».
11. Что необходимо для выделения системы из окружающей среды?
12. Дайте определения элемента системы.
13. Укажите различия между подсистемой и надсистемой.
14. Перечислите основные классификации элементов системы.
15. Опишите классификацию элементов:
 - а) по реакции на возмущение;
 - б) степени самостоятельности;
 - в) длительности существования;
 - г) временной принадлежности;
 - д) роли в системе;
 - е) активности в системе;
 - ж) характеру воздействия на систему.
16. Дайте определение понятия «свойство».
17. Перечислите основные особенности свойств.
18. Что понимается под интегративными свойствами?
19. Дайте определение понятия «параметр».
20. Приведите возможные определения понятия «связь».
21. Перечислите разновидности связей.
22. Вычислите максимальное количество возможных связей для системы с 50-ю элементами.
23. Дайте определение:
 - а) прямой связи;
 - б) обратной связи;
 - в) положительной обратной связи;

- г) отрицательной обратной связи.
- 24. Приведите примеры обратных связей:
 - а) положительных;
 - б) отрицательных.
- 25. Объясните суть упреждающей обратной связи.
- 26. Дайте определение понятия «структура».
- 27. Укажите различия между формальной и материальной структурами.
- 28. Перечислите основные типы структур.
- 29. По каким критериям оценивается эффективность структур?
- 30. Перечислите классы многоуровневых иерархических структур.
- 31. Приведите графические примеры иерархических структур со слабыми и сильными связями.
- 32. В каких случаях используются многоуровневые иерархические структуры — страты?
- 33. Дайте определение стратификации.
- 34. Как в матричных структурах отражаются иерархические структуры с сильными и слабыми связями?
- 35. Покажите отличия макроскопического и микроскопического анализов.
- 36. В каком случае система является средством достижения цели?

ГЛАВА 5

Состояние и функционирование систем

Как говорилось в предыдущей главе, система создается для того, чтобы получить желаемые значения (состояния) ее целевых выходов.

Примеры. 1. Корова должна давать молоко и, на худой конец, навоз для удобрения.

2. Печка должна давать тепло, но не меньше и не больше необходимого.

3. Предприятие должно давать кому-то прибыль, а кому-то нужные товары.

Иногда нас будут интересовать значения и нецелевых выходов, если они представляют опасность или неприятности для кого-либо.

5.1. Состояние системы

В общем случае значения выходов системы зависят от следующих факторов:

- значений (состояния) входных переменных;
- начального состояния системы;
- функции системы.

Отсюда вытекает одна из наиболее важных задач системного анализа — установление причинно-следственных связей выходов системы с ее входами и состоянием.

5.1.1. Состояние системы и его оценка

Понятие *состояние* характеризует мгновенную «фотографию», временной «срез» системы.

☒ **Состояние системы** в определенный момент времени — это множество ее существенных свойств в этот момент времени.

При этом можно говорить о *состояниях входов*, *внутреннем состоянии* и *состоянии выходов* системы.

Состояние входов системы представляется вектором значений входных параметров: $X = (x_1, \dots, x_n)$ и фактически является отражением состояния окружающей среды.

Внутреннее состояние системы представляется вектором значений ее внутренних параметров (*параметров состояния*): $Z = (z_1, \dots, z_v)$ и зависит от состояния входов X и начального состояния Z_0 :

$$Z = F_1(X, Z_0).$$

Пример. Параметры состояния: температура двигателя автомобиля, психологическое состояние человека, износ оборудования, уровень квалификации исполнителей работы.

Внутреннее состояние практически ненаблюдаемо, но его можно оценивать по **состоянию выходов** (значениям выходных переменных) системы $Y = (y_1, \dots, y_m)$ благодаря зависимости $Y = F_2(Z)$. При этом следует говорить о выходных переменных в широком смысле: в качестве координат, отражающих состояние системы, могут выступать не только сами выходные переменные, но и характеристики их изменения — скорость, ускорение и т. д. Таким образом, внутреннее состояние системы S в момент времени t может характеризоваться множеством значений ее выходных координат и их производных в этот момент времени:

$$S_t = \{Y_t, Y'_t, Y''_t, \dots\}.$$

Пример. Состояние финансовой системы России можно характеризовать не только курсом рубля к доллару, но и скоростью изменения этого курса, а также ускорением (замедлением) этой скорости.

Однако необходимо заметить, что выходные переменные не полностью, неоднозначно и несвоевременно отражают состояние системы.

Примеры. 1. У больного повышенная температура ($y > 37^\circ\text{C}$), но это характерно для различных внутренних состояний.

2. Если у предприятия низкая прибыль, то это может быть при разных состояниях организации.

5.1.2. Процесс

Если система способна переходить из одного состояния в другое (например, $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow \dots$), то говорят, что она обладает **поведением** — в ней происходит **процесс**.

☒ **Процесс** — это последовательная смена состояний.

В случае непрерывной смены состояний, процесс P можно описать функцией времени:

$$P = S(t),$$

а в дискретном случае — множеством:

$$P = \{S_{t_1}, S_{t_2}, \dots\}.$$

По отношению к системе можно рассматривать два вида процессов:

внешний процесс — последовательная смена воздействий на систему, т. е. последовательная смена состояний окружающей среды;

внутренний процесс — последовательная смена состояний системы, которая наблюдается как процесс на выходе системы.

Дискретный процесс сам может рассматриваться как система, состоящая из совокупности состояний, связанных последовательностью их смены.

5.1.3. Статические и динамические системы

В зависимости от того, изменяется ли состояние системы со временем, ее можно отнести к классу *статических* или *динамических* систем.

☒ **Статическая система** — это система, состояние которой практически не изменяется в течение определенного периода ее существования.

☒ **Динамическая система** — это система, изменяющая свое состояние во времени.

Итак, *динамическими* будем называть такие системы, в которых происходят какие бы то ни было изменения со временем*. Имеется еще одно уточняющее определение [5]: *система, переход которой из одного состояния в другое совершается не мгновенно, а в результате некоторого процесса, называется динамической*.

Примеры. 1. Панельный дом — система из множества взаимосвязанных панелей — статическая система.

2. Экономика любого предприятия — это динамическая система.

В дальнейшем нас будут интересовать *только динамические системы*.

5.1.4. Функция системы

Свойства системы проявляются не только значениями выходных переменных, но и ее *функцией*, поэтому определение функций системы является одной из первых задач ее анализа или проектирования. Понятие «функция» имеет разные определения: от общеполитических до математических.

* Заметим, что термин «динамический» в русском языке неоднозначен; здесь он будет использован в самом широком смысле как обозначение любых изменений во времени.

Функция как общеполософское понятие. Общее понятие функции включает в себя понятия «предназначение» (целевое назначение) и «способность» (служить каким-то целям).

☑ **Функция** — внешнее проявление свойств объекта [6].

Примеры. 1. Ручка двери имеет функцию помочь ее открыть.

2. Налоговая служба имеет функцию сбора налогов.

3. Функция информационной системы — обеспечение информацией лица, принимающего решения.

4. Функция картины в известном мультфильме — закрывать дырку в стене.

5. Функция ветра — разгонять смог в городе.

Система может быть одно- или многофункциональной. В зависимости от степени воздействия на внешнюю среду и характера взаимодействия с другими системами, функции можно распределить по возрастающим рангам [3]:

- пассивное существование, материал для других систем (подставка для ног);
- обслуживание системы более высокого порядка (выключатель в компьютере);
- противостояние другим системам, среде (выживание, охранная система, система защиты);
- поглощение (экспансия) других систем и среды (уничтожение вредителей растений, осушение болот);
- преобразование других систем и среды (компьютерный вирус, пенитенциарная система).

Функция в математике. Функция — это одно из основных понятий математики, выражающее зависимость одних переменных величин от других. Формально функцию можно определить так [2]:

☑ **Элемент множества E_y произвольной природы называется функцией элемента x , определенной на множестве E_x произвольной природы, если каждому элементу x из множества E_x соответствует единственный элемент $y \in E_y$.**

Элемент x называется независимой переменной, или аргументом. Функция может задаваться: аналитическим выражением, словесным определением, таблицей, графиком и т. д.

Функция как кибернетическое понятие. Философское определение отвечает на вопрос: «Что может делать система?». Этот вопрос правомерен как для статических, так и для динамических систем. Однако для динамических систем важен ответ на вопрос: «Как она это делает?». В этом случае, говоря о функции системы, будем иметь в виду следующее:

☑ **Функция системы** — это способ (правило, алгоритм) преобразования входной информации в выходную.

Функцию динамической системы можно представить логико-математической моделью, связывающей входные (X) и выходные (Y) координаты системы, — моделью «вход-выход»:

$$Y = F(X),$$

где F — оператор (в частном случае некоторая формула), называемый *алгоритмом функционирования*, — вся совокупность математических и логических действий, которые нужно произвести, чтобы по данным входам X найти соответствующие выходы Y .

Удобно было бы представить оператор F в виде некоторых математических соотношений, однако это не всегда возможно, поскольку объекты бывают с *качественными*, *количественными* (например, факты, принципы, утверждения) и *смешанными* типами переменных [4].

В кибернетике широко используется понятие «*черный ящик*». «Черный ящик» является кибернетической моделью или моделью «вход-выход», в которой не рассматривается внутренняя структура объекта (либо о ней абсолютно ничего не известно, либо делается такое допущение). В этом случае о свойствах объекта судят только на основании анализа его входов и выходов. (Иногда употребляют термин «серый ящик», когда о внутренней структуре объекта все же что-либо известно.) Задачей системного анализа как раз и является «осветление» «ящика» — превращение черного в серый, а серого — в белый.

Условно можно считать, что функция F состоит из структуры St и параметров $A = (a_0, a_1, a_2, \dots)$:

$$F = \{St, A\},$$

что в какой-то мере отражает соответственно структуру системы (состав и взаимосвязь элементов) и ее внутренние параметры (свойства элементов и связей).

5.1.5. Функционирование системы

Функционирование рассматривается как процесс реализации системой своих функций. С кибернетической точки зрения:

☒ **Функционирование системы** — это процесс переработки входной информации в выходную.

Математически функционирование можно записать так:

$$Y(t) = F(X(t)),$$

т. е. функционирование описывает, как меняется состояние системы при изменении состояния ее входов.

5.1.6. Состояние функции системы

Функция системы является ее свойством, поэтому можно говорить о состоянии системы в заданный момент времени, указывая ее функцию, которая справедлива в этот момент времени. Таким образом, состояние системы можно рассматривать в двух разрезах: состояние ее параметров и состояние ее функции, которая, в свою очередь, зависит от состояния структуры и параметров:

$$S_t = \{A_t, F_t\} = \{A_t, (S_t, A_t)\}.$$

Знание состояния функции системы позволяет прогнозировать значения ее выходных переменных. Это успешно удается для *стационарных* систем.

✓ Систему считают **стационарной**, если ее функция практически не изменяется в течение определенного периода ее существования.

Для такой системы реакция на одно и то же воздействие не зависит от момента приложения этого воздействия.

Ситуация значительно осложняется, если функция системы меняется во времени, что характерно для *нестационарных* систем.

✓ Систему считают **нестационарной**, если ее функция изменяется со временем.

Нестационарность системы проявляется различными ее реакциями на одни и те же возмущения, приложенные в разные периоды времени. Причины нестационарности системы лежат внутри нее и заключаются в изменении функции системы: структуры (S_t) и/или параметров (A).

Иногда стационарность системы рассматривают в узком смысле, когда обращают внимание на изменение только внутренних параметров (коэффициентов функции системы).

✓ **Стационарной** называют систему, все внутренние параметры которой не изменяются во времени.

✓ **Нестационарная** система — это система с переменными внутренними параметрами.

Пример. Рассмотрим зависимость прибыли от продажи (Π) некоторого товара от цены на него (Π):

$$\Pi = a_0 + a_1 \Pi + a_2 \Pi^2.$$

Пусть сегодня эта зависимость выражается математической моделью:

$$\Pi = -50 + 30\Pi - 3\Pi^2.$$

Если через некоторое время изменится ситуация на рынке, то изменится и наша зависимость — она станет, например, такой:

$$\Pi = -62 + 24\Pi - 4\Pi^2.$$

5.1.7. Режимы динамической системы

Следует различать три характерных режима, в которых может находиться динамическая система: *равновесный*, *переходный* и *периодический* [1].

☒ **Равновесный режим (равновесное состояние, состояние равновесия)** — это такое состояние системы, в котором она может находиться сколь угодно долго в отсутствие внешних возмущающих воздействий или при постоянных воздействиях.

Однако надо понимать, что для экономических и организационных систем понятие «равновесие» применимо достаточно условно.

Пример. Простейший пример равновесия — шарик, лежащий на плоскости.

☒ **Под переходным режимом (процессом)** будем понимать процесс движения динамической системы из некоторого начального состояния к какому-либо ее установившемуся режиму — равновесному или периодическому.

☒ **Периодическим режимом** называется такой режим, когда система через равные промежутки времени приходит в одни и те же состояния.

5.2. Статические и динамические свойства динамических систем

5.2.1. Статические и динамические модели

По признаку учета зависимости объекта моделирования от времени различают статические и динамические характеристики систем, отражаемые в соответствующих моделях.

Статические модели (модели статики) отражают функцию системы — конкретное состояние реальной или проектируемой системы (своего рода его «мгновенную фотографию») или соотношение ее параметров, которые со временем не меняются.

Примеры. Закон Ома, описание показателей эффективности организации в некоторый момент времени.

Динамические модели (модели динамики) отражают функционирование системы — процесс изменения состояний реальной или проектируемой системы. Они показывают различия между состояниями, последовательность смены состояний и развитие событий с течением времени.

Примеры. Описание процесса изменения спроса на какой-либо товар под влиянием рекламы, изменение температуры электроплиты при ее включении, описание процесса изменения показателей эффективности за некоторый период времени.

Основное отличие статических и динамических моделей заключено в учете времени: в статике его как бы не существует, а в динамике — это основной элемент.

5.2.2. Статические характеристики систем

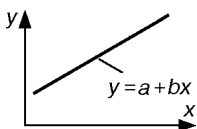


Рис. 5.1. Пример графической и математической моделей статике

В узком смысле к статической характеристике системы можно отнести ее структуру. Однако нас чаще будут интересовать свойства системы по преобразованию входов в выходы (т. е. функция системы) в установившемся режиме, когда отсутствуют изменения значений как входных, так и выходных переменных. Такие свойства определяются как *статические характеристики*.

☒ **Статическая характеристика** — это зависимость между входной и выходной величинами в установившемся режиме.

Статическая характеристика может быть представлена:

- математической моделью вида $Y = F(X)$;
- графической моделью.

Пример. Статическая характеристика в виде математической модели вида $y = a + bx$ графически будет выглядеть как на рис. 5.1.

5.2.3. Динамические характеристики систем

Следующий шаг в исследовании систем состоит в том, чтобы понять и описать, как система «работает», что происходит с ней самой и с окружающей средой в ходе реализации поставленной цели. Для описаний функционирования системы используются *динамические модели*.

Для разных объектов и систем разработано большое количество динамических моделей, описывающих процессы с различной степенью детальности: от самого общего понятия динамики, движения вообще, до формальных математических моделей конкретных процессов типа уравнений движения в механике или волновых уравнений в теории поля. Свойства динамических систем определяют динамические характеристики.

☒ **Динамическая характеристика** — это реакция системы на возмущение (зависимость изменения выходных переменных от входных и от времени).

Динамическая характеристика может быть представлена:

- математической моделью в виде дифференциального уравнения (или уравнений) вида

$$\frac{dy}{dt} = F(y(t), x(t))$$

или

$$T_1 \frac{d^m y}{dt^m} + T_2 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + \frac{dy}{dt} + y = a_1 \frac{d^n x}{dt^n} + \dots + \frac{dx}{dt} + a_n x + a_{n+1};$$

- математической моделью в виде решения дифференциального уравнения

$$y(t) = F(x(t), t);$$

- графической моделью, состоящей из двух графиков: графика изменения возмущения во времени и графика реакции объекта на это возмущение — графической зависимости изменения выхода во времени.

Пример. Рассмотрим задачу выбора электрической плиты на основании ее статических и динамических характеристик. В качестве входа будем рассматривать номер положения регулятора мощности плиты (N), а в качестве выхода — температуру конфорки (T). Тогда для множества плит можно построить их статические и динамические характеристики (рис. 5.2).

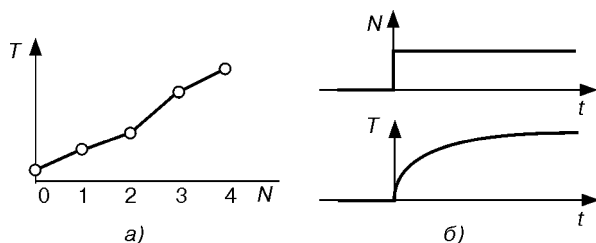


Рис. 5.2. Статическая (а) и динамическая (б) характеристики электроплиты

5.2.4. Элементарные динамические звенья

При исследованиях динамики систем часто невозможно составить математическое описание всей системы сразу. Для облегчения этой задачи систему разбивают на отдельные элементы и для каждого из них составляют дифференциальные уравнения, которые записываются на основе соответствующих физических законов. Для отображения динамических свойств элементов системы независимо от их физической природы используют понятие *динамического звена*. Динамическое звено — это часть системы или элемента, описываемая

определенным дифференциальным уравнением. Динамическим звеном можно представить элемент, совокупность элементов, автоматическую систему в целом.

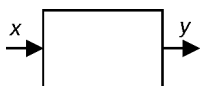


Рис. 5.3. Элементарное динамическое звено

Любую динамическую систему можно условно разложить на динамические «атомы» — *элементарные динамические звенья*. Упрощенно элементарным динамическим звеном можно считать звено с одним входом и одним выходом (рис. 5.3).

Элементарное звено должно быть звеном *направленного действия*: звено передает воздействие только в одном направлении — с входа на выход, так что изменение состояния звена не влияет на состояние предшествующего звена, работающего на вход. Поэтому при разбиении системы на звенья направленного действия *математическое описание каждого звена может быть составлено без учета связей его с другими звеньями*. Соответственно математическое описание всей системы в целом может быть получено как совокупность независимых друг от друга уравнений или характеристик отдельных звеньев, образующих систему, дополненных уравнениями связи между звеньями.

Дифференциальные уравнения элементов имеют порядок не выше второго, поэтому типовые звенья описываются дифференциальными уравнениями нулевого, первого и второго порядка. Таким образом, разновидностей элементарных динамических звеньев немного, и все многообразие конструктивных элементов схем с точки зрения общности их динамических характеристик можно свести к небольшому числу эквивалентных им звеньев. Для линейных систем можно выделить ограниченную совокупность элементарных динамических звеньев, которых образуют своего рода «таблицу Менделеева» динамики.

Все звенья различают по виду уравнений, определяющих характеристики переходных процессов, возникающих в них при одинаковых исходных условиях и одинаковом виде возмущения.

Для оценивания поведения элементарного звена обычно на его вход подают тестовые сигналы определенной формы. Наиболее часто используются такие виды возмущающих сигналов.

1. *Ступенчатое воздействие* (рис. 5.4, а):

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ a & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

Частным случаем ступенчатого воздействия является *единичное воздействие*, которое описывается так называемой *единичной функцией*

$x(t) = 1(t)$:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$$

2. *Импульсное воздействие* (единичный импульс или дельта-функция) $x(t) = \delta(t)$ (рис. 5.4, б):

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases}$$

Следует заметить, что $\delta(t)$ и единичная ступенчатая функция связаны соотношением

$$\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}.$$

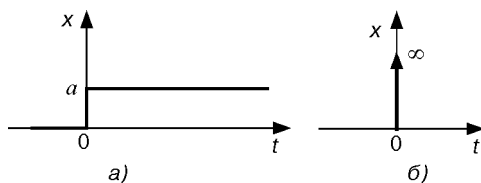


Рис. 5.4. Воздействия: а — ступенчатое; б — импульсное

3. *Периодический сигнал*: либо в виде синусоиды, либо в виде прямоугольной волны.

5.2.5. Виды типовых звеньев и их переходные функции

Воздействие на вход системы вызывает изменение ее выхода $y(t)$ — переходный процесс, именуемый *переходной функцией*.

☑ **Переходная (временная) функция** — это реакция выходной переменной звена на изменение входа.

В дальнейшем мы будем рассматривать типовые звенья и характер изменения их выходов при единичном ступенчатом возмущении. В частности, будем анализировать такие динамические характеристики каждого звена: дифференциальное уравнение, его описывающее, его частное решение и переходную функцию звена при единичном воздействии — *кривую разгона* $h(t)$. Таким образом, $h(t) = y(t)$ при $x(t) = 1(t)$.

В случае импульсного возмущения переходная характеристика называется *весовой* или *импульсной переходной функцией* и обозначается $g(t)$, т.е. $g(t) = y(t)$ при $x(t) = \delta(t)$; при этом

$$g(t) = h'(t) = \frac{dh}{dt}.$$

Обычно при исследовании динамики значения выхода и входа рассматривают не в абсолютных значениях, а в отклонениях от некоторых установившихся значений, т. е. в начальном установившемся режиме $x(0) = 0$ и $y(0) = 0$.

Безынерционное звено (усилительное, беземкостное, масштабирующее или пропорциональное) описывается уравнением

$$y(t) = kx(t),$$

где k — коэффициент пропорциональности или усиления (здесь и во всех последующих уравнениях).

Переходная функция звена (его реакция на единичное ступенчатое воздействие на вход) представлена на рис. 5.5, а.

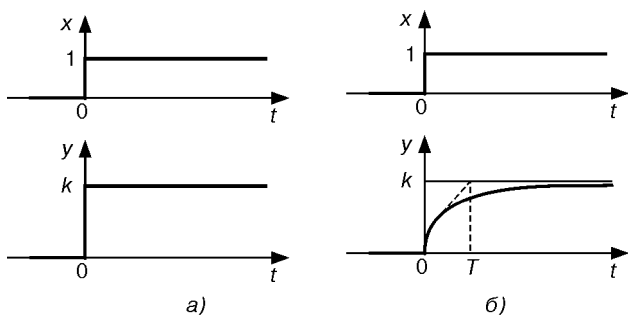


Рис. 5.5. Реакция безынерционного (а) и инерционного (б) звеньев

Примеры. 1. Газовая плита: при повороте ручки регулировки расхода газа практически мгновенно устанавливается новая температура пламени.

2. Швейная машина: при повороте ее колеса практически мгновенно иглолка займет новое положение.

Инерционное звено (апериодическое, емкостное, релаксационное) описывается дифференциальным уравнением

$$Ty'(t) + y(t) = kx(t).$$

При возмущении звена единичным ступенчатым воздействием его переходный процесс описывается уравнением

$$y(t) = kx(t)(1 - e^{-t/T}),$$

где T — постоянная времени, определяемая емкостью звена и его пропускной способностью.

☒ **Постоянная времени** — это условное время изменения выходной величины от начального значения до нового установившегося значения, если бы изменение происходило с постоянной и максимальной скоростью.

Переходная функция звена представлена на рис. 5.5,б. Скорость изменения функции характеризуется ее производной. Поскольку графически производная в заданной точке определяется как тангенс угла наклона касательной в этой точке, то T можно определить, проведя касательную к точке наибольшей крутизны кривой разгона от оси времени до асимптоты — установившегося значения выходной переменной y (линии, к которой y стремится). Постоянную времени можно определить и как время, за которое выходная переменная достигнет 63 % своей установившейся величины: при $t = T$ получаем

$$y(t) = k(1 - e^{-1}) = k(1 - 0,37) = 0,63k.$$

Примеры. 1. Электрическая плита: при повороте ручки регулировки мощности температура конфорки будет устанавливаться с динамическим запаздыванием, аналогично переходной функции на рис. 5.2,б.

2. При увеличении затрат на рекламу какого-либо товара новый устойчивый спрос на этот товар устанавливается также с динамическим запаздыванием.

Дифференцирующее звено. Идеальное (безынерционное) дифференцирующее звено описывается дифференциальным уравнением

$$y(t) = kx'(t).$$

Переходная функция звена представлена на рис. 5.6,а. Во всех точках, кроме нулевой, значение y равно нулю; в нулевой точке y за бесконечно малое время «успевает» увеличиться до бесконечности и вернуться в ноль. Такого, конечно, в реальной жизни быть не может, поэтому рассмотрим «реальный» вариант дифференцирующего звена — реальное дифференцирующее звено.

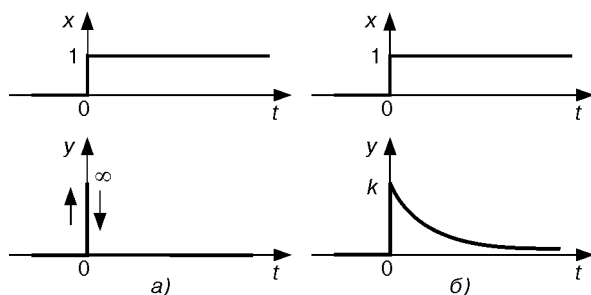


Рис. 5.6. Реакция идеального (а) и реального (б) дифференцирующих звеньев

Реальное дифференцирующее звено описывается дифференциальным уравнением, в котором, в отличие от реального звена, дополнительно появляется инерционный член $Ty'(t)$:

$$Ty'(t) + y(t) = kx'(t).$$

При возмущении звена единичным ступенчатым воздействием переходный процесс в звене описывается уравнением

$$y(t) = kx(t)e^{-t/T}.$$

Переходная функция звена представлена на рис. 5.6, б. Реальное дифференцирующее звено не является элементарным — его можно заменить соединением двух звеньев: идеального дифференцирующего и инерционного:

$$\begin{cases} z = kx'; \\ Ty' + y = kz. \end{cases}$$

Пример. Рассмотрим связь спроса и цены на товар повседневного спроса, например хлеб. При повышении цены на товар в первый же момент произойдет спад спроса на некоторую величину, но в дальнейшем он будет повышаться практически до первоначального уровня.

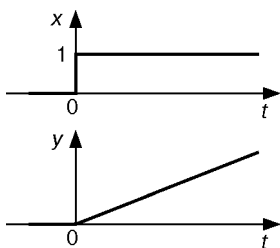


Рис. 5.7. Реакция интегрирующего звена

Интегрирующее звено (астатическое, нейтральное) описывается дифференциальным уравнением

$$y'(t) = kx(t).$$

Переходный процесс в звене описывается решением этого уравнения:

$$y(t) = k \int_0^t x(\tau) d\tau,$$

при $x(t) = 1(t)$ получаем $y(t) = kt$. Переходная функция звена представлена на рис. 5.7.

Примеры. 1. Изменение уровня в емкости при несбалансированности прихода и расхода жидкости.

2. Изменение количества товара на складе при неравенстве его поступления и отпуска.

Колебательное звено в общем виде описывается следующим уравнением:

$$T_1^2 y''(t) + T_2 y'(t) + y(t) = kx(t).$$

Колебательное звено получается при наличии в нем двух емкостных элементов, способных запасать энергию двух видов и взаимно обмениваться этими запасами. Если в процессе колебаний запас энергии, полученный звеном в начале возмущения, уменьшается, то колебания затухают, т. е. имеем колебательное звено с затуханием (рис. 5.8, а). При этом $T_2^2 - 4T_1^2 < 0$ (т. е. корни характеристического уравнения $T_1^2 \lambda^2 + T_2 \lambda + 1 = 0$ — комплексные), и колебательный

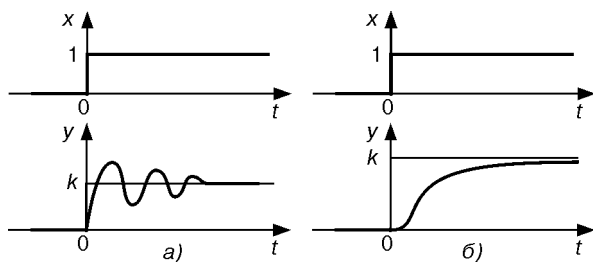


Рис. 5.8. Реакция колебательного звена с затуханием (а) и инерционного звена второго порядка (б)

процесс описывается уравнением

$$y(t) = kx(t) \left[1 - \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \left(\beta t + \arctg \frac{\beta}{\alpha} \right) \right],$$

где $\alpha = -\frac{T_2}{2T_1^2}$, $\beta = \frac{\sqrt{4T_1^2 - T_2}}{2T_1^2}$.

Если $T_2^2 - 4T_1^2 \geq 0$, то характеристическое уравнение имеет вещественные корни и вместо колебательного звена получается *апериодическое звено второго порядка* (рис. 5.8,б) с переходным процессом

$$y(t) = kx(t) \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2} \right).$$

Апериодическое звено второго порядка представляет собой последовательное соединение двух апериодических звеньев первого порядка.

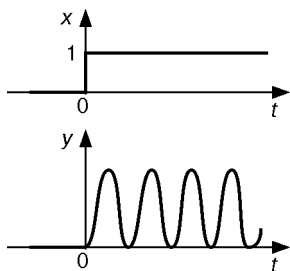


Рис. 5.9. Реакция консервативного звена

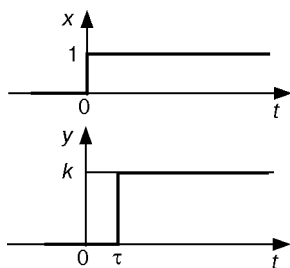


Рис. 5.10. Реакция звена чистого запаздывания

При $T_2 = 0$ получаем консервативное звено с незатухающими колебаниями (рис. 5.9).

Звено чистого (транспортного) **запаздывания** повторяет по

форме входной сигнал, но с запаздыванием по времени (рис. 5.10):

$$y(t) = kx(t - \tau),$$

где τ — время запаздывания.

5.3. Пространство состояний

Поскольку свойства системы выражаются значениями ее выходов, то **состояние системы** можно определить как вектор значений выходных переменных $Y = (y_1, \dots, y_m)$. Выше говорилось (см. разд. 5.1.1), что среди составляющих вектора Y , кроме непосредственно выходных переменных, имеются и производные от них.

Поведение системы (ее процесс) можно изображать разными способами. Например, при m выходных переменных могут быть следующие формы изображения процесса:

- в виде таблицы значений выходных переменных для дискретных моментов времени t_1, t_2, \dots, t_k ;
- в виде m графиков в координатах $y_i - t$, $i = 1, \dots, m$;
- в виде графика в m -мерной системе координат.

Остановимся на последнем случае. В m -мерной системе координат каждой точке соответствует определенное состояние системы.

✓ *Множество возможных состояний системы Y ($Y \in Y$) рассматривают как **пространство состояний** (или **фазовое пространство**) системы, а координаты этого пространства называют **фазовыми координатами**.*

В фазовом пространстве каждый его элемент полностью определяет состояние системы.

✓ *Точка, соответствующая текущему состоянию системы, называется **фазовой**, или **изображающей**, **точкой**.*

✓ ***Фазовая траектория** — это кривая, которую описывает фазовая точка при изменении состояния невозмущенной системы (при неизменных внешних воздействиях).*

✓ *Совокупность фазовых траекторий, соответствующих всевозможным начальным условиям, называется **фазовым портретом**.*

Фазовый портрет фиксирует только направление скорости фазовой точки и, следовательно, отражает лишь качественную картину динамики.

Построить и наглядно представить фазовый портрет можно только на плоскости, т. е. когда фазовое пространство является двухмерным. Поэтому метод фазового пространства, который в случае двух-

мерного фазового пространства называется *методом фазовой плоскости*, эффективно используется для исследования систем второго порядка.

☑ **Фазовой плоскостью** называется координатная плоскость, в которой по осям координат откладываются какие-либо две переменные (фазовые координаты), однозначно определяющие состояние системы.

☑ **Неподвижными (особыми или стационарными)** называются точки, положение которых на фазовом портрете с течением времени не изменяется. Особые точки отражают положения равновесия.

Использование фазовой плоскости вполне оправдано, поскольку состояние системы как минимум определяется двумя переменными: значением выходной координаты системы и скоростью ее изменения. В дальнейшем будем считать, что на оси абсцисс фазовой плоскости откладываются значения выходной координаты $y_1 = y$, а на оси ординат — скорость ее изменения $y_2 = y'$ (рис. 5.11). Тогда для фазовых траекторий *невозмущенной системы* справедливы следующие свойства:

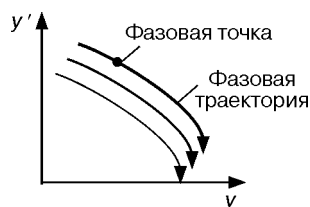


Рис. 5.11. Пример фазового портрета

- через одну точку фазовой плоскости проходит только одна траектория;
- в верхней полуплоскости изображающая точка движется слева направо, а в нижней — соответственно наоборот;
- на оси абсцисс производная $dy_2/dy_1 = \infty$ всюду, за исключением точек равновесия, поэтому фазовые траектории пересекают ось абсцисс (в неособых точках) под прямым углом.

Линейная система имеет единственную особую точку — начало координат. Нелинейные системы характеризуются большим разнообразием фазовых портретов — они могут иметь несколько особых точек.

5.4. Устойчивость динамических систем

Устойчивость характеризует одну из важнейших черт поведения систем и является фундаментальным понятием, используемым в физике, биологии, технике, экономике, а также кибернетике. Понятие устойчивости применяется для описания постоянства какой-либо черты поведения системы, понимаемого в весьма широком смысле. Это может быть постоянство состояния системы (его неизменность

во времени) или постоянство некоторой последовательности состояний, «пробегаемых» системой в процессе ее движения, или постоянство числа определенного биологического вида, живущего на земном шаре, и т. п.

✓ *Под **устойчивостью** понимается свойство системы возвращаться к равновесному состоянию или циклическому режиму после устранения возмущения, вызвавшего нарушения последних.*

Устойчивость есть категория, относящаяся, прежде всего, к собственным движениям системы, порождаемым начальными условиями (возмущениями) и внутренними свойствами системы, но не внешними воздействиями.

Состояние равновесия, в которое система способна возвращаться, называют *устойчивым состоянием равновесия*.

✓ ***Состояние устойчивости (устойчивое состояние)** — это такое равновесное состояние системы, в которое она возвращается после снятия возмущающих воздействий.*

Устойчивость в экономических системах, несмотря на кажущуюся аналогию с техническими, — гораздо более сложное понятие. Поэтому использовать это понятие для экономических систем можно только условно, в основном для предварительного описания их поведения.

Об устойчивости и всевозможных движениях системы можно судить по фазовому портрету. Фазовый портрет в окрестности произвольной неподвижной точки принадлежит одному и только одному из трех типов точек:

- 1) *асимптотически устойчивой;*
- 2) *нейтрально устойчивой;*
- 3) *неустойчивой.*

Точная и строгая формулировка понятия устойчивости применительно к состоянию равновесия динамической системы была дана выдающимся русским ученым А.М. Ляпуновым [1].

✓ ***Неподвижная точка системы** **а** называется **устойчивой** (или **аттрактором**), если для любой окрестности N точки **а** существует некоторая меньшая окрестность этой точки $N' \subset N$, такая, что любая траектория, проходящая через N' , остается в N при возрастании t .*

В более широком понятии аттрактор определяется следующим образом:

✓ ***Аттрактор** (от лат. *attraho* — притягиваю к себе) — область устойчивости, куда стремятся траектории в фазовом пространстве.*

Аттракторы могут быть обычными точками в фазовом пространстве, а могут иметь более сложную топологию, являясь, к примеру, замкнутыми кривыми (так называемыми *предельными циклами*).

✓ *Неподвижная точка системы а называется асимптотически устойчивой, если она устойчива и, кроме того, существует такая окрестность N точки, где любая траектория, проходящая через N , стремится к а при $t \rightarrow \infty$.*

Любая асимптотически устойчивая неподвижная точка устойчива. Но не каждая устойчивая неподвижная точка является асимптотически устойчивой.

✓ *Неподвижная точка системы, которая устойчива, но не асимптотически устойчива, называется нейтрально устойчивой.*

✓ *Неподвижная точка системы, которая не является устойчивой, называется неустойчивой (или репеллером).*

✓ *Репеллер (от лат. *repello* — отталкиваю, отгоняю) — область в фазовом пространстве, где траектории, даже начинающиеся очень близко от особой точки, отталкиваются от нее.*

Это значит, что существует такая окрестность N неподвижной точки, что для любой окрестности $N' \subset N$ имеется по крайней мере одна траектория, которая проходит через N' и не остается в N .

Резюме

1. *Состояние системы* в определенный момент времени — это множество ее существенных свойств в этот момент времени.

2. Различают состояние входов системы, ее внутреннее состояние и состояние выходов. Поскольку внутреннее состояние практически ненаблюдаемо, то его можно оценивать по *состоянию выходов* (значениям выходных переменных) системы. При этом в качестве координат, отражающих состояние системы, могут выступать не только сами выходные переменные, но и характеристики их изменения: скорость, ускорение и т. д.

3. Последовательную смену состояний будем называть *процессом*.

4. В зависимости от того, изменяется ли состояние системы со временем, различают *статические* системы, не изменяющие свое состояние, и *динамические* системы, изменяющие свое состояние.

5. Важной характеристикой системы является ее *функция*, которая рассматривается, с одной стороны, как назначение, с другой — как способ (правило, алгоритм) преобразования входной информации в выходную.

6. Процесс реализации системой своих функций называют *функционализацией*.

7. Если функция системы практически не изменяется со временем, то ее считают *стационарной*. Для нее *реакция на одно и то же воздействие не зависит от момента приложения этого воздействия*. Если функция системы изменяется со временем, то ее считают *нестационарной*.

8. Динамическая система может находиться в одном из трех характерных режимов: *равновесном, переходном и периодическом*.

9. По признаку учета зависимости объекта моделирования от времени различают *статические* и *динамические* характеристики систем, отражаемые в соответствующих моделях.

10. *Статическая характеристика* показывает зависимость между входной и выходной величинами в установившемся режиме, а *динамическая* — реакцию системы на возмущение (зависимость изменения выходных переменных от входных и времени).

11. Для отражения динамических свойств элементов системы независимо от их физической природы используют понятие *динамического звена*. Динамика линейной системы любой природы может включать в себя элементарные динамические процессы, которые можно представить в виде следующих элементарных динамических звеньев: безынерционное, инерционное, дифференцирующее, интегрирующее, колебательное и звено чистого запаздывания.

12. Поведение динамической системы можно изображать: в виде таблицы значений выходных переменных для дискретных моментов времени; в виде множества графиков, показывающих процесс изменения выходных переменных во времени; в виде графика (фазовой траектории) в пространстве состояний (фазовом пространстве).

13. Важной характеристикой динамических систем является *устойчивость*, которая понимается как свойство системы возвращаться к равновесному состоянию или циклическому режиму после устранения возмущения, вызвавшего нарушения последних.

Литература

1. *Лернер А.Я.* Начала кибернетики. — М.: Наука, 1967. — 400 с.
2. *Мантуров О.В.* и др. Толковый словарь математических терминов. — М.: Просвещение, 1965. — 539 с.
3. Математические модели в госуправлении — http://distance.ru/files/umk/mat_model_gos/mat_model_gos08.html.
4. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ. — М.: Выш. шк., 1989. — 367 с.
5. Системный анализ и структуры управления / Под ред. *В.Г. Шорина*. — М.: Знание, 1975. — 303 с.
6. Философский словарь. / Под ред. *М.М. Розенталя*. — М.: Политиздат, 1972. — 496 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение состояния системы.
2. Как можно оценить внутреннее состояние системы?
3. Дайте определение процесса.
4. Как можно описать процесс?
5. Дайте определение:
 - а) статической системы;
 - б) динамической системы.
6. Дайте определение понятия «функция».
7. Расположите функции по возрастающим рангам в зависимости от степени воздействия на внешнюю среду и характера взаимодействия с другими системами.
8. Нарисуйте графическую модель «черного ящика».
9. Что понимается под функционированием?
10. Покажите математическую модель функционирования.
11. Дайте определение:
 - а) стационарной системы;
 - б) нестационарной системы.
12. В чем заключаются причины нестационарности?
13. Как проявляется нестационарность в математических моделях?
14. В каких режимах может находиться динамическая система?
15. Дайте определение:
 - а) состояния равновесия;
 - б) переходного режима;
 - в) периодического режима.
16. Что описывает модель статики системы?
17. Приведите пример статической характеристики.
18. Что описывает модель динамики системы?
19. Приведите пример динамической характеристики.
20. Приведите примеры моделей динамической системы.
21. Дайте определение переходного процесса.
22. Перечислите виды возмущающих сигналов, используемых при исследовании динамических характеристик системы.
23. Дайте определение переходной функции.
24. Напишите уравнение и приведите примеры:
 - а) безынерционного звена;
 - б) инерционного звена;
 - в) идеального дифференцирующего звена;
 - г) реального дифференцирующего звена;
 - д) интегрирующего звена;
 - е) колебательного звена;
 - ж) звена чистого запаздывания;
 - з) инерционного звена второго порядка.
25. Изобразите переходные функции для всех видов звеньев при ступенчатом воздействии.
26. Перечислите формы отображения переходных процессов.
27. Дайте определение:
 - а) пространства состояний;
 - б) фазовой точки;
 - в) фазовой траектории;
 - г) фазового портрета;

- д) особой точки.
- 28. Перечислите свойства фазовых траекторий.
- 29. Изобразите пример:
 - а) равновесного режима в пространстве состояний;
 - б) переходного режима в пространстве состояний;
 - в) периодического режима в пространстве состояний.
- 30. Что понимается под устойчивостью?
- 31. Объясните понятие «состояние устойчивости».
- 32. Что мы называем устойчивым состоянием равновесия?
- 33. Какую неподвижную точку мы называем устойчивой?
- 34. Какую неподвижную точку мы называем асимптотически устойчивой?
- 35. Какую неподвижную точку мы называем нейтрально устойчивой?
- 36. Дайте определение аттрактора.
- 37. Дайте определение репеллера.
- 38. Какую неподвижную точку мы называем неустойчивой?
- 39. В чем отличие устойчивости линейных и нелинейных систем?

Г Л А В А 6

Общесистемные закономерности

Первоначально необходимо определиться с понятием «закономерность». Если закон абсолютен и не допускает никаких исключений, то закономерность менее категорична.

☒ ***Закономерностью** называют часто наблюдаемое, типичное свойство (связь или зависимость), присущее объектам и процессам, которое устанавливается опытом.*

Для нас наибольший интерес представляет общесистемная закономерность.

☒ ***Общесистемные закономерности** — это закономерности, характеризующие принципиальные особенности построения, функционирования и развития сложных систем.*

Эти закономерности присущи любым системам, будь то экономическая, биологическая, общественная, техническая или другая система.

6.1. Закономерности взаимодействия части и целого

6.1.1. Эмерджентность

При объединении элементов в систему наблюдается явление эмерджентности.

☒ ***Эмерджентность** (от англ. *emergence* — возникновение, появление нового) — это возникновение в системе новых интегративных качеств, не свойственных ее компонентам.*

Эмерджентность является одной из форм проявления диалектического закона перехода количественных изменений в качественные (о том, что объединение элементов создает новое качество, человечество знало давно, еще со времен Аристотеля). Чем проще система, чем из меньшего числа элементов и связей она состоит, тем меньше проявляет она системное качество, и чем сложнее система, тем более

непохожим является ее системный эффект по сравнению со свойствами каждого элемента [19].

Из данной закономерности следует важный практический вывод: *невозможно предсказать свойства системы в целом, разбирая и анализируя ее по частям!*

Кроме эмерджентных свойств, у системы сохраняются отдельные свойства, свойственные ее элементам.

Пример. Вес системы равен весу ее элементов.

6.1.2. Целостность

Более общей закономерностью, чем эмерджентность, является целостность.

☒ Если изменение в одном элементе системы вызывает изменения во всех других элементах и в системе в целом, то говорят, что система ведет себя как **целостность** или как некоторое связанное образование.

Целостность возникает благодаря *связям* в системе, которые осуществляют перенос (передачу) свойств каждого элемента системы ко всем остальным элементам.

Предельным случаем целостности является *абсолютная целостная система*. Благодаря абсолютно жестким связям такая система может находиться только в одном состоянии, поэтому энтропия ее равна нулю. Абсолютно жесткие связи предполагают передачу свойств от элемента к элементу без потерь (с максимально возможным коэффициентом передачи: $k = 1$). Тогда воздействие на любой элемент системы тождественно отразится во всех элементах и в системе в целом.

В реальных системах связи между элементами не являются абсолютно жесткими ($k < 1$), из-за чего система может находиться в нескольких состояниях. В этом случае воздействие на элемент системы отразится во всех элементах и в системе в целом, но с неким «затуханием».

Следствием целостности является наличие *побочных эффектов* как положительных, так и отрицательных. Когда осуществляется какое-либо изменение в одной части системы, его влияние распространяется в разные стороны, подобно кругам на воде от брошенного в нее камня; поэтому *действия в пределах системы не могут быть ограничены только отдельной ее частью*. Ярким примером является воздействие лекарств на организм: нет такого лекарства, которое, кроме положительного воздействия на больной орган, не имело бы побочных эффектов его применения для других частей организма (иногда положительных, но чаще отрицательных).

К важным аспектам целостности следует отнести соотношение свойств системы с суммой свойств составляющих ее элементов: свойства системы Q_S не являются простой суммой свойств составляющих ее элементов (частей) q_i [4]*:

$$Q_S \neq Q_\Sigma,$$

где $Q_\Sigma = \sum_{i=1}^n q_i$.

Объединенные в систему элементы, как правило, *утрачивают часть своих свойств* (вернее сказать, утрачивают способность проявлять часть своих свойств), присущих им вне системы (Q^-), т. е. система как бы подавляет ряд свойств элементов; но, с другой стороны, элементы, попав в систему, получают возможность проявить свои потенциальные свойства, которые не могли быть проявлены вне системы, т. е. они как бы *приобретают новые свойства* (Q^+):

$$Q_S = (Q_\Sigma \setminus Q^-) \cup Q^+.$$

Примеры. 1. Из электронных деталей может быть построена система управления светофором. Полученная система обладает новыми свойствами по сравнению со свойствами отдельно взятых элементов, но и элементы утрачивают при объединении в систему часть своих свойств. Транзистор мог бы использоваться в устройствах для усиления высокочастотных электрических колебаний и качественного воспроизведения звуков в радиоприемниках, телевизорах и т. п. Однако, став элементом системы управления светофором, он «утратил» эти возможности и сохранил только свойство работать в режиме переключения.

2. Человек с хорошими вокальными данными, попав на работу в бухгалтерию, «теряет» это свойство. И напротив, руководитель, живший и работавший вне коллектива, не имел возможности проявить свои менеджерские свойства, а «приобрел» их, только попав в коллектив.

В связи с вышесказанным может показаться, будто свойства системы вообще не зависят от свойств элементов. На самом деле это не так: свойства системы зависят от свойств составляющих ее элементов [4]:

$$Q_S = f(q_i).$$

Пример. Если в светофоре транзистор или другой элемент вышел из строя или был поставлен датчик с другой чувствительностью, то либо система управления светофором вообще перестанет существовать и выполнять свои функции, либо, по крайней мере, сменятся ее характеристики. Аналогично замена элементов в организационной структуре системы управления предприятием может существенно повлиять на качество его функционирования [4].

* Еще Аристотель в Древней Греции сформулировал закономерность целостности: «Сумма свойств частей не есть свойство целого» [3].

6.1.3. Аддитивность

Противоположный случай — поведение объекта, состоящего из совокупности частей, совершенно не связанных между собой; здесь изменение в каждой части зависит только от самой этой части. Такое свойство называют **физической аддитивностью, суммативностью, независимостью, обособленностью**.

☑ Если изменения в системе представляют собой сумму изменений в ее отдельных частях, то такое поведение называется **обособленным, или физически суммативным**.

Свойство физической аддитивности проявляется у системы, как бы распавшейся на независимые элементы; тогда становится справедливым равенство [4]:

$$Q_S = \sum_{i=1}^n q_i.$$

В этом крайнем случае, когда ни о какой системе говорить уже нельзя, мы получаем некоторую вырожденную систему. Если считать элементы системы неделимыми, то энтропия аддитивного образования достигает максимума.

6.1.4. Синергизм

Синергизм (от греч. сотрудничество, содействие) проявляется в виде **мультипликативного** эффекта при однонаправленных действиях. Мультипликативность отличается от аддитивности тем, что отдельные эффекты не суммируются, а перемножаются.

Примеры. 1. Пусть система имеет два входа (x_1 и x_2) и один выход y , тогда аддитивный эффект описывается уравнением $y = a_1x_1 + a_2x_2$, а мультипликативный — уравнением $y = ax_1x_2$.

2. В медицине часто можно наблюдать явление, когда комбинированное действие лекарственных веществ на организм превышает действие, оказываемое каждым компонентом в отдельности.

3. В экономике доходы от совместного использования ресурсов превышают сумму доходов от использования тех же ресурсов по отдельности.

6.1.5. Прогрессирующая изоляция и прогрессирующая систематизация

Поскольку абсолютная целостность и абсолютная аддитивность не более чем абстракция, то реальные системы находятся где-то в промежуточной точке на оси целостность-аддитивность. Поскольку большинство реальных систем изменяется во времени, то их состояние в конкретный момент времени можно охарактеризовать тенденцией к изменению состояния в сторону целостности или аддитивности.

Для оценки этих тенденций американский ученый А. Холл ввел две сопряженные закономерности [22, 23], которые он назвал:

- *прогрессирующая факторизация* — стремление системы к состоянию со все более независимыми элементами;
- *прогрессирующая систематизация* — стремление системы к уменьшению самостоятельности элементов, т. е. к большей целостности.

☑ *Если изменения в системе приводят к постепенному переходу от целостности к суммативности, то говорят, что система подвержена прогрессирующей изоляции (факторизации).*

Прогрессирующая изоляция может носить как прогрессивный (развивающий) характер, так и деструктивный. В связи с этим различают два типа прогрессирующей изоляции [18]:

- 1) распад системы на независимые части с потерей общесистемных свойств;
- 2) изменения в направлении возрастающего деления на подсистемы с увеличением их самостоятельности или в направлении возрастающей дифференциации функций, что характерно для систем, включающих в себя некоторый творческий рост или процессы эволюции и развития.

Примеры. 1. Эмбриональное развитие, при котором зародыш проходит путь от целостности до такого состояния, когда он ведет себя как совокупность частей, независимо развивающихся в специальные органы.

2. При развитии таких технических систем, как телефонная сеть или автоматизированные системы управления, в соответствии с определенным замыслом происходит разделение на подсистемы, конструирование и развитие которых впоследствии осуществляются относительно независимо.

☑ *Прогрессирующая систематизация — это, в противоположность прогрессирующей изоляции, процесс, при котором изменение системы идет в сторону целостности.*

Прогрессирующая систематизация может состоять в усилении ранее существовавших связей между частями системы, появлении и развитии новых связей между ранее не связанными между собой элементами или подсистемами, добавлении в систему новых элементов.

Прогрессирующая изоляция и прогрессирующая систематизация не являются взаимоисключающими явлениями — они могут проходить в системе одновременно или протекать последовательно, сменяя друг друга.

Пример. В начале колонизации Америки группы людей из разных стран колонизировали различные ее области, и эти группы становились все более и более независимыми. В последующем стал усиливаться обмен, было образовано общее правительство, и новая страна становилась все более целостной [18].

6.1.6. Изоморфизм и изофункционализм

Изоморфизм — это сходство объектов по форме или строению. Это означает, что системы, рассматриваемые отвлеченно от природы составляющих их элементов, являются *изоморфными* друг другу, если каждому элементу одной системы соответствует лишь один элемент второй и каждой связи в первой системе соответствует связь в другой и наоборот [21]*.

Если ввести в описание систем в качестве параметра время, т. е. рассматривать их в динамике, то понятие изоморфизма можно расширить до так называемого *изофункционализма* и с его помощью сопоставлять сходные процессы (физические, химические, производственные, экономические, социальные, биологические и др.)**.

Отсюда следует общесистемная закономерность: *системы, находящиеся между собой в состоянии изоморфизма и изофункционализма, имеют сходные системные свойства.*

Примеры. 1. Из периодической системы Д.И. Менделеева следует, что химические элементы со сходной структурой имеют схожие свойства.

2. Многие процессы в химии, экономике, биологии и других областях описываются экспоненциальными зависимостями от времени. В связи с этим следует ожидать сходных реакций таких систем на однотипные возмущения.

Возможность моделировать сложные системы любой природы с помощью средств вычислительной техники с соответствующим программным обеспечением позволяет считать такой программно-технический комплекс изоморфным и изофункциональным любой системе.

6.2. Закономерности иерархической упорядоченности систем

Иерархическая упорядоченность мира была осознана уже в Древней Греции. Такая упорядоченность наблюдается на любом уровне развития Вселенной: химическом, физическом, биологическом, социальном [18].

☒ **Иерархия** — это соподчиненность, любой согласованный по подчиненности порядок объектов.

Термин первоначально возник как наименование «служебной лестницы» в религии, потом он стал широко применяться для характеристики взаимоотношений в аппарате управления государством, армией и т. д. В настоящее время, говоря об иерархии, имеют в виду

* Если однозначное соответствие имеется только в одну сторону, то говорят о *гомоморфизме*.

** Интересные рассуждения о равенстве и подобии систем можно посмотреть у В.А. Карташева [7].

любой согласованный по подчиненности порядок объектов, порядок подчинения низших по должности и чину лиц высшим в социальных организациях, при управлении предприятием, регионом, государством и т. п.

Группа закономерностей иерархической упорядоченности систем тесно связана с закономерностью целостности; кроме того, большое внимание направлено на взаимодействие системы с ее окружением, со средой, надсистемой, с подчиненными системами.

К этой группе закономерностей относится *коммуникативность* и *иерархичность* [4].

6.2.1. Коммуникативность

Любая система не изолирована от других систем, но связана множеством коммуникаций с окружающей средой, которая представляет собой сложное и неоднородное образование, содержащее (рис. 6.1):

- *надсистему* (систему более высокого порядка, задающую требования и ограничения рассматриваемой системе);
- *элементы или подсистемы* (нижележащие, подведомственные системы);
- *системы одного уровня с рассматриваемой*.

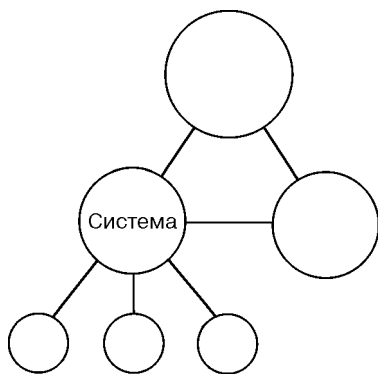


Рис. 6.1. Связи системы с надсистемой, подсистемами и системами равного уровня

☑ Такое сложное единство системы со средой названо **закономерностью коммуникативности**.

В силу закономерности коммуникативности каждый уровень иерархической упорядоченности имеет сложные взаимоотношения с вышестоящим и нижележащим уровнями. Отсюда следует, что каждый уровень иерархии как бы обладает свойством «двуликого Януса»:

- «клик», направленный в сторону нижележащего уровня, имеет характер автономного целого — системы;
- «клик», направленный в сторону вышестоящего уровня, проявляет свойства зависимой части — элемента вышестоящей системы.

6.2.2. Иерархичность

Закономерность иерархичности заключается в том, что любую систему можно представить в виде иерархического образования. При

этом на всех уровнях иерархии действует закономерность *целостности*. Более высокий иерархический уровень объединяет элементы нижестоящего и оказывает на них направляющее воздействие. В результате подчиненные члены иерархии приобретают новые свойства, отсутствовавшие у них в изолированном состоянии. А возникшее в результате объединения нижестоящих элементов новое целое приобретает способность осуществлять новые функции (проявляется закономерность эмерджентности), в чем и состоит цель образования иерархий. Эти особенности иерархических систем наблюдаются как на биологическом уровне развития Вселенной, так и в социальных организациях, при управлении предприятием, объединением или государством, а также при представлении замысла проектов сложных технических комплексов и т. п.

Использование иерархических представлений оказывается полезным в случае исследования систем и проблемных ситуаций с большой неопределенностью. При этом происходит как бы расчленение «большой» неопределенности на более «мелкие», лучше поддающиеся исследованию. Даже если эти мелкие неопределенности не удастся полностью раскрыть и объяснить, то все же иерархическое упорядочение частично снимает общую неопределенность и обеспечивает, по крайней мере, более эффективное управляющее решение.

Пример. Перед специалистом ставится задача: оценить спрос на компьютеры в следующем году в городе N. На первый взгляд задача кажется очень трудной — слишком много неопределенностей. Однако разобьем задачу на подзадачи: оценить потребность в компьютерах различных секторов потребителей (коммерческие организации, гоструктуры, студенты, школьники, другие частные лица). В отношении каждого из секторов задача уже не кажется такой безнадежной — даже не обладая полнотой информации, можно оценить потребность в компьютерах. Далее каждый из секторов можно разбить на подсектора и т. д.

6.3. Энтропийные закономерности

6.3.1. Понятие энтропии

Важную роль в системном анализе играет понятие *энтропии*, тесно связанное с информацией.

Понятие «энтропия» ввел в 1865 г. немецкий физик Р. Клаузиус как понятие физическое: энтропия в термодинамике — функция состояния термодинамической системы, характеризующая направленность тепловых процессов. Согласно принятому в термодинамике определению, *изменение энтропии некоторой системы равно отношению приращения (или уменьшения) количества теплоты к абсолютной температуре, при которой это приращение (или уменьшение) происходит.*

В системном анализе *энтропия* \mathcal{E} служит количественной мерой беспорядка (свободы, разнообразия) в системе и определяется числом допустимых состояний системы N_S [14]:

$$\mathcal{E} = \ln N_S.$$

Приведенная формула справедлива только для равновероятных состояний. Если же система может находиться в n состояниях — s_1, s_2, \dots, s_n — с вероятностями соответственно $p(s_1), p(s_2), \dots, p(s_n)$, то ее энтропия рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = - \sum_{i=1}^n p(s_i) \ln p(s_i).$$

Так как логарифм является безразмерной величиной, то и энтропия также безразмерная величина. С другой стороны, энтропия, как и информация*, может измеряться в битах, если формулах вместо натурального использовать двоичный логарифм.

Примеры. 1. Система с жесткой структурой (например, армейская) может находиться только в одном состоянии (в армии есть поговорка: «Из нас прав кто-нибудь один: или я, или никто»). Энтропия такой системы равна нулю ($\mathcal{E} = -\ln 1 = 0$).

2. Бюрократией называют систему, в которой почти не осталось разнообразия [1], поэтому энтропия такой системы предельно мала.

6.3.2. Открытые и закрытые системы.

Второе начало термодинамики

Как говорилось ранее, между системой и окружающей средой происходит обмен веществом, энергией и информацией. Причиной обмена является *неравновесное состояние системы* по отношению к окружающей среде — разность их свойств. Если свойства системы и окружающей среды идентичны, то система находится в равновесии — все обменные процессы прекращаются. Однако, несмотря на неравновесность, обменные процессы могут отсутствовать при естественном или искусственном их ограничении. В связи с этим рассматриваются понятия *открытой* и *закрытой* систем.

☒ **Открытая система** — это система, способная обмениваться с окружающей средой массой, энергией и информацией.

☒ **Закрытая, или замкнутая, система** лишена этой возможности, т. е. полностью изолирована от среды.

* Информацию иногда определяют как *негэнтропию*, которая представляет собой меру упорядоченности системы. С другой стороны, основоположник статистической физики Л. Больцман еще в XIX веке сказал, что «энтропия характеризует недостающую информацию» [13].

При этом возможны и частные случаи: например, в модели системы не учитываются гравитационные и энергетические процессы, а отражается только обмен информацией со средой; тогда говорят об *информационно-проницаемых* или соответственно *информационно-непроницаемых системах*.

Строго говоря, такая полная изоляция любой системы весьма условна в силу всеобщей взаимосвязи и взаимозависимости явлений и процессов в природе и обществе. Можно лишь условно считать, что доля взаимосвязей системы со средой пренебрежимо мала по сравнению с внутренними взаимосвязями системы.

Поэтому понятие закрытой системы следует рассматривать как своего рода *модель*. При отображении проблемной ситуации такой моделью условно принимается, что либо «входы» и «выходы» у системы отсутствуют, либо их состояния неизменны в рассматриваемый период времени.

Поведение закрытой системы определяется начальными условиями, характеристиками ее элементов и связей, структурой, внутренними закономерностями функционирования системы. Предметом исследования являются внутренние изменения, определяющие поведение системы. Внешние же управляющие или возмущающие воздействия рассматриваются как помехи.

В частности, одним из принципиальных отличий закрытых систем от открытых является тот факт, что они оперирует обычно понятием *цель* как внешним по отношению к системе, а в *открытых* — цели не задаются извне, а формируются внутри системы.

Для замкнутых систем справедливо ***второе начало (закон) термодинамики***, согласно которому ***энтропия замкнутой (изолированной) системы монотонно возрастает (не убывает) со временем*** ($\Delta S \geq 0$), вплоть до достижения максимального значения ($S_{\text{макс}}$) в конечном *равновесном* состоянии, когда число допустимых состояний системы максимально.

Возрастание энтропии в термодинамических системах говорит о переходе упорядоченной формы движения частиц в неупорядоченную, иначе тепловую. Превращение энергии упорядоченного движения в энергию хаотического движения называют ***диссипацией энергии*** (термин «диссипативный» является синонимом термина «необратимый»). Температура всех частей системы в состоянии равновесия одинакова. Термодинамическому равновесию системы соответствует состояние с максимумом энтропии. Энтропия же всех веществ при абсолютном нуле равна нулю.

Любая изолированная система стремится достичь ситуации, отвечающей наибольшему беспорядку, т. е. ситуации с максимальным значением энтропии. Однако в системе возможны *флуктуации*.

☒ **Флуктуации** — это случайные процессы, при которых система переходит из более вероятного состояния в менее вероятное.

При флуктуации энтропия системы уменьшается, т. е. закон возрастания энтропии выполняется только в среднем для достаточно большого промежутка времени.

В незамкнутых системах энтропия может как увеличиваться (например, при подводе тепла в термодинамическую систему извне), так и уменьшаться (например, при теплоотдаче в окружающую среду). Таким образом, в отличие от закрытых в открытых системах возможно снижение энтропии. Подобные системы могут сохранять свой высокий уровень организованности и даже развиваться в сторону увеличения порядка сложности. Для повышения организованности (снижения энтропии) системы применяют управление. Именно поэтому так важен хороший обмен информацией со средой для эффективного решения задач управления, т. е. в качестве противоположности энтропии выступает обратная ей по знаку величина — информация, действие которой выражается в тенденции к увеличению упорядоченности и уменьшению неопределенности. Нужно понимать, что информация не уничтожает энтропию, но способна компенсировать ее возрастание. Так, подставленная ладонь, препятствуя падению предмета, не уменьшает действие гравитационных сил (не отменяет закон всемирного тяготения), а только компенсирует его воздействие.

6.3.3. Принцип компенсации энтропии

Представление о том, какую «плату» приходится платить за уменьшение энтропии системы, дает принцип компенсации энтропии [15].

☒ **Принцип компенсации энтропии** гласит, что энтропия неизолированной системы может быть уменьшена только за счет компенсирующего увеличения энтропии в другой или других системах, взаимодействующих с данной.

На основе вышеизложенного можно утверждать, что прогресс не может быть общим для всех частей системы. По законам термодинамики снижение энтропии в одной части системы обязательно сопровождается повышением энтропии в другой части или окружающей среде. Поэтому невозможен всемирный прогресс и благоденствие, если мы не научимся отводить от планеты лишнюю энтропию (отходы) во внешнюю среду. Успехи развития одной группы людей (даже внутри одной семьи) или одного слоя общества, или одного государства и, следовательно, снижение их энтропии возможно только при одновременном повышении энтропии в других группах людей, в других

слоях общества, в других государствах или окружающей среде соответственно. Очевидно, что безэнтропийных процессов не бывает ни в природе, ни в обществе, аналогично тому, как не бывает безотходных технологий.

6.3.4. Закон «необходимого разнообразия» Эшби

Для уменьшения разнообразия (беспорядка) необходимо привести в систему информацию (управляющее воздействие) — *негэнтропию*, которую ошибочно представляют как энтропию с отрицательным знаком. Негэнтропия действительно измеряется в тех же единицах, как и энтропия (например, в битах), направление ее действительно противоположно энтропии, и увеличение негэнтропии вызывает такое же уменьшение энтропии. Несмотря на это, негэнтропия и энтропия изменяются в системе по разным самостоятельным закономерностям, и их абсолютные значения мало зависят друг от друга. При увеличении энтропии увеличивается размерность систем и количество независимых факторов — переменных. Одновременно с ростом энтропии увеличивается и неопределенность, неупорядоченность, беспорядок системы. Чтобы их уменьшить, необходимо ввести в систему негэнтропию, или информацию. При прогрессивном развитии системы, при ее организации и упорядочении больше увеличивается негэнтропия, чем энтропия. При деструкции, дезорганизации системы, наоборот, больше увеличивается энтропия, чем негэнтропия.

Какие имеются возможности по уменьшению энтропии объекта субъектом? У.Р. Эшби сформулировал закономерность, известную под названием «закон необходимого разнообразия» [18, 24].

Когда лицо N , принимающее решение, сталкивается с проблемой D , решение которой для него неочевидно, то имеет место некоторое разнообразие возможных решений, оцениваемое энтропией \mathcal{E}_D . Этому разнообразию противостоит «разнообразие» исследователя \mathcal{E}_N — разнообразие известных ему методов и приемов решения проблемы и способность сгенерировать новые. Задача исследователя заключается в том, чтобы свести разность разнообразий $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_D - \mathcal{E}_N$ к минимуму, в идеале — к нулю.

Эшби доказал теорему, на основе которой формулируется следующий вывод: *$\Delta\mathcal{E}$ может быть уменьшена лишь за счет соответствующего роста \mathcal{E}_N* . Говоря более образно, только разнообразие в N может уменьшить разнообразие, создаваемое в D , *только разнообразие может уничтожить разнообразие*.

Итак, для успешного решения задачи управления управляющая система (техническая или организационная) должна иметь большее

(или, по крайней мере, равное) разнообразие (свободу выбора), чем объект управления:

$$\mathfrak{D}_N \geq \mathfrak{D}_D.$$

6.4. Закономерности развития

6.4.1. Закономерность развития во времени — историчность

Из диалектики известно, что любая система не может быть неизменной, что она не только возникает, функционирует, развивается, но и погибает — любая система имеет свой *жизненный цикл* [12].

✓ **Жизненный цикл** — это период времени от возникновения потребности в системе и ее становления до снижения эффективности функционирования и «смерти» или ликвидации системы.

В последнее время понятие жизненного цикла стали связывать с закономерностью *историчности* — время является неперменной характеристикой системы, поэтому *каждая система исторична*.

Если для биологических и социальных систем легко можно привести примеры становления, расцвета, упадка и даже смерти (гибели), то для конкретных случаев развития организационных систем и сложных технических комплексов трудно определить эти периоды [4]. Не всегда руководители организаций и конструкторы технических систем учитывают закономерности историчности.

Примеры. 1. При создании атомных электростанций мало задумывались о том, что через 30 лет закончится срок их службы и потребуются большие финансовые затраты при остановке и закрытии станций.

2. Менеджеры мало задумываются о том, что руководимые ими компании или подразделения когда-то морально и физически устареют и не смогут выполнять возлагаемые на них функции.

3. Руководители организаций с огорчением узнают, что информационная система, в которую вложено столько средств, морально и физически стареет и требуется ее замена. Поэтому при внедрении информационной системы следует примерно в середине ее «жизненного цикла» начинать концептуальное проектирование и формирование технического задания на проектирование последующей очереди информационной системы.

В последнее время специалисты и руководители все больше начинают осознавать необходимость учета закономерности историчности систем при исследовании, моделировании, проектировании и управлении.

При создании сложных технических комплексов предлагают корректировать технический проект с учетом старения идеи, положенной в его основу, уже в процессе проектирования и создания системы [12]. Рекомендуются в процессе проектирования рассматривать не только вопросы создания и обеспечения развития системы, но и вопрос о том,

когда и как ее нужно уничтожить (возможно, предусмотрев «механизм» ее уничтожения или самоликвидации). Рекомендуется при создании технической документации, сопровождающей систему, включать в нее не только вопросы эксплуатации системы, но и срок жизни, ликвидацию ее. При регистрации предприятия требуется, чтобы в уставе был предусмотрен этап его ликвидации.

6.4.2. Рост и развитие

Любая система со временем претерпевает количественные и качественные изменения. Для этих изменений вводятся понятия «рост» и «развитие». Важно различать эти понятия, поскольку рост и развитие далеко не одно и то же, и даже не обязательно одно связано с другим*.

☒ **Рост** — это увеличение в числе и размерах.

☒ **Развитие** — это изменения процессов в системе во времени, выраженные в количественных, качественных и структурных преобразованиях от низшего (простого) к высшему (сложному).

Пример. Груда мусора может расти без развития. Человек развивается еще долго после того, как прекращается его рост [13].

Всякому изменению должна быть причина, и такой причиной является наличие проблемы или противоречия, которые порождают кризис, а он, в свою очередь, часто служит основой нового развития.

☒ **Кризис** (от греч. *krisis* — решение, поворотный пункт, исход) — это резкий, крутой перелом в чем-либо.

Кризису должна предшествовать разность между: желаемым и действительным; желаемым и возможным; интересами разных групп элементов системы; внутренним и внешним и т. д. Наиболее существенным источником процесса развития выступают различные противоречия: между функцией и целью системы, между потребностями системы в ресурсах и возможностью их удовлетворения и т. д.

Если нет противоречия, то зачем системе изменяться? Таким образом, *изменения направлены на ликвидацию противоречия*. При

* В экономике часто источником проблем является ошибочное предположение, будто для развития необходим экономический рост и будто пределы роста ограничивают развитие [13]. Но развитие связано не столько с наличными ресурсами, сколько с умением их использовать. Оно больше зависит от информационных ресурсов, чем от материальных. Недостаток ресурсов может ограничивать рост, но не развитие. По мере развития система все менее зависима от наличных ресурсов и все более способна добывать или производить недостающие ресурсы.

этом надо сразу оговориться, что не всякое противоречие надо ликвидировать. Например, гомеостатические системы построены на таких противоречиях, что делает систему крайне устойчивой [15].

Рассмотрим механизмы изменений. *При росте* происходит увеличение количества элементов и связей, при уменьшении, наоборот, удаляются элементы и рвутся связи. Могут ли при этом происходить качественные изменения? Конечно, закона перехода количества в качество еще никто не отменял, но это нельзя назвать развитием. Простейший пример из таблицы Менделеева: если к атому одного вещества добавить несколько протонов, нейтронов или электронов, то получаем новое вещество с новыми свойствами. При этом сказать, что одно вещество развитее другого, нельзя. При развитии, как сказано в определении, происходят количественные, качественные и структурные преобразования от низшего (простого) к высшему (сложному).

Наряду с положительными тенденциями, приписываемыми росту и развитию, можно говорить и об отрицательных тенденциях: отрицательный рост — сокращение, уменьшение и отрицательное развитие — *деградация, дезорганизация, деструкция*.

☑ **Дегградация** — это постепенное ухудшение, снижение или утрата положительных качеств, упадок, вырождение.

При этом рост (положительный и отрицательный) и развитие, как правило, реализуются путем целенаправленных воздействий на систему, а дегградация является естественным процессом. Отсюда следует, что пока существует целенаправленное воздействие на систему, она будет развиваться. Если прекратить такое воздействие, то система будет дегградировать.

В своей основе развитие имеет три фактора — *изменчивость, наследственность и отбор* [10]. Новые свойства система может получить, только имея «свободу выбора», т. е. возможность изменяться. При этом она наследует все положительное, эффективное, что подтверждено ее функционированием, с последующим отбором по некоторым критериям наилучшей структуры и параметров системы, благодаря которым система выходит на новый уровень упорядоченности. В жестко упорядоченной системе не может быть ее развития, потому что оно осуществляется не благодаря укреплению элементов и связей, а посредством возникновения зон неупорядоченности [19]. Движущей же силой любого развития являются противоречия. Чем более устойчива система, тем хуже она развивается [5]. Как пишет Акофф: «Не имея выбора, невозможно делать ошибки; не делая ошибки, нельзя научиться; без науки нет развития» [1].

Развитие системы обязательно сопровождается изменением ее целей. Другими критериями развития системы являются: увеличение порядка, рост организованности, увеличение информации, снижение энтропии системы [14].

Само *развитие* как последовательное изменение может рассматриваться в качестве элемента своего рода «*суперразвития*», основу которого составляет *смена разных типов развития* [8]. Смена процессов развития представляет собой глубокое качественное изменение в системе, которое воспринимается как *кризис*. Поскольку необходимость этих смен заложена в самом существе суперразвития, то из этого следует, что *бескризисного развития не существует* — рано или поздно наступит момент, когда системе для продолжения эволюции необходимо будет сменить тип развития, иначе оно просто не состоится.

6.4.3. Закономерность неравномерного развития и рассогласования темпов выполнения функций элементами системы

Чем сложнее система, тем более неравномерно развиваются ее составные части. При этом в процессе функционирования или развития системы ее элементы выполняют свои локальные функции в соответствии со своим темпом. Это закономерно приводит к рассогласованию темпов выполнения функций элементами, что создает угрозу целостности системы и ее способности выполнять свои функции, а также к дезорганизации всей системы вплоть до ее остановки.

Пример. С развитием тоннажа грузовых судов быстро росла мощность двигателей, однако средства торможения развивались медленно. В результате возникло противоречие: все крупные корабли и танкеры не могли эффективно затормозить — от начала торможения до полной остановки они успевают пройти несколько миль [14].

6.4.4. Закономерность увеличения степени идеальности

Развитие всех систем идет в направлении увеличения степени идеальности [9]. Подразумевается, что идеальная система — это такая система, у которой вес, объем, ненадежность, потребление ресурсов стремятся к нулю, хотя при этом способность системы выполнять свои функции не уменьшается.

6.4.5. Закономерность внутрисистемной и межсистемной конвергенции

Объективной общесистемной закономерностью, во многом определяющей функционирование систем, является внутрисистемная и межсистемная *конвергенция* [9].

☑ **Конвергенция** означает схождение, сближение, взаимовлияние, взаимопроникновение между системами или между разными элементами внутри одной системы.

В геометрии под конвергенцией понимается сближение двух линий и схождение их в одной точке. В биологии конвергенция означает возникновение одинаковых признаков в строении тел и функционировании разных организмов, находящихся под воздействием одних и тех же факторов среды. В социологии этот термин был впервые введен в 1957 г. французским социологом Раймондом Ароном для обозначения процесса сближения социалистической и капиталистической общественных систем.

Конвергенция возникает [19]:

- при наличии общей среды обитания для двух систем;
- при открытости обеих систем, что позволяет факторам среды воздействовать на внутренние структуры систем;
- при отсутствии противостояния и борьбы между системами;
- в случае взаимного влияния систем, что ускоряет процесс взаимного обмена сходством.

6.4.6. Эквифинальность

Термин «эквифинальность» предложил Л. фон Берталанфи [2] для описания закономерности открытых систем. Дело в том, что состояние равновесия в закрытых системах полностью определяется начальными условиями. Для открытых же систем их конечное состояние не зависит от начального состояния, а определяется особенностями протекающих внутри системы процессов и характером ее взаимодействия со средой.

☑ **Эквифинальность** — это способность системы достигать определенного состояния, которое не зависит ни от времени, ни от ее начальных условий, а определяется исключительно ее параметрами.

Эта закономерность характеризует как бы предельные возможности системы, что важно учитывать при проектировании как организаций, так и информационных систем. Это одна из наименее исследованных закономерностей [4].

Вот ряд вопросов, касающихся этой закономерности, которые в настоящее время еще не изучены:

- какие именно параметры в конкретных системах обеспечивают свойство эквифинальности?
- как обеспечивается это свойство?
- как проявляется закономерность эквифинальности в организационных системах?

6.5. Другие общесистемные закономерности

6.5.1. Полисистемность

☒ Любой объект окружающего мира принадлежит в качестве элемента одновременно многим системам [9].

При этом между всеми системами, которым принадлежит общий элемент, существуют противоречия: каждая из этих систем стремится к своей, особой цели, используя любой свой элемент в качестве средства [6].

Примеры. 1. Работник фирмы принадлежит одному из ее подразделений, фирме в целом, профсоюзной организации, может быть, политической партии, семье, спортивному клубу, городу, стране и т. д. Это порождает противоречивость его поведения при вхождении в разные системы, что вызывает «расщепленность» его сознания.

2. Любой станок, работающий на предприятии, является элементом этого предприятия, но в то же время принадлежит и многим другим системам: энергетической, технологической, ремонтной, а также тем системам, которые его сконструировали и построили. Все это придает ему специфические, уникальные черты, накладывает отпечаток на процесс его использования в производстве.

3. Фирма в целом принадлежит одновременно многим системам, которые пытаются господствовать над ней, навязывать ей свои интересы. В частности, различные требования предъявляют к предприятию, например, его потребители, правительство, профсоюзы или акционеры. В связи с этим внутренняя структура фирмы должна быть построена таким образом, чтобы в какой-то мере удовлетворить интересы всех систем, в которые входит фирма, гармонизировать их противоречивые цели [6].

6.5.2. Противодействие системы внешнему возмущению

Французский физико-химик и металловед А.Л. Ле Шателье сформулировал следующий принцип: «Если существующее равновесие системы подвергается внешнему воздействию, изменяющему какое-либо из условий равновесия, то в ней возникают процессы, направленные так, чтобы противодействовать этому изменению».

В 1906 г. знаменитый русский кристаллограф Е.С. Федоров, а в 1911 г. известный американский химик В. Банкрофт выступают с идеей, что принцип Ле Шателье (или, точнее, принцип Ле Шателье–Брауна) является в действительности универсальным, т. е. при внешнем возмущении, нарушающем условие равновесия, в системе развиваются противоположно действующие процессы, и до определенного уровня возмущения они нейтрализуют эффект внешнего воздействия [20]. Имеется образная формулировка этой закономерности, данная М.И. Сетровым [17]: «Целое препятствует нарушению целостности».

В экономике, в частности, ему соответствует закон соответствия спроса и предложения.

6.5.3. Закономерность «наиболее слабых мест»

Устойчивость всей системы зависит от наиболее слабых элементов в системе [14]. Это соответствует поговорке «где тонко, там и рвется». Структурная устойчивость (неразрушимость, приспособленность) системы определяется устойчивостью наиболее слабой подсистемы. Там, где относительное сопротивление будет меньше необходимого, произойдет сбой. На этой же закономерности основывается обеспечение устойчивого состояния организации. Если руководитель правильно осуществляет управление организацией, но в одном важном вопросе ослабляет внимание, то тем самым он может способствовать снижению устойчивости организации.

6.5.4. Закономерность «80/20»

Итальянский экономист Парето (Vilfredo Federico Damaso Pareto) в 1897 г. выдвинул ныне знаменитый «Принцип 80/20». Он установил, что 80 % земли в Италии принадлежит лишь 20 % ее жителей, а позднее доказал, что замеченное им правило применимо и в других областях. Например, в сельском хозяйстве 80 % гороха собирается из 20 % общего числа стручков. Впоследствии он сформулировал правило, называемое «Принцип Парето» или «Принцип 80/20» [16].

Исходя из этого принципа, не всегда работа должна быть выполнена как можно лучше, часто вполне достаточно удовлетворительного результата. Принцип Парето означает, что 20 % усилий дают 80 % результата, а остальные 80 % усилий — лишь 20 % результата. Дальнейшие улучшения не всегда оправданны. «Лучшее — враг хорошего», — гласит народная мудрость.

Из статистики [14] следует, что:

- 20 % продаж приносят 80 % общего дохода;
- 80 % посетителей смотрят только 20 % страниц сайта;
- 80 % случаев задержек возникает по вине 20 % возможных их причин;
- 20 % крупных предприятий создают 80 % всей продукции в мире, в то время как 80 % средних и мелких предприятий создают 20 % продукции;
- 20 % населения мира, живущего в странах с самым высоким уровнем доходов, создают 80 % мирового объема внутреннего валового продукта (ВВП);
- 20%-ная наиболее активная часть ученых создает 80 % научной продукции, а другая, менее активная, 80%-ная часть создает 20 % продукции. Но при этом для создания всей научной продукции обе части одного целого должны существовать;

Эта 20%-ная закономерность распространяется на пчеловодство и даже на муравейник, где также существует 20%-ная активная часть муравьев, создающая 80 % продукции. Если условно выбрать наиболее активную 20%-ную часть и переселить отдельно, то из них опять образуются новая более активная (20%-ная) и новая менее активная (80%-ная) части.

Резюме

1. В связи с тем, что пока не удалось установить единые общесистемные законы, то, говоря о свойствах систем, чаще всего ограничиваются закономерностями — часто наблюдаемыми, типичными свойствами, устанавливаемыми опытом. Наибольший интерес представляют *общесистемные закономерности* — закономерности, характеризующие принципиальные особенности систем любой природы.

2. Одной из фундаментальных общесистемных закономерностей является *эмерджентность* — возникновение в системе новых интегративных качеств, не свойственных ее компонентам.

3. К другим важным понятиям относится *целостность*, которая вбирает в себя и эмерджентность. Из целостности вытекают следующие закономерности:

а) изменение в одном элементе системы вызывает изменения во всех других элементах и в системе в целом, следствием чего является наличие *побочных эффектов* как положительных, так и отрицательных;

б) сумма свойств системы не равна сумме свойств отдельных элементов, поскольку при вхождении в систему элементы могут «терять» часть своих свойств и/или «приобретать» новые;

в) при этом свойства системы зависят от свойств составляющих ее элементов.

4. Противоположностью целостности выступает *аддитивность*. В этом случае изменения в системе представляют собой сумму изменений в ее отдельных частях и сумма свойств системы равна сумме свойств отдельных элементов.

5. Реальные системы редко находятся в крайних позициях: абсолютно целостная система или аддитивное образование. Любая развивающаяся система находится в некотором промежуточном положении, которое со временем смещается либо в сторону целостности — имеет место *прогрессирующая систематизация*, либо в сторону аддитивности — имеет место *прогрессирующая факторизация (изоляция)*.

6. В основе системного подхода лежит признание *изоморфизма* систем различной природы (биологических, технических, социально-

политических и др.), что позволяет, изучая одну из них, устанавливать свойства другой.

7. Любая система не изолирована от других систем. Она связана множеством коммуникаций с окружающей средой, представляющей собой сложное и неоднородное образование, в состав которого входят: *надсистема* (система более высокого порядка, задающая требования и ограничения рассматриваемой системе), *элементы или подсистемы* (нижележащие, подведомственные системы) и *системы одного уровня с рассматриваемой*.

8. Любую систему можно представить в виде иерархического образования. При этом на всех уровнях иерархии действует закономерность *целостности*: подчиненные члены иерархии приобретают новые свойства, отсутствовавшие у них в изолированном состоянии, а возникшее в результате объединения нижестоящих элементов новое целое приобретает способность осуществлять новые функции.

9. Использование иерархических представлений оказывается полезным в случае исследования систем и проблемных ситуаций с большой неопределенностью — происходит как бы расчленение «большой» неопределенности на более «мелкие», лучше поддающиеся исследованию.

10. Важную роль в системном анализе играет понятие *энтропии*, которое *служит количественной мерой беспорядка (свободы, разнообразия) в системе*. При этом для закрытой (замкнутой) системы — системы, не способной обмениваться с окружающей средой массой, энергией и информацией — справедливо *второе начало (закон) термодинамики*, согласно которому *энтропия замкнутой (изолированной) системы монотонно возрастает (не убывает) со временем*.

11. Энтропия неизолированной системы может быть уменьшена только в том случае, если система взаимодействует с другой или другими системами таким образом, что в процессе взаимодействия происходит компенсирующее увеличение энтропии в этих других системах.

12. У.Р. Эшби сформулировал закономерность, известную под названием «*закон необходимого разнообразия*», из которой следует, что уменьшить энтропию (разнообразие) в системе можно только за счет не меньшего разнообразия субъекта управления.

13. Любая система не может быть неизменной: она не только возникает, функционирует, развивается, но и погибает. Другими словами, любая система имеет свой *жизненный цикл*, т. е. *исторична*.

14. Любая система со временем претерпевает количественные и качественные изменения. Для этих изменений вводятся понятия «*рост*» — увеличение в числе и размерах и «*развитие*» — изменения процессов в системе во времени, выраженные в количественных,

качественных и структурных преобразованиях от низшего (простого) к высшему (сложному).

15. Чем сложнее система, тем более неравномерно развиваются ее составные части.

16. Развитие всех систем идет в направлении увеличения степени идеальности.

17. При наличии общей среды обитания для двух систем и для элементов системы характерна *конвергенция* — схождение, сближение, взаимовлияние, взаимопроникновение между системами или между разными элементами внутри одной системы.

18. Для систем характерна *эквифинальность* — закономерность, характеризующая предельные возможности системы: система способна достигать определенного состояния, которое не зависит ни от времени, ни от ее начальных условий, а определяется исключительно ее параметрами.

19. Для систем характерна *полисистемность* — любой объект окружающего мира принадлежит в качестве элемента одновременно многим системам.

20. Если существующее равновесие системы подвергается внешнему воздействию, изменяющему какое-либо из условий равновесия, то в ней возникают процессы, направленные так, чтобы противодействовать этому изменению.

21. Устойчивость всей системы зависит от наиболее слабых элементов в системе.

22. Итальянский экономист Парето выдвинул «Принцип 80/20», из которого, в частности, следует, что 20 % усилий дают 80 % результата, а остальные 80 % усилий — лишь 20 % результата. Дальнейшие улучшения не всегда оправданны.

Литература

1. Акофф Р. Акофф о менеджменте. — СПб.: Питер, 2002. — 448 с.
2. Берталанфи Л. Общая теория систем: Критический обзор // Исследования по общей теории систем. — М.: Прогресс, 1969. — С. 23–82.
3. Волкова В.Н. Концепции современного естествознания: Учебное пособие. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. — 200 с.
4. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории управления и системного анализа. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. — 510 с.
5. Жилин Д.М. Теория систем: опыт построения курса. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 184 с.
6. Камионский С.А. Менеджмент в российском банке: опыт системного анализа и управления. — М.: Деловая библиотека Омскпромстройбанка, 1998. — 112 с.
7. Карташев В.А. Система систем. Очерки общей теории и методологии. — М.: Прогресс-академия, 1995. — 416 с.

8. Мартынов А.С., Артюхов В.В., Виноградов В.Г. Россия как система. 1.3. Развитие. — <http://sci.aha.ru/RUS/waia3.htm>.
9. Миротин Л.Б., Ташбаев Ы.Э. Системный анализ в логистике. — М.: ЭКЗАМЕН, 2002. — 480 с.
10. Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера. — М.: Молодая гвардия, 1990. — 351 с.
11. Мыльник В.В., Титаренко Е.П., Волощук В.А. Системы управления. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 384 с.
12. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985. — 199 с.
13. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.
14. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. — М.: СИНТЕГ, 2000. — 528 с.
15. Прангишвили И.В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. — М.: Наука, 2003. — 428 с.
16. Принцип Парето: применение правила 80/20. — <http://www.e-management.ru/2-dev-pareto.htm>.
17. Сетров М.И. Основы функциональной теории организации. Философский очерк. — Л.: Наука, 1972. — 164 с.
18. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.
19. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. — Киев: МАУП, 2003. — 368 с.
20. Тахтаджян А.Л. Слово о тектологии. — <http://www.bogdinst.ru/HTML/Bogdanov/Tektology/AboutTektology.htm>.
21. Философский словарь / Под ред. М.М. Розенталя. — М.: Политиздат, 1972. — 496 с.
22. Холл А. Опыт методологии для системотехники. — М.: Сов. радио, 1975. — 448 с.
23. Холл А.Д., Фейджин Р.Е. Определение понятия системы // Исследования по общей теории систем / Пер. с англ. под общ. ред. В.Н. Садовского и Э.Г. Юдина. — М.: Прогресс, 1969. — С. 252–286.
24. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. — 432 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение закономерности.
2. Что такое «общесистемная закономерность»?
3. Дайте определение эмерджентности.
4. Что понимается под целостностью?
5. Какие особенности систем вытекают из свойства целостности?
6. Что понимается:
 - а) под аддитивностью;
 - б) синергизмом;
 - в) прогрессирующей изоляцией;
 - г) прогрессирующей систематизацией;
 - д) изоморфизмом;
 - е) закономерностью коммуникативности?
7. Какие особенности систем вытекают из закономерности иерархичности?
8. Что понимается под энтропией в системном анализе?

9. Как можно численно оценить энтропию:
 - а) для равновероятных состояний;
 - б) для разноравновероятных состояний?
10. Дайте определение открытой системы.
11. Дайте определение закрытой системы.
12. Объясните суть второго начала (закона) термодинамики.
13. Дайте определение флуктуации.
14. Объясните суть принципа компенсации энтропии.
15. Объясните суть закона необходимого разнообразия Эшби.
16. Дайте определение понятия: а) «жизненный цикл»; б) «рост»; в) «развитие»; г) «кризис».
17. Укажите причины изменений в системе.
18. Укажите основные признаки развития.
19. Что понимается под эквифинальностью?
20. Что понимается под полисистемностью?
21. Приведите примеры полисистемности (не из лекций).
22. Что понимается под историчностью?
23. Как используется закономерность историчности в области информатизации?
24. В чем заключается закономерность:
 - а) «неравномерного развития и расхождения темпов выполнения функций элементами системы»;
 - б) «увеличения степени идеальности»;
 - в) «внутрисистемной и межсистемной конвергенции»;
 - г) «сохранения равновесия системы за счет противодействия внешнему воздействию»;
 - д) «наиболее слабых мест»;
 - е) 80/20?

Г Л А В А 7

Классификация систем

Многообразие систем довольно велико, и существенную помощь при их изучении оказывает *классификация*.

☑ **Классификация** — это разделение совокупности объектов на классы по некоторым наиболее существенным признакам.

Важно понять, что классификация — это только модель реальности [12], поэтому к ней надо так и относиться, не требуя от нее абсолютной полноты. Еще необходимо подчеркнуть относительность любых классификаций.

Сама классификация выступает в качестве инструмента системного анализа. С ее помощью структурируется объект (проблема) исследования, а построенная классификация является моделью этого объекта.

Полной классификации систем в настоящее время нет, более того, не выработаны окончательно ее принципы. Разные авторы предлагают разные принципы классификации, а сходным по сути — дают разные названия [5, 12, 21, 22, и др.].

7.1. Классификация по происхождению

В зависимости от происхождения системы делятся на *естественные* и *искусственные* (создаваемые, антропогенные).

☑ **Естественные системы** — это системы, объективно существующие в действительности, в живой и неживой природе и обществе.

Эти системы возникли в природе без участия человека.

Примеры: атом, молекула, клетка, организм, популяция, общество, все-ленная и т. п.

☑ **Искусственные системы** — это системы, созданные человеком.

Примеры. 1. Холодильник, самолет, предприятие, фирма, город, государство, партия, общественная организация и т. п.

2. Одной из первых искусственных систем можно считать систему торговли [13].

Кроме того, можно говорить о третьем классе систем — **смешанных системах**, куда относятся эргономические (машина — человек-оператор), автоматизированные, биотехнические, организационные и другие системы [12].

7.2. Классификация по объективности существования

Все системы можно разбить на две большие группы: *реальные (материальные или физические)* и *абстрактные (символические)* системы.

Реальные системы состоят из изделий, оборудования, машин и вообще из естественных или искусственных объектов.

Абстрактные системы, по сути, являются моделями реальных объектов — это языки, системы счисления, идеи, планы, гипотезы и понятия, алгоритмы и компьютерные программы, математические модели, системы наук.

Иногда выделяют *идеальные* или *концептуальные системы* — системы, которые выражают принципиальную идею или образцовую действительность — образцовый вариант имеющейся или проектируемой системы.

Также можно выделить **виртуальные системы** — не существующие в действительности модельные или мыслительные представления реальных объектов, явлений, процессов (могут быть как идеальными, так и реальными системами).

7.3. Действующие системы

Выделим из всего многообразия создаваемых систем **действующие системы** [5]. Такие системы способны совершать операции, работы, процедуры, обеспечивать заданное течение технологических процессов, действуя по программам, задаваемым человеком. В действующих системах можно выделить следующие системы: 1) технические, 2) эргатические, 3) технологические, 4) экономические, 5) социальные, 6) организационные и 7) управления.

1. Технические системы представляют собой материальные системы, которые решают задачи по программам, составленным человеком; сам человек при этом не является элементом таких систем [5].

☒ **Техническая система** — это совокупность взаимосвязанных физических элементов.

В качестве связей в таких системах выступают физические взаимодействия (механические, электромагнитные, гравитационные и др.).

Примеры. Автомобиль, холодильник, компьютер.

2. Эргатические системы. Если в системе присутствует человек, выполняющий определенные функции субъекта, то говорят о эргатической системе.

☒ **Эргатическая система** — это система, составным элементом которой является человек-оператор [28].

Частным случаем эргатической системы будет человеко-машинная система — система, в которой человек-оператор или группа операторов взаимодействует с техническим устройством в процессе производства материальных ценностей, управления, обработки информации и т.д. [21].

Примеры. 1. Шофер за рулем автомобиля.

2. Рабочий, вытачивающий деталь на токарном станке.

3. Технологические системы. Существуют два класса определения понятия «технология»:

а) как некой абстрактной совокупности операций;

б) как некой совокупности операций с соответствующими аппаратно-техническими устройствами или инструментами.

Отсюда, по аналогии со структурой (см. разд. 4.5.1), можно говорить о *формальной* и *материальной* технологической системе.

☒ **Технологическая система (формальная)** — это совокупность операций (процессов) в достижении некоторых целей (решении некоторых задач).

Структура такой системы определяется набором методов, методик, рецептов, регламентов, правил и норм.

Элементами формальной технологической системы будут операции (действия) или процессы. В разд. 5.1.2 *процесс* был определен как последовательная смена состояний, здесь же мы будем рассматривать другое понимание процесса: как последовательной смены операций.

☒ **Процесс** — это последовательная смена операций (действий), направленных на изменение состояния объекта.

Связями в технологической системе выступают свойства обрабатываемых объектов или сигналы, передаваемые от операции к операции.

☒ **Технологическая система (материальная)** — это совокупность реальных приборов, устройств, инструментов и материалов (техническое обеспечение системы), реализующих операции

(процессное обеспечение системы) и предопределяющих их качество и длительность.

Пример. Формальная технологическая система производства борща — рецепт. Материальная технологическая система производства борща — совокупность ножей, кастрюль, кухонных приборов, реализующих рецепт. В абстрактной технологии мы говорим о том, что надо отварить мясо, но не оговариваем ни тип кастрюли, ни вид плиты (газовая или электрическая). В материальной технологии техническое обеспечение приготовления борща будет определять его качество и длительность тех или иных операций.

Технологическая система более гибкая, чем техническая: минимальными преобразованиями ее можно переориентировать на производство других объектов, либо на получение других свойств последних.

Примеры. Технологические системы: производство бумаги, изготовление автомобиля, оформление командировки, получение денег в банкомате.

4. Экономическая система — это система отношений (процессов), складывающихся в экономике. Развернем это определение.

☒ **Экономическая система** — это совокупность экономических отношений, возникающих в процессе производства, распределения, обмена и потребления экономических продуктов и регламентируемых совокупностью соответствующих принципов, правил и законодательных норм.

5. Социальная система. Поскольку мы рассматриваем только создаваемые системы, то социальную систему будем рассматривать в следующем разрезе:

☒ **Социальная система** — это совокупность мероприятий, направленных на социальное развитие жизни людей.

К таким мероприятиям относятся: улучшение социально-экономических и производственных условий труда, усиление его творческого характера, улучшение жизни работников, улучшение жилищных условий и т. п.

6. Организационная система. Взаимодействие вышеназванных систем обеспечивает организационная система (система организационного управления [21]).

☒ **Организационная система** — это совокупность элементов, обеспечивающих координацию действий, нормальное функционирование и развитие основных функциональных элементов объекта [5].

Элементы такой системы представляют собой органы управления, обладающие правом принимать управленческие решения — это руководители, подразделения или даже отдельные организации (например, министерства).

Связи в организационной системе имеют информационную основу и определяются должностными инструкциями и другими нормативными документами, в которых прописаны права, обязанности и ответственность органа управления.

7. Система управления. Управление рассматривается как действия или функция, обеспечивающие реализацию заданных целей.

☒ *Систему, в которой реализуется функция управления, называют системой управления* [21].

Система управления содержит два главных элемента: *управляемую* подсистему (объект управления) и *управляющую* подсистему (осуществляющую функцию управления).

Применительно к техническим системам управляющую подсистему называют *системой регулирования*, а к социально-экономическим — *системой организационного управления*.

Разновидностью системы управления является *эргатическая система* — человеко-машинная система управления.

Пример. Рассмотрим работу некоторого магазина и попытаемся выделить в его работе вышеназванные системы.

В магазине имеется *система управления*, состоящая из субъекта управления — руководства и объекта управления — всех остальных систем магазина.

Управление реализуется *системой организационного управления* — *организационной системой*, состоящей из директора, его заместителей, начальников отделов и секций, связанных определенными отношениями подчиненности.

В магазине функционирует *экономическая система*, включающая в себя такие экономические отношения, как производство (услуг и, возможно, товаров), обмен (денег на товары и услуги), распределение (прибыли).

Имеется *социальная система*, сформулированная в коллективном и/или трудовых договорах.

Экономические отношения обмена реализуются в виде некоторых *технологических систем* (технология продажи товара, технология возврата денег).

Технологические системы, в свою очередь, строятся на базе технических систем (кассовые аппараты, сканеры штрих-кода, компьютеры, калькуляторы).

Кассир, работающий на кассовом аппарате, представляет собой *эргатическую систему*.

7.4. Централизованные и децентрализованные системы

☒ *Централизованной системой называется система, в которой некоторый элемент играет главную, доминирующую роль в функционировании системы.*

Такой главный элемент называется *ведущей частью* системы или ее *центром*. При этом **небольшие изменения ведущей части вызывают значительные изменения всей системы**: как желательные, так и нежелательные.

К недостаткам централизованной системы можно отнести низкую скорость адаптации (приспособления к изменяющимся условиям окружающей среды), а также сложность управления из-за огромного потока информации, подлежащей переработке в центральной части систем [1].

✓ **Децентрализованная система** — это система, в которой нет главного элемента.

Важнейшие подсистемы в такой системе имеют приблизительно одинаковую ценность и построены не вокруг центральной подсистемы, а соединены между собой последовательно или параллельно.

Примеры. 1. Армейские структуры представляют собой ярко выраженные централизованные системы.

2. Интернет является практически идеальной децентрализованной системой.

7.5. Классификация по размерности

Системы подразделяются на одномерные и многомерные.

✓ **Система, имеющая один вход и один выход, называется одномерной.** Если входов или выходов больше одного — **многомерной**.

Нужно понимать условность одномерности системы — в реальности любой объект имеет бесчисленное число входов и выходов.

7.6. Классификация систем по однородности и разнообразию структурных элементов

Системы бывают *гомогенные*, или однородные, и *гетерогенные*, или разнородные, а также смешанного типа.

В **гомогенных** системах структурные элементы системы однородны, т. е. обладают одинаковыми свойствами. В связи с этим в гомогенных системах элементы взаимозаменяемы.

Пример. Гомогенная компьютерная система в организации состоит из однотипных компьютеров с установленными на них одинаковыми операционными системами и прикладными программами. Это позволяет заменить вышедший из строя компьютер любым другим без дополнительной настройки и переучивания конечного пользователя.

Понятие «гомогенная система» широко используется при описании свойств газов, жидкостей или популяций организмов.

Гетерогенные системы состоят из разнородных элементов, не обладающих свойством взаимозаменяемости.

Примеры. 1. Гетерогенная сеть — информационная сеть, в которой работают протоколы сетевого уровня различных фирм-производителей [21]. Гетерогенная вычислительная сеть состоит из фрагментов разной топологии и разнотипных технических средств.

2. Если университет в обычном понимании является гомогенным образованием, т. е. реализует подготовку по высшему и послевузовскому образованию (которые близки как по учебным программам, так и по методам их преподавания), то университетский комплекс представляет собой гетерогенную систему, в которой проводится подготовка по программам начального, среднего, высшего, послевузовского образования [11].

7.7. Линейные и нелинейные системы

☒ Система называется **линейной**, если она описывается линейными уравнениями (алгебраическими, дифференциальными, интегральными и т. п.), в противном случае — **нелинейной**.

Для линейных систем справедлив принцип суперпозиции: **реакция системы на любую комбинацию внешних воздействий равна сумме реакций на каждое из этих воздействий, поданных на систему порознь**. Предположим, что после изменения входной переменной на величину Δx выходная переменная изменяется на Δy . Если система линейна, то после двух независимых изменений входной переменной на Δx_1 и Δx_2 , таких, что $\Delta x_1 + \Delta x_2 = \Delta x$, суммарное изменение выходной переменной также будет равно Δy .

Большинство сложных систем являются нелинейными. В связи с этим для упрощения анализа систем довольно часто применяют процедуру **линеаризации**, при которой нелинейную систему описывают приближенно линейными уравнениями в некоторой (рабочей) области изменения входных переменных. Однако не всякую нелинейную систему можно линеаризировать, в частности, нельзя линеаризировать дискретные системы.

7.8. Дискретные системы

Среди нелинейных систем выделяют класс **дискретных систем**.

☒ **Дискретная система** — это система, содержащая хотя бы один элемент дискретного действия.

☒ **Дискретный элемент** — это элемент, выходная величина которого изменяется дискретно, т. е. скачками, даже при плавном изменении входных величин.

Все остальные системы относятся к системам **непрерывного действия**.

☒ Система **непрерывного действия** (**непрерывная система**) состоит только из элементов непрерывного действия, т. е. элементов, выходы которых изменяются плавно при плавном изменении входных величин.

7.9. Каузальные и целенаправленные системы

В зависимости от способности системы ставить себе цель различают *каузальные* и *целенаправленные* (*целеустремленные, активные*) системы.

К каузальным системам относится широкий класс неживых систем:

☑ **Каузальные системы** — это системы, которым цель внутренне не присуща.

Если такая система и имеет целевую функцию (например, автопилот), то эта функция задана извне пользователем.

☑ **Целенаправленные системы** — это системы, способные к выбору своего поведения в зависимости от внутренне присущей цели [8].

В целенаправленных системах цель формируют внутри системы.

Пример. Система «самолет-пилоты» способна поставить себе цель и отклониться от маршрута.

Элемент целенаправленности всегда присутствует в системе, включающей в себя людей (или еще шире — живые существа). Вопрос чаще всего состоит в степени влияния этой целенаправленности на функционирование объекта. Если мы имеем дело с ручным производством, то влияние так называемого человеческого фактора очень большое. Отдельный человек, группа людей или весь коллектив способны поставить цель своей деятельности, отличную от цели компании.

Активные системы, к которым, в первую очередь, относятся организационные, социальные и экономические, в зарубежной литературе называются «мягкими» системами. Они способны сознательно предоставлять недостоверную информацию и сознательно не выполнять планы, задания, если им это выгодно. Важным свойством таких систем является дальновидность, обеспечивающая способность системы прогнозировать будущие последствия принимаемых решений. Это, в частности, затрудняет применение обратной связи для управления системой.

Кроме того, иногда на практике системы условно делят на системы, стремящиеся к цели — *целеориентированные*, и на системы, которые ориентированы, в первую очередь, не на цели, а на определенные ценности — *ценностноориентированные*.

7.10. Большие и сложные системы

Достаточно часто термины «*большая система*» и «*сложная система*» используются как синонимы [21]. В то же время существует

точка зрения, что большие и сложные системы — это разные классы систем. При этом некоторые авторы связывают понятие «большая» с величиной системы, количеством элементов (часто относительно однородных), а понятие «сложная» — со сложностью отношений, алгоритмов или сложностью поведения [14]. Существуют и более убедительные обоснования различия понятий «большая система» и «сложная система».

7.10.1. Большие системы

Понятие «*большая система*» стало употребляться после появления книги Р.Х. Гуда и Р.З. Макола [7]. Этот термин широко использовался в период становления системных исследований для того, чтобы подчеркнуть принципиальные особенности объектов и проблем, требующих применения системного подхода [21].

В качестве признаков большой системы предлагалось использовать различные понятия:

- понятие иерархической структуры, что, естественно, сужало класс структур, с помощью которых может отображаться система;
- понятие «человеко-машинная» система (но тогда выпадали полностью автоматические комплексы);
- наличие больших потоков информации;
- или большого числа *алгоритмов* ее переработки.

У.Р. Эшби считал, что система является *большой* с точки зрения наблюдателя, возможности которого она превосходит в каком-то аспекте, важном для достижения цели [29]. При этом физические размеры объекта не являются критерием отнесения объекта к классу *больших* систем. Один и тот же материальный объект в зависимости от цели наблюдателя и средств, имеющихся в его распоряжении, можно отображать или не отображать *большой* системой.

Ю.И. Черняк также в явном виде связывает понятие большой системы с понятием «наблюдатель»: для изучения большой системы, в отличие от сложной, необходим один «наблюдатель» (имеется в виду не число людей, принимающих участие в исследовании или проектировании системы, а относительная однородность их квалификации: например, инженер или экономист) [25]. Он подчеркивает, что в случае большой системы объект может быть описан как бы на одном языке, т. е. с помощью единого метода моделирования, хотя и по частям, подсистемам. Еще Ю.И. Черняк предлагает называть большой системой «такую, которую невозможно исследовать иначе, как по подсистемам».

7.10.2. Классификация систем по сложности

Существует ряд подходов к разделению систем по сложности, и, к сожалению, нет единого определения этому понятию, нет и четкой границы, отделяющей простые системы от сложных. Разными авторами предлагались различные классификации сложных систем.

Например, признаком *простой системы* считают сравнительно небольшой объем информации, требуемый для ее успешного управления. Системы, в которых не хватает информации для эффективного управления, считают *сложными*.

Г.Н. Поваров [16] оценивает сложность систем в зависимости от числа элементов, входящих в систему:

- малые системы ($10-10^3$ элементов);
- сложные (10^4-10^6 элементов);
- ультрасложные (10^7-10^{30} элементов);
- суперсистемы ($10^{30}-10^{200}$ элементов).

В частности, Ю.И. Черняк сложной называет систему, которая строится для решения многоцелевой, многоаспектной задачи [24] и отражает объект с разных сторон в нескольких моделях. Каждая из моделей имеет свой язык, а для согласования этих моделей нужен особый метаязык. При этом подчеркивалось наличие у такой системы сложной, составной цели или даже разных целей и притом одновременно многих структур (например, технологической, административной, коммуникационной, функциональной и т. д.).

Б.С. Флейшман за основу классификации принимает *сложность поведения* системы [26].

Одна из интересных классификаций *по уровням сложности* предложена К. Боулдингом [4] (табл. 7.1). В этой классификации каждый последующий класс включает в себя предыдущий.

Условно можно выделить два вида сложности: структурную и функциональную.

Структурная сложность. Ст. Бир предлагает делить системы на простые, сложные и очень сложные [2].

☒ **Простые** — это наименее сложные системы.

☒ **Сложные** — это системы, отличающиеся разветвленной структурой и большим разнообразием внутренних связей.

☒ **Очень сложная система** — это сложная система, которую подробно описать нельзя.

Несомненно, что эти деления довольно условны и между ними трудно провести границу. (Здесь сразу вспоминается вопрос: с какого количества камней начинается куча?)

Таблица 7.1

Классификация систем по уровню сложности К. Боулдинга

Тип системы	Уровень сложности	Примеры
Неживые системы	Статические структуры (остовы) Простые динамические структуры с заданным законом поведения Кибернетические системы с управляемыми циклами обратной связи	Кристаллы Часовой механизм Термостат
Живые системы	Открытые системы с самосохраняемой структурой (первая ступень, на которой возможно разделение на живое и неживое) Живые организмы с низкой способностью воспринимать информацию Живые организмы с более развитой способностью воспринимать информацию, но не обладающие самосознанием Системы, характеризующиеся самосознанием, мышлением и нетривиальным поведением Социальные системы Трансцендентные системы или системы, лежащие в настоящий момент вне нашего познания	Клетки Растения Животные Люди Социальные организации —

Позднее Ст. Бир [3] предложил относить к простым системам те, которые имеют до 10^3 состояний, к сложным — от 10^3 до 10^6 состояний и к очень сложным — системы, имеющие свыше миллиона состояний.

Одним из способов описания сложности является оценка числа элементов, входящих в систему (переменных, состояний, компонентов), и разнообразия взаимозависимостей между ними. Например, количественную оценку сложности системы можно произвести, сопоставляя число элементов системы (n) и число связей (m):

$$C_S = \frac{m}{n(n-1)},$$

где $n(n-1)$ — максимально возможное число связей.

Можно применить энтропийный подход к оценке сложности системы. Считается, что *структурная сложность системы должна быть пропорциональна объему информации, необходимой для ее описания* (снятия неопределенности). В этом случае общее количество информации о системе S , в которой априорная вероятность появления i -го свойства равна $p(s_i)$, определяется как

$$I_S = - \sum_i p(s_i) \ln p(s_i).$$

Функциональная сложность. Говоря о сложности систем, Ст. Бир отразил только одну сторону сложности — сложность строения — *структурную* сложность. Однако следует сказать и о другой сложности систем — *функциональной* (или вычислительной).

Для количественной оценки функциональной сложности можно использовать алгоритмический подход, например количество арифметико-логических операций, требуемых для реализации функции системы — преобразования входных значений в выходные, или объем ресурсов (время счета или используемая память), используемых в системе при решении некоторого класса задач.

Считается, что не существует систем обработки данных, которые могли бы обработать более чем $1,6 \cdot 10^{47}$ бит информации в секунду на грамм своей массы [1, 19]. Тогда гипотетическая компьютерная система, имеющая массу, равную массе Земли, за период, равный примерно возрасту Земли, может обработать порядка 10^{93} (или приблизительно 2^{309}) бит информации (*предел Бреммермана*). При этих расчетах в качестве информационной ячейки использовался каждый квантовый уровень в атомах, образующих вещество Земли. Задачи, требующие обработки более чем 10^{93} бит, называются *трансвычислительными*. В практическом плане это означает, что, например, полный анализ системы из 100 переменных, каждая из которых может принимать 10 разных значений, является трансвычислительной задачей.

Пример. Если система имеет два входа, которые могут находиться в двух возможных состояниях, то возможных вариантов состояния — четыре. При 10 входах вариантов уже 1024, а при 20-ти (что соответствует маленькой реальной сделке) — вариантов уже 2^{20} . Когда имеется реальный оперативный план небольшой корпорации, в котором хотя бы тысяча независимых событий (входов), то вариантов получается 2^{1000} ! Значительно больше предела Бреммермана.

Кроме того, выделяют такой тип сложности, как *динамическая сложность*. Она возникает тогда, когда меняются связи между элементами. Например, в коллективе сотрудников фирмы может время от времени меняться настроение, поэтому существует множество вариантов связей, которые могут устанавливаться между ними. Попытку дать исчерпывающее описание таким системам можно сравнить с поиском выхода из лабиринта, который полностью изменяет свою конфигурацию, как только вы меняете направление движения. Примером могут служить шахматы [15].

Малые и большие, сложные и простые. Авторы книги [12] предлагают рассматривать четыре варианта сложности систем:

- 1) малые простые;
- 2) малые сложные;
- 3) большие простые;
- 4) большие сложные.

При этом выделение системы того или иного класса в одном и том же объекте зависит от точки зрения на объект, т. е. от наблюдателя (см. разд. 4.3).

Примеры. 1. Давно известно, что обыватели всегда готовы давать советы в области воспитания, лечения, управления страной — для них это всегда *малые простые* системы. Тогда как для воспитателей, врачей и государственных деятелей — это *большие сложные* системы.

2. Исправные бытовые приборы для пользователя — *малые простые* системы, но неисправные — *малые сложные*. А для мастера те же неисправные приборы — *малые простые* системы [12].

3. Шифрозамок для хозяина сейфа — *малая простая* система, а для похитителя — *большая простая* [12].

Таким образом, один и тот же объект может быть представлен системами разной сложности. И это зависит не только от наблюдателя, но и от цели исследования. В связи с этим В.А. Карташев пишет [9]: «Первичное рассмотрение даже самых сложных образований на уровне установления их основных, главных отношений приводит к понятию простой системы».

Пример. При стратифицированном описании предприятия на самой верхней страте оно может быть описано в виде *малой простой системы* в виде «черного ящика» с основными ресурсами на входе и продукцией на выходе.

7.11. Детерминированность

Рассмотрим еще одну классификацию систем, предложенную Ст. Биром [2].

☒ Если входы объекта однозначно определяют его выходы, т. е. его поведение можно однозначно предсказать (с вероятностью 1), то объект является **детерминированным**, в противном случае — **недетерминированным (стохастическим)**.

Математически детерминированность можно описать как строгую функциональную связь $Y = F(X)$, а стохастичность возникает в результате добавления случайной величины ε : $Y = F(X) + \varepsilon$.

Детерминированность характерна для менее сложных систем; стохастические системы сложнее детерминированных, поскольку их более сложно описывать и исследовать.

Примеры. 1. Швейную машинку можно отнести к детерминированной системе: повернув на заданный угол рукоятку машинки, можно с уверенностью сказать, что иглолка переместится вверх-вниз на известное расстояние (случай неисправной машинки не рассматриваем).

2. Примером недетерминированной системы является собака: когда ей протягивают кость, нельзя однозначно прогнозировать поведение собаки.

Интересен вопрос о природе стохастичности. С одной стороны, стохастичность — следствие случайности:

☑ **Случайность** — это цепь невыявленных закономерностей, скрытых за порогом нашего понимания [18].

А с другой — приближенности измерений. В первом случае мы не можем учесть все факторы (входы), действующие на объект, а также не знаем природы его нестационарности. Во втором — проблема непредсказуемости выхода связана с невозможностью точно измерить значения входов и ограниченностью точности сложных вычислений.

Примеры. Ст. Бир предлагает следующую таблицу с примерами систем [2]:

Вид системы	Детерминированные	Недетерминированные
Простые	Оконная задвижка Бильярдный шар (как абстрактная система)	Подбрасывание монеты Медуза (в целом, поскольку в биохимическом смысле — очень сложный организм)
Сложные	ЭВМ Тела во Вселенной Автоматическая линия	Хранение запасов Условные рефлексy Прибыль предприятия
Очень сложные	Очень сложных детерминированных систем не существует	Экономика государства Человеческий мозг Предприятие, фирма

7.12. Классификация систем по степени организованности

7.12.1. Степень организованности системы

Организованность или упорядоченность организованности системы R оценивается по формуле [17]

$$R = 1 - \mathcal{E}_{\text{реал}} / \mathcal{E}_{\text{макс}},$$

где $\mathcal{E}_{\text{реал}}$ — реальное или текущее значение энтропии; $\mathcal{E}_{\text{макс}}$ — максимально возможная энтропия или неопределенность по структуре и функциям системы.

Если система полностью детерминированная и организованная, то $\mathcal{E}_{\text{реал}} = 0$ и $R = 1$. Снижение энтропии системы до нулевого значения означает полную «заорганизованность» системы и приводит к вырождению системы. Если система полностью дезорганизованная, то $R = 0$ и $\mathcal{E}_{\text{реал}} = \mathcal{E}_{\text{макс}}$.

Качественная классификация систем по степени организованности была предложена В.В. Налимовым, который выделил класс *хорошо организованных* и класс *плохо организованных*, или *диффузных*, систем [14]. Позднее к этим двум классам был добавлен еще класс *самоорганизующихся* систем [23].

Важно подчеркнуть, что наименование класса системы не является ее оценкой. В первую очередь, это можно рассматривать как подходы к отображению объекта или решаемой задачи, которые могут выбираться в зависимости от стадии познания объекта и возможности получения информации о нем [6].

7.12.2. Хорошо организованные системы

Если исследователю удастся определить все элементы системы и их взаимосвязи между собой и с целями системы в виде *детерминированных* (аналитических или графических) зависимостей, то возможно представление объекта в виде *хорошо организованной* системы [6]. То есть представление объекта в виде хорошо организованной системы применяется в тех случаях, когда может быть предложено детерминированное описание и экспериментально показана правомерность его применения (доказана адекватность модели реальному объекту).

Такое представление успешно применяется при моделировании технических и технологических систем. Хотя, строго говоря, даже простейшие математические соотношения, отображающие реальные ситуации, также не являются абсолютно адекватными, поскольку, например, при суммировании яблок не учитывается, что они не бывают абсолютно одинаковыми, а вес можно измерить только с некоторой точностью.

Трудности возникают при работе со сложными объектами (биологическими, экономическими, социальными и др.). Без существенного упрощения их нельзя представить в виде хорошо организованных систем. Поэтому для отображения сложного объекта в виде хорошо организованной системы приходится выделять только факторы, существенные для конкретной цели исследования.

Попытки применить модели хорошо организованных систем для представления сложных объектов практически часто нереализуемы, так как, в частности, не удастся поставить эксперимент, доказывающий адекватность модели. Поэтому в большинстве случаев при представлении сложных объектов и проблем на начальных этапах исследования их отображают классами, рассмотренными ниже.

7.12.3. Плохо организованные, или диффузные, системы

Если не ставится задача определить все учитываемые компоненты и их связи с целями системы, то объект представляется в виде *плохо организованной* (или *диффузной*) системы [6]. Для описания свойств таких систем можно рассматривать два подхода: *выборочный* и *макропараметрический*.

При *выборочном подходе* закономерности в системе выявляются на основе исследования не всего объекта или класса явлений, а путем изучения достаточно представительной (репрезентативной) *выборки* компонентов, характеризующих исследуемый объект или процесс. Выборка определяется с помощью некоторых правил. Полученные на основе такого исследования характеристики или закономерности распространяют на поведение системы в целом.

Пример. Если нас интересует средняя цена на хлеб в каком-либо городе, то можно было бы последовательно объехать или обзвонить все торговые точки города, что потребовало бы много времени и средств. А можно пойти другим путем: собрать информацию в небольшой (но репрезентативной) группе торговых точек, вычислить среднюю цену и обобщить ее на весь город [10].

При этом нельзя забывать, что полученные статистические закономерности справедливы для всей системы с какой-то вероятностью, которая оценивается с помощью специальных приемов, изучаемых математической статистикой.

При *макропараметрическом* подходе свойства системы оцениваются с помощью некоторых интегральных характеристик (макропараметров).

Примеры. 1. При использовании газа для прикладных целей его свойства не определяют путем точного описания поведения каждой молекулы, а характеризуют макропараметрами — давлением, температурой и т. д. [6]. Основываясь на этих параметрах, разрабатывают приборы и устройства, использующие свойства газа, не исследуя при этом поведение каждой молекулы.

2. ООН при оценке уровня качества системы здравоохранения государства применяет в качестве одной из интегральных характеристик количество детей, умерших до пяти лет, на тысячу новорожденных.

Отображение объектов в виде диффузных систем находит широкое применение при определении пропускной способности систем разного рода, при определении численности штатов в обслуживающих, например ремонтных, цехах предприятия и в обслуживающих учреждениях, при исследовании документальных потоков информации и т. д. [6].

7.12.4. Самоорганизующиеся системы

Класс *самоорганизующихся*, или *развивающихся*, систем характеризуется рядом признаков, особенностей, которые, как правило, обусловлены наличием в системе активных элементов, делающих систему целенаправленной. Отсюда вытекают особенности экономических систем, как самоорганизующихся систем, по сравнению с функционированием технических систем [20, 21]:

- *нестационарность* (изменчивость) отдельных параметров системы и *стохастичность* ее поведения;

- *уникальность и непредсказуемость поведения* системы в конкретных условиях. Благодаря наличию активных элементов у системы появляется как бы «свобода воли», но в то же время возможности ее ограничены имеющимися ресурсами (элементами, их свойствами) и характерными для определенного типа систем структурными связями;
- *способность изменять свою структуру и формировать варианты поведения*, сохраняя целостность и основные свойства (в технических и технологических системах изменение структуры, как правило, приводит к нарушению функционирования системы или даже к прекращению ее существования как таковой);
- *способность противостоять энтропийным* (разрушающим систему) *тенденциям*. В системах с активными элементами не выполняется закономерность возрастания энтропии и даже наблюдаются неэнтропийные тенденции, т. е. собственно самоорганизация;
- *способность адаптироваться к изменяющимся условиям*. Это хорошо по отношению к возмущающим воздействиям и помехам, но плохо, когда адаптивность проявляется и к управляющим воздействиям, затрудняя управление системой;
- *способность и стремление к целеобразованию*;
- *принципиальная неравновесность*.

Легко видеть, что хотя часть этих особенностей характерна и для диффузных систем (*стохастичность поведения, нестабильность отдельных параметров*), однако в большинстве своем они являются специфическими признаками, существенно отличающими этот класс систем от других и затрудняющими их моделирование.

Рассмотренные особенности противоречивы. Они в большинстве случаев являются и положительными и отрицательными, желательными и нежелательными для создаваемой системы. Их не сразу можно понять и объяснить для того, чтобы выбрать и создать требуемую степень их проявления.

При этом следует иметь в виду важное отличие *открытых* развивающихся систем с активными элементами от *закрытых*. Пытаясь понять принципиальные особенности моделирования таких систем, уже первые исследователи отмечали, что, *начиная с некоторого уровня сложности, систему легче изготовить и ввести в действие, преобразовать и изменить, чем отобразить формальной моделью*. По мере накопления опыта исследования и преобразования таких систем это наблюдение подтверждалось, и была осознана их основная особенность — *принципиальная ограниченность формализованного описания развивающихся, самоорганизующихся систем*.

По этому поводу фон Нейманом была высказана следующая гипотеза: «У нас нет полной уверенности в том, что в области сложных задач реальный объект не может являться простейшим описанием самого себя, т. е. что всякая попытка описать его с помощью обычного словесного или формально-логического метода не приведет к чему-то более сложному, запутанному и трудновыполнимому...» [27].

Необходимость сочетания формальных методов и методов качественного анализа и положена в основу большинства моделей и методик системного анализа [21]. При формировании таких моделей меняется привычное представление о моделях, характерное для математического моделирования и прикладной математики. Изменяется представление и о доказательстве адекватности таких моделей.

Основную конструктивную идею моделирования при отображении объекта классом самоорганизующихся систем можно сформулировать следующим образом: накапливая информацию об объекте, фиксируя при этом все новые компоненты и связи и применяя их, можно получать отображения последовательных состояний развивающейся системы, постепенно создавая все более адекватную модель реального, изучаемого или создаваемого объекта. При этом информация может поступать от специалистов различных областей знаний и накапливаться во времени по мере ее возникновения (в процессе познания объекта).

Адекватность модели также доказывается как бы последовательно (по мере ее формирования) путем оценки правильности отражения в каждой последующей модели компонентов и связей, необходимых для достижения поставленных целей.

Резюме

1. При изучении любых объектов и процессов, в том числе и систем, большую помощь оказывает *классификация* — разделение совокупности объектов на классы по некоторым, наиболее существенным признакам.

2. В зависимости от происхождения системы могут быть *естественными* (системы, объективно существующие в действительности в живой и неживой природе и обществе) и *искусственными* (системы, созданные человеком).

3. По объективности существования все системы можно разбить на две большие группы: *реальные (материальные или физические)* и *абстрактные (символические)* системы.

4. Среди всего многообразия создаваемых систем особый интерес представляют *действующие системы*, к которым относятся техниче-

ские, технологические, экономические, социальные и организационные.

5. По степени централизации выделяют *централизованные* системы (имеющие в своем составе элемент, играющий главную, доминирующую роль в функционировании системы) и *децентрализованные* (не имеющие такого элемента).

6. Различают системы *одномерные* (имеющие один вход и один выход) и *многомерные* (если входов или выходов больше одного).

7. Системы бывают *гомогенные*, или однородные, и *гетерогенные*, или разнородные, а также смешанного типа.

8. Если система описывается линейными уравнениями, то она относится к классу *линейных* систем, в противном случае — *нелинейных*.

9. Система, не содержащая ни одного элемента дискретного действия (выходная величина которого изменяется скачками даже при плавном изменении входных величин), называется *непрерывной*, в противном случае — *дискретной*.

10. В зависимости от способности системы поставить себе цель различают *каузальные* системы (неспособные ставить себе цель) и *целенаправленные* (способные к выбору своего поведения в зависимости от внутренне присущей цели).

11. Различают *большие*, *очень сложные*, *сложные* и *простые* системы.

12. По предсказуемости значений выходных переменных системы при известных значениях входных различают *детерминированные* и *стохастические* системы.

13. В зависимости от степени организованности выделяют классы *хорошо организованных* систем (их свойства можно описать в виде детерминированных зависимостей), *плохо организованных* (или *диффузных*) и *самоорганизующихся* (включающие активные элементы).

14. Начиная с некоторого уровня сложности, систему легче изготовить и ввести в действие, преобразовать и изменить, чем отобразить формальной моделью, поскольку имеется принципиальная ограниченность формализованного описания развивающихся самоорганизующихся систем.

15. В соответствии с гипотезой фон Неймана *простейшим описанием объекта, достигшего некоторого порога сложности, является сам объект, а любая попытка его строгого формального описания приводит к чему-то более трудному и запутанному*.

Литература

1. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 368 с.

2. *Бир Ст.* Кибернетика и управление производством. — М.: Наука, 1965. — 391 с.
3. *Бир Ст.* Мозг фирмы. — М.: УРСС, 2005. — 416 с.
4. *Боулдинг К.* Общая теория систем — скелет науки // Исследования по общей теории систем. — М.: Прогресс, 1969. — С. 106–124.
5. *Васильев В.И., Романов Л.Г., Червонный А.А.* Основы теории систем: Конспект лекций. — М.: МГТУ ГА, 1994. — 104 с.
6. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории управления и системного анализа. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. — 510 с.
7. *Гуд Г.Х., Макол Р.З.* Системотехника: Введение в проектирование больших систем. — М.: Сов. радио, 1962. — 383 с.
8. *Дружанин В.В., Конторов Д.С.* Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем). — М.: Сов. радио, 1976. — 296 с.
9. *Карташев В.А.* Система систем. Очерки общей теории и методологии. — М.: Прогресс-академия, 1995. — 416 с.
10. *Качала В.В.* Основы системного анализа. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2004. — 104 с.
11. *Ковалевский В. П.* Проблемы теории и методологии проектирования регионального университетского комплекса // Университетское управление: практика и анализ. 2003. № 2(25). С. 25–30.
12. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ. — М.: Высш. шк., 1989. — 367 с.
13. *Могилевский В.Д.* Методология систем. — М.: Экономика, 1999. — 251 с.
14. Методологические проблемы кибернетики: В 2-х т. — М.: МГУ, 1970. Т. 1. — 350 с. Т. 2. — 289 с.
15. *О'Конор Д., Мак-Дермот Я.* Искусство системного мышления. Творческий подход к решению проблем и его основные стратегии. — Киев: София, 2001. — 304 с.
16. *Поваров В.М.* Об уровнях сложности систем // Методологические проблемы кибернетики: материалы к Всесоюз. конф. — М.: МГУ, 1970. Т. 2. — С 176–179.
17. *Прангишвили И.В.* Системный подход и общесистемные закономерности. — М.: СИНТЕГ, 2000. — 528 с.
18. *Прангишвили И.В.* Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. — М.: Наука, 2003. — 428 с.
19. Разум побеждает. Рассказывают ученые / Сост. *Е.В. Дубровский*. — М.: Политиздат, 1979 — 352 с.
20. Системный анализ в экономике и организации производства / *С.А. Валуев, В.Н. Волкова, А.П. Градов* и др. — Л.: Политехника, 1991. — 398 с.
21. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. *В.Н. Волковой, В.Н. Козлова*. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.
21. Служба тематических толковых словарей — <http://www.glossary.ru>.
22. *Сурмин Ю.П.* Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. — Киев: МАУП, 2003. — 368 с.
23. 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.
24. *Черняк Ю.И.* Анализ и синтез систем в экономике. — М.: Экономика, 1970. — 151 с.
25. *Черняк Ю.И.* Системный анализ в управлении экономикой. — М.: Экономика, 1975. — 191 с.

26. Флейшман Б.С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. — М.: Сов. радио, 1971. — 225 с.

27. Фон Нейман Дж. Общая и логическая теория автоматов // Тьюринг А. Может ли машина мыслить? — М.: ИЛ, 1960. — С. 59–102.

28. Энциклопедия кибернетики. В 2-х т. — Киев: Главная редакция УСЭ, 1974. Т. 2. — 619 с.

29. Эшби У.Р. Введение в кибернетику. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. — 432 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение классификации.
2. Объясните суть классификации по происхождению.
3. Какие системы называются антропогенными?
4. Какие системы называются эргономическими?
5. Объясните суть классификации по объективности существования.
6. Приведите примеры абстрактных систем.
7. Объясните суть концептуальных систем.
8. Какие системы относятся к классу действующих?
9. Дайте определение системы:
 - а) технической;
 - б) технологической.Укажите элементы и связи в этих системах.
10. Приведите примеры:
 - а) технических систем;
 - б) технологических систем.
11. Дайте определение:
 - а) экономической системы;
 - б) социальной системы (как созданной);
 - в) организационной системы.Укажите элементы и связи в этих системах.
12. Перечислите обеспечения организационных систем.
13. К какой системе относятся и в реализации каких систем участвуют:
 - а) холодильник в магазине;
 - б) калькулятор в магазине;
 - в) весы в магазине;
 - г) продавец в магазине;
 - д) шофер такси;
 - е) директор компании?
14. В чем заключаются отличия централизованных и децентрализованных систем?
15. Приведите примеры:
 - а) централизованных систем;
 - б) децентрализованных систем.
16. Как классифицируются системы по размерности?
17. Докажите, что предприятие можно отнести к одномерным системам.
18. К какой системе по размерности можно отнести элементарное динамическое звено?
19. В чем заключается главное отличие линейных и нелинейных систем?
20. Раскройте суть принципа суперпозиции.
21. По каким причинам специалисты стремятся представить нелинейные системы линейными?

22. Приведите примеры графических моделей существенно нелинейных систем.
23. Можно ли линеаризировать:
 - а) дискретный элемент;
 - б) дискретную систему?
24. В чем заключается отличие каузальных и целенаправленных систем?
25. В чем заключаются проблемы при работе с активными системами?
26. Можно ли отнести бухгалтерию к целенаправленным системам?
27. В чем отличие гомогенных систем от гетерогенных?
28. Выделите гомогенные подсистемы в компьютеризированной информационной системе большой организации.
29. В чем заключается сложность работы с гетерогенными системами?
30. Дайте определение дискретного элемента.
31. В чем отличие непрерывных систем от систем дискретного действия?
32. Опишите особенности динамических характеристик дискретных элементов.
33. Раскройте суть классификации систем по сложности, предложенную Ст. Биром.
34. Какие аспекты сложности не вошли в классификацию, предложенную Ст. Биром?
35. В чем на ваш взгляд отличаются сложные и большие системы?
36. В чем суть динамической сложности систем?
37. Дайте определение детерминированной системе.
38. В чем кроются причины стохастичности?
39. Как можно количественно оценить степень организованности системы?
40. Какие системы относятся к хорошо организованным?
41. Какие системы относятся к диффузным?
42. Покажите подходы к анализу плохо организованных систем.
43. Перечислите особенности экономических систем (как самоорганизующихся).
44. Укажите основную особенность анализа самоорганизующихся систем.
45. Приведите гипотезу фон Неймана для описания сложных систем.

ГЛАВА 8

Модели в системном анализе

Модели в системном анализе занимают центральное место. Они помогают представить систему в удобном для исследования виде и выступают в качестве основного инструмента проектирования. В зависимости от стадии и целей исследования или проектирования применяются *аксиологическое* или *каузальное* представления системы [33].

☑ **Аксиологическое представление системы** — это отображение системы в терминах целей и функций (функционалов), связывающих цели со средствами их достижения.

☑ **Каузальное представление системы** — это описание системы в терминах влияния одних переменных на другие.

Сложно выстроить порядок применения того или иного представления. Обычно представление системы начинается с идентификации целевых выходов (y). Затем выясняются входные факторы, оказывающие существенное влияние на целевые выходы. При этом важно сразу разделить входы на три группы (см. разд. 4.1.3): возмущения (x), управления (u) и помехи (ϵ). После этого выясняется наличие побочных эффектов — нецелевых выходов, оказывающих значимое влияние на окружающую среду.

Аксиологическое представление позволяет оценить (спроектировать) возможности и средства влияния на выходы системы со стороны субъекта.

Примеры: 1. «Дерево целей».

2. Кибернетическая модель $y = F(u)$.

Каузальное (от cause — причина) *представление* подразумевает установление причинно-следственных отношений в терминах «вход-выход», а также оценку влияния элементов системы друг на друга (без употребления понятий цели и средств ее достижения). При этом будущее состояние системы определяется ее предыдущими состояниями и воздействиями среды, в том числе и со стороны субъекта управления.

Примеры: 1. Кибернетическая модель статики $y = F(x, u)$.
 2. Модель динамики $y'(t) = F(y(t), x(t), u(t))$.

8.1. Задачи и проблемы принятия решения

Как говорилось ранее, любая деятельность направлена на достижение определенных целей. При этом проблемность обычно заключается в выборе средств достижения цели при заданном множестве ограничений. Если такой выбор очевиден или однозначен, то мы имеем дело с задачей принятия решения (проблема как таковая отсутствует), в противном случае говорят о «**проблеме принятия решения**».

Главной целью системного анализа можно считать оказание помощи в понимании и решении имеющейся проблемы путем *перевода проблемы*, которая возникает при проектировании или управлении, в *задачу принятия решения* (задачу выбора), т. е. *ведет к постановке такой задачи* («поставленная задача — наполовину решенная задача»). *Поставить задачу означает, прежде всего, понять ее условия*, что достигается путем выбора соответствующего представления (описания), т. е. модели. При этом стремятся к наибольшей формализации представления, что уменьшает неполноту, избыточность и неоднозначность в понимании объекта.

В случае представления задачи в виде математической модели область поиска решения хорошо определена и чаще всего основная трудность решения уже выявлена. В этом случае говорят о *задаче в замкнутой форме* или *замкнутой формулировке задачи* [25]. В наиболее общем виде условия задачи принятия решения математически могут быть записаны следующим образом.

В заданном множестве средств достижения цели U найти (выбрать) точки u^ (рис. 8.1), удовлетворяющие заданному множеству критериев $Q(u)$ и множеству ограничений, выражаемых в виде области допустимых значений $\Omega(u)$.*

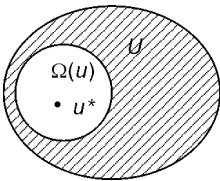


Рис. 8.1. Поиск решений во множествах средств достижения цели (U) и ограничений (Ω)

Если удастся формализовать исходную проблему, т. е. свести ее к задаче, решение которой базируется на законах физики, химии и других фундаментальных областей знаний, или когда задача может быть поставлена в терминах конкретного класса прикладных задач, для которого разработан соответствующий математический аппарат, применять термин «проблема принятия решения» нет необходимости [7].

Задача принятия решения становится *проблемой*, когда для постановки задачи и ее решения не может быть сразу определен подходящий аппарат формализации — требуется разработка специальных

подходов, приемов и методов. При этом процесс постановки задачи часто требует участия специалистов различных областей знаний. В таких случаях возникает необходимость:

- определить область *проблемы принятия решения* (границы системы);
- выявить факторы, влияющие на ее решение (входы системы и внутренние факторы, влияющие на целевой выход);
- подобрать приемы и методы, которые позволяют сформулировать или поставить задачу таким образом, чтобы решение было принято.

Поясним процесс формализации задачи принятия решения на примере задачи по перемещению из одного пункта в другой [7, 33].

Пример. В терминах проблемы принятия решения эту задачу можно представить следующим образом:

- *задана цель* — переместить груз из B в A ;
- *имеются возможные средства* $U = \{U_m, U_t\}$: $U_m = \{M_1, M_2, \dots\}$ — маршруты; $U_t = \{T_1, T_2, \dots\}$ — различные транспортные средства доставки грузов;
- *необходимо* найти такое $u^* \in U$, которое обеспечит достижение цели.

Если не известен набор средств для достижения цели (U), то имеет место задача с неопределенностью, и задачи принятия решения нет. Ее также нет, если нет дополнительных требований, т. е. безразлично, какой маршрут и какие транспортные средства выбирать. Она возникает, когда появляется критерий (или несколько критериев), отражающий требования к достижению цели.

В качестве критерия в рассматриваемой задаче можно, например, принять время ($Q = t$). Тогда возможны следующие критерии:

- $Q_1 = t_{\text{зад}}$ — достичь пункта A за заданное время;
- $Q_2 \leq t_{\text{зад}}$ — достичь пункта A до заданного времени;
- $Q_3 \rightarrow \min$ — достичь пункта A за минимальное время.

Для решения задачи нужно определить взаимосвязь цели со средствами ее достижения $Q = F(U)$. В данной задаче критерием достижения цели является время в пути (t), а средствами ее достижения:

- *маршрут* — оценивается длиной пути L ,
- *транспорт* — оценивается скоростью v транспортного средства, в простейшем случае — средней скоростью.

В данном случае в качестве выражения, связывающего цель со средствами $Q = F(U)$, можно использовать закон движения $t = F(L, v)$, который в случае равномерного прямолинейного движения имеет вид $t = L/v$.

Если такое выражение получено, то проблема свелась к задаче принятия решения: варьируя либо v при $L = \text{const}$, либо L при $v = \text{const}$, либо v и L одновременно, можно получить варианты решения и выбрать из них наиболее приемлемый.

При постановке рассматриваемой задачи могут быть учтены не только основные требования, отражаемые с помощью критерия, но и дополнительные, которые могут выступать в качестве *ограничений* $\Omega(u)$. В данной задаче это могут быть затраты на создание, аренду или приобретение средств транспортировки грузов, особые требования к перевозке бьющихся грузов и т. п.

Таким образом, для принятия решения необходимо получить аксиологическое описание проблемы — *выражение, связывающее цель*

со средствами ее достижения. Такие выражения получили в разных прикладных направлениях различные названия [7]: *критерий функционирования, критерий или показатель эффективности, целевая или критериальная функция, функция цели* и т. п.

В зависимости от изученности проблемной ситуации возможны различные подходы к формированию целевой функции [7].

1. Если удастся получить выражение, связывающее цель со средствами, то задача практически всегда решается. Получить такие выражения легко, если известен **закон**, позволяющий связать цель со средствами: $Q = F(U)$. Эти выражения могут представлять собой не только простые соотношения, подобные рассмотренному выше, но и более сложные, составные критерии.

Пример. В нашем случае цель однозначно связывается со средствами законом движения: $t = L/v$.

2. Если закон не известен, то стараются определить **закономерности** на основе статистических исследований или исходя из наиболее часто встречающихся на практике функциональных зависимостей.

Пример. В случае выбора дороги с различным покрытием, необходимо найти влияние качества покрытия дорожного полотна k_p на длительность движения: $t = F(k_p)$. Для определения этой закономерности надо провести соответствующий эксперимент на участках дороги с различным покрытием.

3. Если не удастся установить закономерность, то выбирают или разрабатывают **теорию**, в которой содержится ряд утверждений и правил, позволяющих сформулировать **концепцию** и конструировать на ее основе процесс принятия решения.

Пример. Если в качестве средства достижения цели будем учитывать время суток, в которое производится движение, то здесь мы не имеем ни закона, ни закономерности влияния времени суток на время движения. К тому же, нет возможности провести эксперимент для установления соответствующей зависимости. Тогда за основу берется теория, из которой следует, что ночью уменьшается количество машин на дороге, что позволяет преодолеть расстояние от пункта А до В быстрее.

4. Если и теории не существует, то выдвигается **гипотеза** и на ее основе создаются **имитационные модели**, с помощью которых исследуются возможные варианты решения.

Пример. Если мы решаем задачу подбора водителя для наших перевозок, то выдвигается гипотеза о том, что на время перевозки влияет стаж работы водителя. Закона нет, поставить эксперимент по установлению такой закономерности не представляется возможным, теории нет, нет даже уверенности, что такое влияние имеет место. Исходя из имеющихся знаний, строится некоторая имитационная модель, которая и служит основой для принятия решения.

Существуют и другие трудности формализации целевой функции. Иногда могут варьироваться не только *средства* достижения

цели, критерии и ограничения, но и сами цели, если результат их достижения не приводит к удовлетворению потребностей лица, принимающего решения.

Кроме того, в числе критериев могут быть и *принципиально неформализуемые*, например комфорт для пассажиров.

Пример. Если целью является комфорт, то можно выбрать такси вместо общественного транспорта, а при передвижении между населенными пунктами иногда лучше выбрать более длинную, но асфальтированную дорогу, чем более короткую, но ухабистую.

При решении задач проектирования, реорганизации или управления сложными системами, в частности экономическими объектами, требуется учитывать большое число факторов различной природы, являющихся предметом исследования различных областей знаний. В этих условиях один человек не способен ни поставить задачу, ни решить ее — проблема принятия решений становится проблемой коллективного выбора целей, критериев, средств и вариантов достижения цели, т. е. *проблемой коллективного принятия решения*.

Принятие решений в системах управления (в политике, экономике, в военной и других областях) часто связано с *дефицитом времени*: «лучше принять не самое хорошее решение, но в требуемый срок, так как в противном случае лучшее решение может уже и не понадобиться» [7]. Поэтому решение часто приходится принимать при не полностью определенной постановке задачи, в условиях дефицита информации о системе, ресурсах (средствах), ограничениях и целях.

В этих проблемных ситуациях на помощь приходят *системные представления, системный подход и методы системного анализа*.

8.2. Методы моделирования систем

Постановка любой задачи заключается в том, чтобы по возможности перевести ее словесное, *вербальное*, описание в *формальное* [7]. Вопросы формирования модели сложных объектов и доказательство их адекватности и являются основным предметом системного анализа.

Существующие методы формирования моделей представляют собой некий спектр методов, дающих различную степень формализации. Проранжировав их по этому свойству, можно построить некую условную шкалу методов (рис. 8.2).

В работе [7] авторы разделяют этот «спектр» методов примерно в середине на два больших класса:

- *методы формализованного представления систем* (для простоты будем называть их **формальными методами**);
- *методы, направленные на активизацию использования интуиции и опыта специалистов* (для простоты будем называть их **эвристическими методами**).

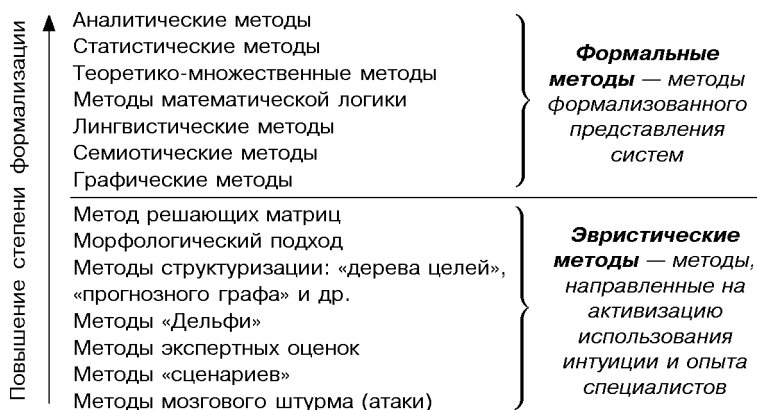


Рис. 8.2. Условная шкала методов с различной степенью формализации

Необходимо отметить, что строгого разделения на формальные и неформальные методы не существует. Можно говорить только о большей или меньшей степени формализованности или, напротив, большей или меньшей опоре на интуицию, «здравый смысл». (*Системный анализ иногда определяют как «формализованный здравый смысл»* [22].) К тому же сам порядок расположения методов в виде выше-названной шкалы является не бесспорным, однако любая классификация заведомо лучше ее отсутствия.

Серьезные проблемы возникают при построении моделей экономических объектов. Экономические системы слишком сложны, чтобы получить их полные адекватные модели.

И здесь следует согласиться с В.Н. Спицнаделем, что вербальная модель лучше, чем отсутствие модели; она лучше математической модели, которая «насаждает фальсифицированную реальность»; «вероятно лучше иметь сначала какую-то нематематическую модель со всеми ее недостатками, но охватывающую некоторый незамеченный ранее аспект исследуемой реальности..., чем начинать со скороспелых математических моделей» [37].

Рассмотрим краткий обзор методов моделирования (подробное описание сущности выше-названных и других методов моделирования, применяемых в системных исследованиях, можно найти в книгах [7, 23, 26, 33]).

8.2.1. Методы формализованного представления систем

Формальные методы можно разбить в соответствии с классификацией Ф.Е. Темника [9, 10] на следующие группы методов.

1. **Аналитические** методы:

- методы *классической математики*, включая интегро-дифференциальное исчисление, методы поиска экстремумов функций, вариационное исчисление и т. п.;
- методы *математического программирования*;
- первые работы по *теории игр* и т. п.

2. **Статистические** методы:

- *теоретические разделы математики*: теорию вероятностей, математическую статистику;
- направления *прикладной математики*, использующие *стохастические представления*: теорию массового обслуживания, методы статистических испытаний (основанные на методе Монте-Карло), методы выдвижения и проверки статистических гипотез Вальда и другие методы статистического имитационного моделирования.

3. Методы **дискретной математики**: *теоретико-множественные, логические, лингвистические, семиотические представления (методы)*;

4. **Графические** методы, включающие *теорию графов* и разного рода графические представления информации типа диаграмм, гистограмм и других графиков.

К графическим методам можно отнести методы структурного системного анализа и объектного моделирования [6, 21, 24].

8.2.2. Методы, направленные на активизацию использования интуиции и опыта специалистов

Эти методы активизируют выявление и обобщение мнений опытных специалистов — *экспертов*, которые вырабатывают *экспертные оценки*.

☒ **Эксперт** — это квалифицированный специалист в исследуемой области.

☒ **Экспертные оценки** — это количественные и качественные оценки процессов и явлений, выполняемые экспертами на основе суждений [30].

В теории систем был период, когда все неформальные методы называли *эвристическими*, отождествляя этот термин с термином «экспертные методы» в широком смысле.

☒ **Эвристика** — это а) совокупность логических приемов и методических правил теоретического исследования и отыскания истины [36], выведенных эмпирически, полезность которых обоснована лишь тем, что они во многих (хотя и не во всех) случаях проводят к успеху;

б) эмпирическое правило, упрощающее или ограничивающее поиск решений в (сложной) предметной области [34].

✓ **Эвристические методы** — это методы решения задач, основанные на эвристике или эвристическом рассуждении, т. е. на использовании правил и приемов, обобщающих прошлый опыт, и интуиции решающего [33].

Однако впоследствии для методов, которые используются как средства работы с экспертами, в качестве обобщающего названия был предложен термин «методы, направленные на активизацию интуиции и опыта специалистов» [7]. На сегодняшний день разработано довольно много таких методов, часть из них является расширением или дополнением некоторых «базовых» методов*.

Как вариант классификации методов, направленных на активизацию интуиции и опыта специалистов, их можно сгруппировать таким образом:

- *методы индивидуальной экспертизы;*
- *методы групповой экспертизы* (метод номинальных групп, методы типа «мозговой атаки» или коллективной генерации идей, метод «635», метод критической атаки или «разносная» атака);
- *методы выработки коллективных решений* (экспертное фокусирование, метод комиссий, метод интеграции решений, «Консилиум», метод SWOT-анализа, метод анализа конкретных ситуаций, Балинтова сессия, метод «метаплан», метод «за — против», метод Дельбека, метод ролей, блочные методы, дискуссия с разделением интеллектуальных функций, методы типа «сценариев», методы типа «Дельфи», метод синектики);
- *методы структуризации;*
- *морфологические методы* (метод отрицания и конструирования, метод систематического покрытия поля, метод морфологического ящика и др.);
- *методы организации сложных экспертиз* (методика ПАТТЕРН, метод решающих матриц).

Более подробно с указанными методами можно познакомиться в книге [33] или в Интернете.

8.3. Математические модели

Рассмотрим постановку задачи и алгоритмы решения задач построения математических моделей аналитическими и статистическими методами.

* К сожалению, эти методы слабо классифицированы. Работа по их классификации может явиться темой исследовательской работы.

8.3.1. Постановка задачи построения математической модели

Рассмотрим задачи построения модели в следующей постановке [19]. Пусть имеется некоторый объект с m входами $X = (x_1, \dots, x_m)$ и одним выходом y , связанными некоторой функциональной зависимостью

$$y = F^0(X, A) + \varepsilon,$$

где $A = (a_1, \dots, a_m)$ — вектор коэффициентов (параметров); ε — погрешность.

Необходимо по выборке из k значений $W = \{w^1, \dots, w^i, \dots, w^k\}$, где $w^i = \{y_j^i, X^i\}$, найти такое функциональное преобразование

$$F^{\text{опт}}: X \Rightarrow y,$$

чтобы минимизировать некоторый критерий рассогласования модели и объекта (критерий качества модели):

$$D_F \rightarrow \min_{F \in \mathcal{F}},$$

где F — функциональное преобразование (фактически структура математической модели); \mathcal{F} — множество возможных преобразований (структур моделей).

8.3.2. Проблемы построения модели

В задаче построения математической модели возникает ряд проблем, среди которых можно выделить следующие:

- выбор структуры модели (функции $F(X, A)$) [11];
- оценивание вектора коэффициентов модели A ;
- выбор критерия оценки качества модели D .

Все эти задачи тесно связаны между собой: выбирая структуру модели, надо оценивать ее качество, а чтобы оценить качество модели, необходимо предварительно найти ее коэффициенты.

Выделяют следующие методы построения математических моделей [29]:

- аналитический;
- статистический (экспериментальный);
- экспериментально-аналитический.

Аналитические модели (их иногда называют «физическими») строятся исходя из анализа объекта и известных законов (физики, химии, экономики и т.п.). Очень часто такие модели строят «за столом», т. е. даже не видя объекта исследования.

Экспериментальные модели строятся на основе экспериментальных данных, полученных с объекта исследования. Фактически используется метод «черного ящика», при котором математические модели строятся на основании наблюдений за входными и выходными переменными.

✓ *Построение математических моделей по результатам наблюдения входных и выходных переменных объекта получило название «идентификация» [41].*

Первоначально термин «идентификация» использовался для задачи оценивания динамических характеристик по экспериментальным данным [31]. Затем понятие идентификации было расширено и на определение статических характеристик. При этом определяются не только коэффициенты модели (*идентификация* в узком смысле), но и ее структура (*структурная идентификация*).

Однако, как показывает практика, ни тот ни другой подход не используется в чистом виде: при построении аналитических моделей приходится их подстраивать по данным эксперимента, а в экспериментальных моделях закладываются некоторые априорные сведения об объекте (применяется так называемый метод «серого ящика»). Поэтому наиболее распространен *экспериментально-аналитический подход*, когда исходная структура модели строится на основании анализа процессов в системе, а коэффициенты определяются по экспериментальным данным.

8.3.3. Выбор структуры модели

Уточним постановку задачи структурной идентификации. Будем считать, что нам ничего не известно о структуре истинной зависимости F^0 . Тогда при m входных переменных теоретически может существовать бесконечное количество структур $F(X, A) \in \mathcal{F}$. Поскольку нам не известна истинная структура F^0 , то, если даже мы найдем такую F , которая равна F^0 , мы не узнаем об этом. Таким образом, задача напоминает поиск иголки в стоге сена, только... наш «стог сена» бесконечен по размерам и мы не знаем в лицо «иголку».

Решение любой задачи выбора состоит из двух подзадач: «генерация» альтернатив и формирование критерия выбора наилучшей из них. В отношении структуры модели эти подзадачи можно сформулировать как необходимость:

- разработать алгоритм «генерации» (перебора) структур;
- сформировать критерий оценки качества структуры (качества модели).

Генерация структур. Первоначально необходимо определить (ограничить) область поиска структуры \mathcal{F} , поскольку нельзя всерьез

говорить о поиске в бесконечном «стоге сена». Для определения области поиска \mathcal{F} мы можем использовать известную информацию о свойствах объекта. При этом, конечно, не исключается, что вне области \mathcal{F} может находиться структура $F^{\text{опт}*} \notin \mathcal{F}$ с лучшим значением критерия, чем $F^{\text{опт}} \in \mathcal{F}$: $D_{F^{\text{опт}}} < D_{F^{\text{опт}*}}$.

Следующий шаг — разработка алгоритма А (или алгоритмов), который будет формировать последовательность структур $\{F_1, F_2, \dots\} \in \mathcal{F}$. При этом каждый алгоритм реализует свою последовательность:

$$A_i: F_{i1} \rightarrow F_{i2} \rightarrow F_{i3} \dots, \quad i = 1, 2, \dots,$$

и определяет область перебора структур $\mathcal{F}_i \subset \mathcal{F}$.

Алгоритмы перебора структуры моделей. Наиболее простой вариант реализуется при помощи алгоритма полного перебора $A_{\text{пп}}$ — путем последовательного рассмотрения всего множества структур: $\{F_1, F_2, \dots\} = \mathcal{F}$. В результате будет найдена оптимальная структура

$$F^{\text{опт}} = \arg \min_{F \in \mathcal{F}} D.$$

Современная компьютерная техника позволяет успешно реализовать такой алгоритм для не очень большого числа входных переменных. В случае поиска структуры модели как линейной комбинации от одной до $m - 1$ исходных входных переменных или их функциональных преобразований (метод «всех возможных регрессий») число анализируемых вариантов будет равно $2^m - 2$ (например, при двадцати переменных потребуется рассмотреть 1048574 моделей) [3]. Если переменных много и/или мы ограничены во времени, то необходимы алгоритмы, которые, не прибегая к полному перебору, за конечное время найдут приемлемый (квазиоптимальный) вариант структуры модели: $F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow \dots \rightarrow F^{\text{копт}}$, при этом $D_{F^{\text{копт}}} \geq D_{F^{\text{опт}}}$.

В настоящее время отсутствуют алгоритмы генерации структур (за исключением $A_{\text{пп}}$), которые можно было бы считать наилучшими. Алгоритм полного перебора можно заменить алгоритмом случайного выбора структур $A_{\text{случ}}$, при котором за конечное число шагов (или конечное время) анализируется множество структур $\mathcal{F}_{\text{случ}} \subset \mathcal{F}$ и среди них находится квазиоптимальное решение

$$F^{\text{копт}} = \arg \min_{F \in \mathcal{F}_{\text{случ}}} D.$$

Безусловно, за конечное время, хотя иногда и очень продолжительное, можно случайным образом перебрать все структуры из \mathcal{F} , однако такой алгоритм вряд ли можно считать оптимальным. Необходимы некоторые регулярные алгоритмы, которые обеспечивали бы

последовательное приближение к оптимальной структуре:

$$F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow F_3 \rightarrow \dots \rightarrow F^{\text{копт}} \quad \text{при} \quad D_{F_1} > D_{F_2} > D_{F_3} > \dots > D_{F^{\text{копт}}}.$$

Из таких алгоритмов можно назвать следующие:

- алгоритмы шаговой регрессии (ШР) [12, 38];
- алгоритм эволюционной идентификации (ЭИ) [20];
- алгоритмы метода группового учета аргументов (МГУА) [15].

8.3.4. Методы и алгоритмы выбора структур моделей

Методы шаговой регрессии. Основная идея шаговой (иногда говорят пошаговой) регрессии заключается в гипотезе о том, что искомую структуру можно найти, трансформируя модель путем следующих последовательных действий:

- 1) добавления к модели наиболее значимых по некоторому критерию переменных (метод включения, или «присоединения»);
- 2) исключения незначимых по некоторому критерию переменных (метод исключения, или «удаления»);
- 3) добавления наиболее значимых переменных при одновременном исключении незначимых (метод добавления-исключения, или «присоединения-удаления»).

В качестве добавляемых (удаляемых) переменных могут выступать не только сами исходные переменные x_1, \dots, x_m , но и функции от них $f_l(x_1, \dots, x_m)$, $l = 1, 2, \dots$, например: x^2 , $\ln(x)$, $x_i x_j$. Частным случаем функций можно считать и функции вида: $f_i(x_1, \dots, x_m) = x_i$, $i = 1, \dots, m$. Таким образом, с помощью шаговой регрессии можно строить нелинейные (нелинейные по переменным, но линейные по параметрам) математические модели вида

$$y = a_0 + \sum_i a_i f_i(x_1, \dots, x_m).$$

1. Метод включения начинает свою работу с выбора наиболее значимой (по некоторому критерию) переменной (функции) из списка: $f_l(\cdot)$, $l = 1, \dots, L$. Затем из оставшихся переменных выбирается наиболее значимая и включается в модель. И так до тех пор, пока улучшается качество модели. Качество последней во многом зависит от порядка вхождения переменных в модель, который, в свою очередь, определяется используемым критерием включения. Поскольку между переменными практически всегда имеется ненулевая корреляционная зависимость, то не выполняется правило аддитивности. В результате переменная, значимая на предыдущих шагах, может стать незначимой на последующих, и ее присутствие может препятствовать

включению в модель другой, более значимой переменной. Эта особенность ограничивает возможность метода включения.

2. Метод исключения первоначально рассматривает модель, в которую включены все имеющиеся L входных переменных. Затем из них последовательно исключаются незначимые (по некоторому критерию) переменные до тех пор, пока улучшается качество модели. Структура конечной модели может совпадать со структурой, полученной по методу включения, но для сложных моделей это скорее исключение, чем правило. Данному методу присущ недостаток метода включения: исключенные на предыдущих шагах переменные могут оказаться значимыми после исключения других переменных. Кроме того, к недостаткам можно отнести и повышенные требования к вычислительным ресурсам при работе с массивами большого размера на первых шагах алгоритма, а при небольших выборках экспериментальных данных — алгоритм может вообще не работать (например, если $k < L$).

3. Объединение вышеназванных методов дает метод **включения-исключения**, в основе которого лежит метод включения, но дополнительно на каждом шаге алгоритма происходит проверка переменных на значимость: незначимые переменные исключаются из модели. При кажущейся эффективности такого подхода метод не дает уверенности в оптимальности найденной структуры. В работе [17] предложен алгоритм, автоматически выбирающий порог исключения переменных, что частично решает проблему выбора соответствующего критерия, но опять же не гарантирует нахождения глобального экстремума.

Метод эволюционной идентификации. Стохастической разновидностью шаговой регрессии является метод эволюционной идентификации, в котором переменные для включения в модель выбираются с помощью генератора случайных чисел с заданным законом распределения.

Рассмотрим работу метода на примере следующего алгоритма [20]. С помощью генератора случайных чисел из множества исходных входных переменных X выбирается переменная x_j (с вероятностью, равной $w_j^x / \sum_{j=1}^m w_j^x$, где w_j^x — вес j -й переменной). Далее также выбирается вид функционального преобразования входных переменных $f_q(x_j) \in \{f_1(\cdot), \dots, f_Q(\cdot)\}$ (с вероятностью, равной $w_j^p / \sum_{q=1}^Q w_q^p$, где w_q^p — вес q -й переменной). Веса w_j^x и w_q^p задаются в начале счета и в дальнейшем могут изменяться (адаптироваться) в зависимости от его промежуточных результатов. В частности, при исключении функции $f_q(x_j)$ из модели происходит корректировка весов в сторону

их уменьшения:

$$\begin{aligned}w_j^x &= w_j^x - \Delta w^x; \\w_q^p &= w_q^p - \Delta w^p,\end{aligned}$$

где Δw^x и Δw^p — заданные уровни «наказания». Таким образом происходит адаптация весов к конкретным данным. В результате переменные и функциональные преобразования, имеющие большой вес, будут чаще участвовать в синтезе структуры модели.

Если образовавшаяся функция $f_q(x_j)$ отсутствует в модели и ее включение улучшает критерий качества D , то она остается в модели. После этого производится поочередное исключение переменных из нее. В результате исключаются все переменные, отсутствие которых приводит к улучшению D .

Метод группового учета аргументов (МГУА). Сложно говорить о МГУА как о конкретном методе, поскольку начиная с 1968 г. разработаны десятки его разновидностей [13, 14, 15]. В МГУА можно выделить два направления: комбинаторные и селективные (еще их называют многоядными) алгоритмы.

В комбинаторном алгоритме сначала рассматривается множество моделей от одной переменной:

$$y_r = a_0 + a_1 z_r,$$

где $z_r \in \{x_i, x_i x_j : i, j = 1, \dots, m\}$.

Затем рассматривается множество всех возможных моделей от двух переменных:

$$y_{rv} = a_0 + a_1 z_r + a_2 z_v.$$

Далее от трех и так до тех пор, пока улучшается критерий D . Возможности комбинаторного алгоритма ограничены возможностями вычислительной техники, поскольку введение одной дополнительной входной переменной увеличивает время счета примерно вдвое.

В селективном алгоритме на первом шаге (ряду алгоритма) рассматриваются все возможные модели (так называемые частные описания) вида

$$y_r^1 = \varphi(z_1, \dots, z_L) = a_0 + a_1 z_i + a_2 z_j$$

или

$$y_r^1 = a_0 + a_1 z_i + a_2 z_j + a_3 z_i z_j + a_4 z_j^2 + a_5 z_j^2.$$

Затем по некоторому критерию из них отбирается подмножество из V наиболее значимых частных описаний, которые в следующем

ряду алгоритма играют роль входных переменных:

$$y_v^2 = \varphi(y_1^1, \dots, y_r^1, \dots), \quad v = 1, \dots, V,$$

и так до тех пор, пока улучшается качество модели.

8.3.5. Выбор критерия оценки качества модели

Различные алгоритмы порождают необходимость определиться с множеством различных критериев. В частности, необходимо выбрать критерий включения переменных в модель и их исключения, критерий останова алгоритма и критерий оценки окончательной модели.

Не вдаваясь в проблемы отдельных алгоритмов, рассмотрим вопрос останова шаговых процедур (все описанные выше методы имеют шаговую технологию). Общий принцип останова шаговых алгоритмов структурной идентификации следующий: расчеты надо прекращать, когда дальнейшая работа алгоритма не приводит к улучшению качества модели. Отсюда следует общность критериев останова и качества модели.

Что такое «хорошая модель»? В идеале следовало бы стремиться к близости операторов F и F^0 , однако истинную функцию объекта F^0 мы не знаем и, как правило, никогда не узнаем.

Как известно, критерий оценки качества модели зависит от ее назначения. Например, если предполагается использовать модель для управления или прогнозирования, то необходима высокая прогностическая способность модели — на одни и те же входные воздействия модель и объект должны давать близкие результаты на выходе. Если модель используется в системе измерений, то целью является минимум максимального отклонения значений модели и объекта. Если необходимо построить распознающую систему, то в качестве критерия берут ошибку распознавания — отношение правильных ответов к общему их числу.

Если ограничиться задачей управления, то в основу искомого критерия останова можно заложить требование близости значений выхода модели y^M и объекта y при одинаковых значениях входных переменных $X^i \in \mathbf{X}$, $i = 1, \dots, k$, где \mathbf{X} — рабочая область изменения входных переменных:

$$D(y, y^M) \rightarrow \min_{F \in \mathcal{F}}.$$

Наиболее распространен следующий критерий оценки качества модели:

$$D(y, y^M) = \sum_{i=1}^k (y_i - y_i^M)^2.$$

В приведенном виде среднеквадратичная ошибка отклонения рассчитывается в процентах от среднего значения \bar{y} :

$$D = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (y_i - y_i^M)^2} \cdot 100 \, \%.$$

Все критерии останова алгоритмов структурной идентификации (они же критерии качества модели), за исключением критерия достижения заданного числа входных переменных в модели и ему подобных, можно разбить на две группы: внутренние и внешние [13]. Внутренние критерии вычисляются на основании данных, участвующих в построении модели, а внешние — на основании дополнительных данных.

К внутренним критериям в первую очередь следует отнести остаточную ошибку модели — сумму отклонений (абсолютных или квадратов разностей) значений выходных переменных объекта и модели. Далее следует назвать коэффициент детерминации (квадрат множественного коэффициента корреляции R^2), приведенную остаточную ошибку, приведенный R^2 и критерий Марллоуса C_p [12], а также другие критерии [5, 42].

Более надежным представляется использование нескольких выборок данных: по одним выборкам строится модель, а по другим — оценивается ее качество. Идея использования дополнительных данных для оценки качества моделей высказывается давно и кажется даже очевидной. По этому поводу Р.Д. Сни (R.D. Snee) считает, что, «хотя эти идеи не являются новыми, им не уделено соответствующего внимания в статистической литературе» [44]. В ряде работ [27, 43, 44 и др.] дополнительные экспериментальные данные (экзаменационные точки) предлагается применять для оценки качества готовых моделей.

Однако необходимость в дополнительной выборке данных возникает еще в процессе построения модели. Одним из первых применений дополнительной выборки в алгоритмах идентификации было введение так называемых проверочных точек в МГУА [14], которые использовались при выборе промежуточных частных моделей. Исследования МГУА и шаговой регрессии показали необходимость дополнительной независимой выборки данных. Такая выборка была названа *контрольными точками* и предназначалась для контроля за процессом построения модели [18]. Необходимость контрольных точек, в частности, подтверждается опасностью неустойчивости процесса структурной идентификации.

Таким образом, предлагается из множества экспериментальных

данных выделять часть точек в качестве контрольных. Среднеквадратичная ошибка на этих точках может служить в качестве критерия останова алгоритмов структурной идентификации. Дело в том, что в шаговых алгоритмах по мере усложнения структуры модели она монотонно приближается к экспериментальным (обучающим) точкам ($k_{об}$), по которым оцениваются ее коэффициенты: $y_m^i \rightarrow y^i, i = 1, \dots, k_{об}$. Если наблюдать поведение модели на дополнительных экспериментальных точках, то можно заметить, что, начиная с некоторого шага, модель начинает удаляться от этих точек (в случае неустойчивости это удаление начинается с первого же шага). Исходя из этого, предлагается определять момент останова алгоритма по ошибке на контрольных точках — расчеты прекращаются в момент достижения первого минимума ошибки по шагам алгоритма.

В силу независимости от конкретного алгоритма, в качестве критерия качества готовых моделей или для сравнения моделей, построенных с помощью различных алгоритмов, предлагается также использовать среднеквадратичную ошибку на контрольных точках.

8.3.6. Оценивание параметров модели

Будем считать, что нам известна структура модели (оператора F), но не известны коэффициенты (параметры) этой модели. Какой бы точной ни была структура модели, практически всегда имеются параметры, которые необходимо найти или уточнить. Задача оценивания параметров модели ставится как задача оптимизации: необходимо найти такой вектор параметров A из области допустимых значений Ω , чтобы минимизировать некоторую функцию отклонения значений выхода модели (y^m) от выхода объекта (y) при одних и тех же значениях входных переменных:

$$D(y - y^m) \rightarrow \min_{A \in \Omega}.$$

Чаще всего эта задача решается методом наименьших квадратов (МНК) [40]. Суть МНК состоит в следующем: необходимо найти такие параметры из области допустимых значений, которые бы минимизировали сумму квадратов отклонений выходных переменных модели и объекта (по k измерениям):

$$\sum_{i=1}^k (y_i - y_i^m)^2 = \sum_{i=1}^k [y_i - F(x_i, A)]^2 \rightarrow \min_{A \in \Omega}.$$

Пример. Пусть известна структура модели:

$$y^m = a_0 + a_1 x.$$

Необходимо по k измерениям y и x найти параметры модели a_0 и a_1 .
Запишем критерий МНК:

$$D = \sum_{i=1}^k (y_i - y_i^M)^2 = \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 \rightarrow \min_{a_0, a_1}.$$

Для нахождения a_0 и a_1 , приводящих к минимизации заданный критерий D , возьмем частные производные от D по a_0 и a_1 и приравняем их нулю (из математики известно, что в точках экстремума функции ее производная равна нулю):

$$\begin{cases} \frac{\partial D}{\partial a_0} = 0; \\ \frac{\partial D}{\partial a_1} = 0. \end{cases}$$

В результате получается система двух линейных уравнений с двумя неизвестными, решение которой и дает искомые значения параметров a_0 и a_1 :

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i x_i) - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \sum_{i=1}^k x_i}{\sum_{i=1}^k x_i^2 - \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k x_i \right)^2}; \quad a_0 = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k y_i - a_1 \sum_{i=1}^k x_i \right).$$

Однако для применения МНК предъявляются определенные требования к данным:

- а) входные переменные модели должны быть линейно независимые, что выполняется;
- б) помехи, действующие на систему, должны иметь нормальное распределение.

Эти требования, к сожалению, выполняются далеко не всегда, что может привести к ненадежным оценкам параметров модели. Для решения этой проблемы применяют так называемые устойчивые (робастные, гребневые или ридж) оценки параметров [11, 35, 39].

Другой проблемой является ограниченность имеющейся выборки данных (набор экспериментальных точек). Для параметров модели используется эмпирическое правило: для корректной, надежной оценки одного параметра необходимо 5–10 экспериментальных точек. Однако бывают ситуации, когда получение достаточного числа точек крайне затруднено или очень дорого.

8.4. Математическое описание объектов

Полное математическое описание (модель) объекта обычно содержит уравнения статики и динамики.

☒ **Математическое описание статики объекта** — это совокупность математических выражений, характеризующих установившийся во времени режим работы объекта.

☑ **Математическое описание динамики объекта** — это совокупность математических выражений, описывающих изменения во времени выходных переменных объекта.

8.4.1. Аналитический подход к построению моделей

Математическое описание статики. Можно рекомендовать следующую последовательность описания статики объекта [29]:

1. *Выбор объекта исследования.* Здесь следует четко определить границы объекта и учесть связи его с окружающей средой.

2. *Изучение объекта.* На этом этапе необходимо ориентировочно установить, какие процессы следует учитывать при выводе уравнений статики.

3. *Составление структурной схемы объекта.* Эта задача является весьма ответственной и трудно формализуемой. Следует отчетливо понимать, что глубина расчленения объекта на звенья (элементы) не имеет предела. Необходимо найти компромисс между требуемой или желаемой точностью описания статических свойств объекта и возможностью количественной оценки явлений, протекающих в объекте.

4. *Составление математического описания отдельных звеньев (элементов).* Каждый элемент описывается с помощью математических уравнений, исходя из известных закономерностей, действующих в данном элементе. В результате получаем множество уравнений:

$$y_i = F(X_i), \quad i = 1, 2, \dots,$$

где y_i — выход i -го элемента; X_i — множество входов i -го элемента.

5. *Определение параметров уравнений звеньев.* Часть интересующей нас информации можно получить из постановки задачи, часть из литературы. Для определения некоторых констант потребуется проведение специальных исследований.

6. *Составление и анализ уравнений статики всего объекта.* В математическое описание статики входят уравнения отдельных звеньев и связей между ними, граничные и начальные условия, а также ограничения на диапазоны изменения входных и выходных переменных.

Структурные схемы объектов почти всегда можно преобразовать в комбинацию трех типовых схем соединения элементов:

а) последовательная схема (рис. 8.3, а). Общая функция последовательно соединенных звеньев образуется путем подстановки в качестве аргумента текущей функции f_i функции предыдущей f_{i-1} :

$$y_n = F(x_1) = f_n(f_{n-1}(\dots(f_1(x_1))\dots));$$

б) параллельная схема (рис. 8.3, б). Общая функция равна сумме функций отдельных звеньев:

$$y = \sum_{i=1}^n f_i(x_i);$$

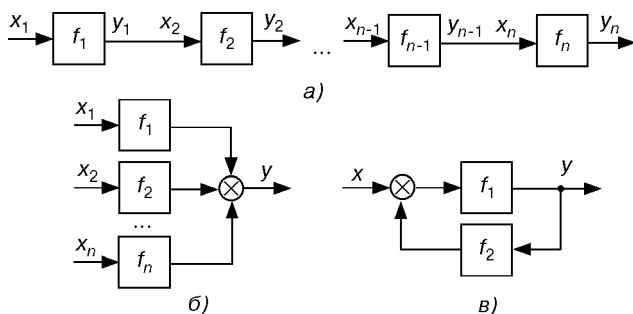


Рис. 8.3. Схема соединения звеньев: а — последовательная; б — параллельная; в — с обратной связью

в) схема с обратной связью (рис. 8.3, в). Общая функция будет следующая:

$$y = f_1(x \pm f_2(y)),$$

где минус соответствует отрицательной обратной связи, а плюс — положительной.

7. *Выбор метода решения уравнений статики.* Вычисление значений y по приведенным выше уравнениям, а тем более интегрирование дифференциальных уравнений в частных производных, обычно осуществляется на компьютере. В связи с этим необходимо из множества существующих методов и алгоритмов решения уравнений выбрать подходящий.

8. *Оценка точности математического описания объекта.* Можно использовать, например, такой критерий:

$$D = \frac{1}{mk} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k (y_{ij} - y_{ij}^M)^2,$$

где k — число значений выходных переменных (число экспериментальных точек); m — число выходных переменных.

Для этого проводится эксперимент на объекте, заключающийся в регистрации множества из n различных значений входных переменных и соответствующих им установившихся значений выходных.

Математическое описание динамики. Универсальным описанием динамических характеристик являются дифференциальные

уравнения. Переходные процессы в объектах с сосредоточенными параметрами описываются дифференциальными уравнениями в обыкновенных производных, в которых в качестве независимой переменной выступает время (t).

Идея аналитического вывода уравнений динамики основана на том, что скорость изменения выходной переменной какого-либо звена в первом приближении пропорциональна разности расходов входящих (образующих) и выходящих (расходуемых) потоков веществ или энергии. В частном случае, когда «приход» и «расход» веществ (энергии) равны, скорость изменения выходной переменной во времени равна нулю и уравнение динамики превращается в уравнение статики.

Пример. Пусть имеется емкость с водой. По одной трубе вода вливается в количестве $Q_{\text{вх}}$ л/ч, а из другой выливается $Q_{\text{вых}}$ л/ч. Пока $Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}}$, уровень воды H остается неизменным, но при нарушении этого баланса он начинает расти по следующему закону:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{S}(Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}),$$

где S — площадь сечения емкости.

В уравнения динамики обычно входят в явной или неявной форме статические характеристики. Поэтому методика аналитического составления уравнений динамики в основном аналогична последовательности вывода статических зависимостей.

1–3. См. математическое описание статики.

4. Составление уравнений статики отдельных звеньев.

5. Написание уравнений динамики отдельных звеньев.

6. Нахождение параметров уравнений динамики.

7. Составление уравнений динамики всего объекта. В математическое описание динамики входят: дифференциальные уравнения отдельных звеньев, алгебраические уравнения связей между звеньями, начальные условия, граничные условия, ограничения на диапазоны входных и выходных переменных. В общем виде математическое описание динамики имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dy_i(t)}{dt} &= f_i(y_1, y_2, \dots, y_m, x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = 1, \dots, m; \\ y_i(0) &= d_i, \quad x'_j < x_j < x''_j, \quad y'_i < y_i < y''_i. \end{aligned}$$

8. Выбор методов решения уравнений динамики. Полученные уравнения динамики обычно нелинейные, поэтому здесь без компьютера, конечно, не обойтись.

9. Оценка точности математического описания динамических свойств объекта. Точность описания динамики объекта можно оце-

нивать по такому критерию:

$$D = \frac{1}{mk} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \int_0^{t_j} (y_{ij} - y_{ij}^m)^2 dt,$$

где k — число возмущений системы; m — число выходных переменных, t_j — время j -го переходного процесса.

8.4.2. Экспериментальное определение статических и динамических характеристик объектов

Экспериментальное исследование в любой области науки включает в себя следующие основные этапы:

- 1) подготовка и планирование эксперимента;
- 2) проведение эксперимента;
- 3) обработка результатов.

Возможны две формы проведения эксперимента: активный и пассивный эксперимент.

Активный эксперимент предполагает, как правило, регулярные целенаправленные воздействия исследователя на объект.

При *пассивном эксперименте* исследователь находится в роли пассивного наблюдателя, никак не влияющего на объект. Единственное, чем он может управлять, так это временем наблюдения. Пассивный эксперимент имеет свои преимущества и недостатки. Преимуществом является то, что нет вмешательства в работу объекта, наблюдения ведутся, как говорится, *в режиме нормальной эксплуатации*. Проведение такого эксперимента не требует больших затрат, что позволяет собрать довольно большое число экспериментальных данных. Но «недостатки — продолжение наших достоинств»: пассивное наблюдение за объектом ограничивает область его исследования только тем диапазоном изменения входных переменных, в котором они «желают» меняться. Это, конечно, затрудняет построение качественной модели. Ведь объект может долго находиться в состоянии, когда входные переменные практически не изменяются или изменяются мало.

Определение статических характеристик. Ограничимся рассмотрением только активного эксперимента, поскольку пассивный эксперимент сводится в основном к обработке результатов наблюдений (определение статических моделей по данным пассивного эксперимента можно посмотреть в книге [28]). Активный эксперимент предусматривает изменение входных переменных (x_1, \dots, x_n) и регистрацию установившихся значений выходной переменной (y).

1. Подготовка и планирование эксперимента. Первоначально необходимо сформировать таблицу для записи значений входных и выходной переменных вида:

Номер экспериментальной точки	x_1	...	x_n	y
1				
2				
...				

При этом необходимо решить следующие вопросы:

а) сколько экспериментальных точек необходимо для построения модели?

б) по какой схеме (алгоритму) изменять значения входных переменных?

в) через какой промежуток времени после изменения входных переменных фиксировать в таблице значения выходных переменных?

С позиции математической статистики, чем больше имеется экспериментальных данных, тем надежнее математическая модель. Однако каждое возмущение объекта приводит к определенным потерям. Кроме того, проведение активного эксперимента требует затрат, иногда значительных.

Автор однажды строил математическую модель по результатам активного эксперимента, где одна экспериментальная точка стоила дороже пяти автомобилей «Волга».

В практике рекомендуется применять следующую эмпирическую оценку: для определения одного параметра (коэффициента) модели необходимо 5—10 экспериментальных точек (чем более «зашумлен» объект, тем больше необходимо точек). К сожалению, априори неизвестно, сколько параметров модели придется оценивать, поскольку это зависит от структуры модели. Поэтому априори приходится ориентироваться на некоторую «разумную» структуру.

Как только мы определились с числом экспериментальных точек, можно заняться так называемым *планированием эксперимента* [1, 2, 28]. Под планом эксперимента понимается совокупность значений, задаваемых переменной x в эксперименте. Главная задача планирования эксперимента заключается в том, чтобы извлечь максимум информации из ограниченного числа экспериментальных точек.

Пример. Возьмем две экспериментальные точки, в которых значение выходной переменной (y) измеряется с некоторой ошибкой (рис. 8.4). Если точки находятся близко друг к другу (рис. 8.4,а), то ошибка в оценке наклона линии зависимости y от x будет очень большой. Если взять точки, отдаленные друг от друга (рис. 8.4,б), то ошибка резко уменьшается.

Из примера видно, что информация об объекте зависит не только от числа экспериментальных точек, но и от их расположения. Поэтому так важно на этапе подготовки рационально выбрать значения входных переменных, которые будут занесены в таблицу.

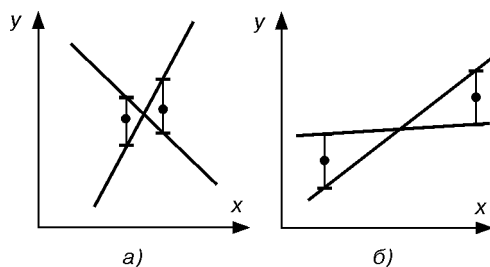


Рис. 8.4. Влияние расположения экспериментальных точек на ошибки в оценках параметров модели

Записывать значения выходной переменной можно только после того, как закончится переходный процесс в объекте. Поэтому на этапе подготовки к эксперименту необходимо оценить одну динамическую характеристику — *время установления* T_y (длительность переходного процесса) как время, за которое переходная функция исследуемого объекта достигнет 98%-го уровня своего установившегося значения [29]. На практике за T_y можно брать время от начала возмущения до того момента, когда значения выходной переменной практически не изменяются. Неконтролируемые входы во время эксперимента по возможности должны быть стабилизированы. Для полной уверенности в том, что переходный процесс завершился, фиксировать значение выходной переменной рекомендуется через $(1,5...2)T_y$.

2. Проведение эксперимента заключается в задании значений входных переменных в соответствии с таблицей, выдержке времени порядка $(1,5...2)T_y$ и записи значения выходной переменной.

3. Обработка результатов эксперимента. На основании заполненной таблицы строится математическая модель. Если входных переменных немного (от одной до трех), то первичная обработка, чаще всего, начинается с построения графиков. Графическое представление результатов эксперимента позволяет оценить линейность зависимостей, а для нелинейных зависимостей — их вид. Дальнейшая обработка заключается в подборе структуры модели.

При наличии помех (в виде неконтролируемых переменных и шумов) экспериментальные значения y имеют некоторое рассеяние от «истинных» значений. Здесь мы имеем дело с задачей *аппроксимации*, которая решается с помощью регрессионного анализа [3].

☒ **Аппроксимация** — это приближенное выражение каких-либо величин через другие, более простые величины.

В случае аппроксимации мы имеем дело с неточными значениями неизвестной функции. Поэтому, во-первых, выбор структуры модели производится в классе простых функций, а во-вторых, модельная

функция не должна стремиться к экспериментальным точкам — оценку каждого параметра модели необходимо производить по нескольким точкам методом наименьших квадратов. Чем выше уровень помех, тем выбирается более простая структура модели, поскольку «раскачка» модели в промежуточных точках в этом случае происходит быстрее. Здесь неопценимую услугу оказывают контрольные точки (точки, не принимавшие участие в оценивании параметров модели), которые выступают в роли «стражей», предупреждая об опасности «ухода» модели от «истинной» зависимости.

Определение динамических характеристик. Известно несколько способов оценки динамических свойств объекта. Самым универсальным, конечно, является описание динамики с помощью дифференциальных уравнений, но превратить экспериментальные наблюдения в дифференциальные уравнения не так уж просто. Мы же здесь ограничимся задачей определения переходной функции $h(t)$ и некоторых констант (например, времени запаздывания τ , постоянной времени T и коэффициента усиления k).

Рассмотрим проведение активного эксперимента [4].

1. Подготовка и планирование эксперимента. Обычно динамические характеристики исследуются по каждой паре (каналу) вход-выход ($x_i \rightarrow y_j$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$). Поэтому предварительно необходимо провести структурный анализ объекта исследования. Далее необходимо выбрать:

- вид возмущающих воздействий;
- количество опытов;
- величину амплитуды A испытательного сигнала.

Испытательные воздействия делятся на аperiodические и периодические (см. разд. 5.2.4). К первым относятся:

- ступенчатая функция: $x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ A & \text{при } t > 0; \end{cases}$
- прямоугольный импульс: $x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \text{ и } t > T, \\ A & \text{при } 0 < t < T, \end{cases}$

где T — длительность импульса.

К периодическим испытательным воздействиям относятся прямоугольная волна, синусоида и др.

Для снятия переходной функции $h(t)$ чаще применяются аperiodические воздействия, обычно при воздействии A и $-A$. Кроме того, желательна постановка еще двух опытов при амплитуде $1,5A$. При наличии помех количество опытов по снятию переходной функции увеличивается.

Для оценки длительности наблюдения определяется время установления T_y . Далее интервал, равный T_y , разбивается на n подин-

тервалов (значение n выбирается в зависимости от уровня помех — в среднем $n = 20$).

Для записи результатов подготавливают таблицы вида:

Номер точки	t	y
0	0	
1		
...		
n		

2. Проведение эксперимента. Возмущение наносится в момент времени, называемый нулевым: $t = 0$. Регистрация значений $y(t)$ прекращается через промежуток времени, равный T_y .

На этом этапе можно проверить предположения о линейности и стационарности объекта. Для этого по всем экспериментальным кривым $h(t)$ вычисляют значения коэффициента усиления $k = h(T_y)/A$ и сравнивают их между собой. Для проверки линейности сравнивают результаты от воздействия величинами A и $-A$ и проверяют справедливость принципа суперпозиции при воздействиях величинами A и $1,5A$. Для проверки справедливости гипотезы о стационарности динамических свойств объекта требуется постановка серии экспериментов через достаточно большие (по сравнению с T_y) промежутки времени. У стационарного объекта значения коэффициента усиления для всей серии экспериментов будут равны.

3. Обработка результатов по снятию переходных функций. Задачами этого этапа являются оценка «чистого» запаздывания и нахождение дифференциальных уравнений по переходным функциям $h(t)$.

Первоначально производится нормализация и усреднение экспериментальных кривых $h_i(t)$, снятых при различных испытательных сигналах A_i , $i = 1, 2, \dots, z$:

$$h_s(t) = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \frac{h_i(t)}{A_i}.$$

Пример. Суть сглаживания скользящим средним можно показать на примере сглаживания по трем точкам [7]. Пусть имеется k значений прогнозируемого показателя P_1, P_2, \dots, P_k . По трем соседним точкам P_i, P_{i+1}, P_{i+2} , где $i = 1, \dots, k - 2$, находится сглаженное значение средней точки:

$$P_{i+1}^s = \frac{P_i + P_{i+1} + P_{i+2}}{3}.$$

Также можно сглаживать по 5, 7 и более нечетным точкам, причем сглаживание можно повторить несколько раз.

Затем выделяется время «чистого» запаздывания τ как отрезок времени, во всех точках которого выполняется неравенство

$$0 \leq h_s(t) \leq d,$$

где d — погрешность измерения переменной $y(t)$.

Коэффициент усиления k находится из соотношения $k = h_s(T_y)$.

Во многих случаях экспериментальные переходные функции искажены помехами. Для их сглаживания применяют усреднение по множеству или по времени [3, 29].

Чаще всего сглаживание осуществляется по методу скользящего среднего [40, 32]. Пусть имеется ряд значений $y(t)$, $t = 1, \dots, n$. Для каждых r последовательных значений этого ряда $r < n$ можно подсчитать среднюю величину. Если r — нечетное число (а предпочтительнее брать именно нечетное), то, введя переменную $p = (r - 1)/2$, осредненные значения $y_s(t)$, $t = 1 - p, \dots, n - p$ можно вычислить по формуле

$$y_s(t) = \frac{1}{r} \sum_{i=t-p}^{t+p} y(i).$$

Если исследуемый объект линейный и динамические свойства его неизменны во времени (т. е. он стационарен), то переходную функцию можно аппроксимировать решением линейного дифференциального уравнения в обыкновенных производных с постоянными коэффициентами при нулевых начальных условиях. Порядок уравнения обычно не выше второго или третьего. Известно много способов определения дифференциальных уравнений по переходным функциям [29]. Они активно используются в технических системах, где часто требуется высокая точность динамических моделей. Для экономических объектов вполне достаточно упрощенных моделей.

Пример. На вход объекта подано воздействие в 4 единицы. Выход объекта наблюдался в течение 7 часов. После сглаживания видно, что переходный процесс приблизительно соответствует поведению инерционного звена с запаздыванием (рис. 8.5), описываемого уравнением

$$Ty'(t) + y(t) = kx(t - \tau).$$

Из результатов эксперимента можно приближенно оценить:

- запаздывание ($\tau = 1$);
- коэффициент усиления ($k = 18 : 4 = 4,5$);
- постоянную времени ($T = 0,6$).

Тогда окончательное дифференциальное уравнение исследуемого объекта можно записать так:

$$0,6y'(t) + y(t) = 4,5x(t - 1).$$

Несколько слов о пассивном эксперименте. В пассивном эксперименте возмущения на вход объекта поступают в виде некого потока

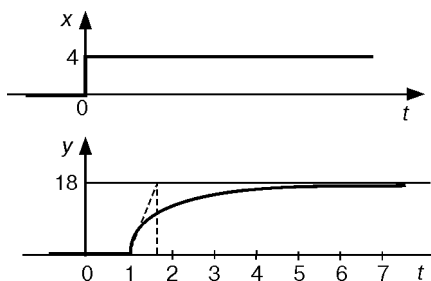


Рис. 8.5. Результат активного эксперимента

случайных сигналов. Обработка результатов производится с использованием аппарата корреляционного и спектрального анализа [29] — за простоту проведения эксперимента приходится платить большую цену в виде очень сложной обработки результатов.

Резюме

1. Модели в системном анализе занимают центральное место. В зависимости от стадии и целей исследования или проектирования применяется *аксиологическое* представление системы (отображение системы в терминах целей и целевых функционалов, связывающих цели со средствами их достижения) или *каузальное* (описание системы в терминах влияния одних переменных на другие).

2. Главной целью системного анализа можно считать оказание помощи в понимании и решении имеющейся проблемы для перевода проблемы в задачу принятия решения, т. е. ведет к постановке такой задачи. Поставить задачу означает, прежде всего, понять ее условия, что достигается путем выбора соответствующего представления (описания), т. е. модели.

3. Для принятия решения необходимо получить аксиологическое описание проблемы — *выражение, связывающее цель со средствами ее достижения*. Такие выражения получили в разных прикладных направлениях различные названия: *критерий функционирования*, *критерий* или *показатель эффективности*, *целевая* или *критериальная функция*, *функция цели* и т. п.

4. В зависимости от изученности проблемной ситуации, возможны различные подходы к формированию целевой функции:

а) если известен *закон*, позволяющий связать цель со средствами, то задача практически всегда решается;

б) если закон не известен, то стараются определить закономерности на основе статистических исследований;

в) если это не удастся сделать, то выбирают или разрабатывают теорию, в которой содержится ряд утверждений и правил, позво-

ляющих сформулировать *концепцию* и конструировать на ее основе процесс принятия решения;

г) если и теория не существует, то выдвигается *гипотеза* и на ее основе создаются *имитационные модели*, с помощью которых исследуются возможные варианты решения.

5. Существующие методы формирования моделей представляют собой некий спектр методов, дающих различную степень формализации — от вербального описания до аналитических зависимостей. Этот «спектр» методов разделяют на два больших класса: *методы формализованного представления систем* и *методы, направленные на активизацию использования интуиции и опыта специалистов (эвристические)*.

6. К методам формализованного представления систем относятся: *аналитические* и *статистические* методы, методы *дискретной математики* и *графические* методы.

7. К эвристическим методам можно отнести: *методы индивидуальной экспертизы*, *методы групповой экспертизы*, *методы выработки коллективных решений*, *методы структуризации*, *морфологические методы*, *методы организации сложных экспертиз*.

8. К наиболее распространенным методам решения задачи построения математических моделей относятся аналитические и статистические методы. При этом возникает ряд проблем, основные из которых: *выбор структуры модели*, *оценивание ее коэффициентов* и *выбор критерия оценки ее качества*.

7. Полное математическое описание (модель) объекта обычно содержит уравнения статики и динамики.

8. Выделяют следующие методы построения математических моделей:

аналитический — модель строится на основании известных законов, действующих в объекте;

статистический (экспериментальный) — модель объекта строится на основании наблюдений за входными и выходными переменными;

экспериментально-аналитический — исходная структура модели строится на основании анализа процессов в системе, а коэффициенты определяются по экспериментальным данным.

9. Экспериментальное исследование объектов проводится с помощью активного или пассивного экспериментов.

Литература

1. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. — М.: Металлургия, 1969. — 155 с.

2. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 279 с.
3. *Айвазян С.А., Мхитарян В.С.* Прикладная статистика и основы эконометрики: Учебник для вузов. — М.: ЮНИТИ, 1998. — 1022 с.
4. *Блакирев В.С., Дудников Е.Г., Циалин А.М.* Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. — М.: Энергия, 1967. — 232 с.
5. *Бородюк В.П., Псарев Б.Г.* Проверка адекватности регрессионной модели в пассивном эксперименте // Труды Моск. энерг. ин-та. — М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 1980. № 445. С. 64–69.
6. *Вендров А.М.* CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. — М.: Финансы и статистика, 1998. — 176 с.
7. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории управления и системного анализа. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. — 510 с.
9. *Волкова В.Н., Денисов А.А., Темников Ф.Е.* Методы формализованного представления систем: Учебное пособие. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1993. — 107 с.
10. *Волкова В.Н., Темников Ф.Е.* Методы формализованного представления (отображения) систем: текст лекций. — М.: ИПКИР, 1974. — 114 с.
11. *Демиденко Е.З.* Линейная и нелинейная регрессия. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 302 с.
12. *Дрейнер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. Кн. 2. — М.: Финансы и статистика, 1987. — 351 с.
13. *Ивахненко А.Г.* Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. — Киев: Наукова думка, 1982. — 296 с.
14. *Ивахненко А.Г.* Метод группового учета аргументов — конкурент метода стохастической аппроксимации // Автоматика. 1968. № 3. С. 57–72.
15. *Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.* Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. — М.: Радио и связь, 1987. — 120 с.
16. *Качала В.В.* Проблемы выбора структуры регрессионных моделей // Хранение и обработка экспериментальных данных. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1992. — С. 28–46.
17. *Качала В.В.* Программа шаговой регрессии с автоматическим выбором порога исключения незначимых переменных // Методы исследования эффективности функционирования и области применения ППП с СМО АСУ: Тез. докл. науч.-техн. конф., — Калинин, 1983. — С. 161–162.
18. *Качала В.В.* Роль контрольных точек в задачах идентификации // Многомерный статистический анализ и вероятностное моделирование реальных процессов: Ученые записки по статистике. Т. 54. — М.: Наука, 1990. — С. 173–176.
19. *Качала В.В.* Сравнительный анализ алгоритмов структурной идентификации // Труды международной конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '2000 (Москва, 26–28 сентября 2000 г. Ин-т проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН). — М.: ИПУ РАН, 2000. — С. 133–143.
20. *Качала В.В., Чагоровская О.А.* Алгоритм эволюционной идентификации сложных объектов // Распределенные информационно-управляющие системы. — Саратов: Изд. Саратовского ун-та, 1988. — С. 159.
21. *Калянов Г.Н.* CASE-технологии. Консалтинг в автоматизации бизнес-процессов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2002. — 320 с.
22. *Клиланд Д., Кинг В.* Системный анализ и целевое управление. — М.: Сов. радио, 1979. — 279 с.
23. *Коротков Э.М.* Исследование систем управления. — М.: ООО Издательско-консалтинговое предприятие «ДеКА», 2003. — 336 с.

24. Коуд П., Норт Д., Мейфилд М. Объектные модели. Стратегии, шаблоны и приложения. — М.: ЛОРИ, 1999. — 434 с.
25. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. — М.: Мир, 1991. — 568 с.
26. Малин А.С., Мухин В.И. Исследование систем управления: Учебник для вузов. — М.: Издательский дом ГУ ВШЭ, 2004. — 400 с.
27. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. Вып. 1. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 312 с.
28. Основы автоматизации химических производств / Под ред. П.А. Обновленского и А.Л. Гуревича. — Л.: Химия, 1975. — 528 с.
29. Построение математических моделей химико-технологических объектов / Е.Г. Дудников, В.С. Балакирев, В.Н. Кривсунов, А.М. Цирлин. — Л.: Химия, 1970. — 312 с.
30. Райсберг Б.А., Дозовский Л.Ш., Стародубцева Е.Б. Современный экономический словарь. — М.: ИНФРА-М, 1998. — 479 с.
31. Растринин Л.А., Маджаров Н.Е. Введение в идентификацию объектов управления. — М.: Энергия, 1977. — 216 с.
32. Редкозубов С.А. Статистические методы прогнозирования в АСУ. — М.: Энергоиздат, 1981. — 152 с.
33. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.
34. Служба тематических толковых словарей — <http://www.glossary.ru/>.
35. Смоляк С.А., Титаренко Б.П. Устойчивые методы оценивания. — М.: Статистика, 1980. — 268 с.
36. Современный словарь иностранных слов. — М.: Рус. яз., 1993. — 740 с.
37. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: Учеб. пособие. — СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2000. — 326 с.
38. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973. — 534 с.
39. Хьюбер П. Робастность в статистике. — М.: Мир, 1984. — 304 с.
40. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. — М.: Статистика, 1977. — 200 с.
41. Åström K.J., Eykhoff P. System Identification — a survey // Automatica. 1971. V. 7, № 2. P. 123–162.
42. Clücker V.I. In the relationship between the samplesize and the number of variables in a linear regression model // Commun. Stratist. 1979. Vol. A7, № 6. P. 509–516.
43. Sargent R.G. Validation of simulation model // Winter Simul. Conf. 1979. Vol. 1. P. 496–503.
44. Snee R.D. Validation of regression models: Method sand examples // Technometrics. 1977. Vol. 19, № 4. P. 415–428.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем отличие аксеологического и каузального представлений систем?
2. В каком случае отсутствует проблема принятия решения?
3. Что понимается под постановкой задачи?
4. В каких случаях задача принятия решения становится проблемой?
5. Какое выражение нужно получить при постановке задачи принятия решения?
6. Объясните суть целевой функции (функции цели).
7. Какие действия предпринимаются в случае, если:

- а) отсутствует закон, связывающий цель со средствами ее достижения;
- б) нет возможности установить закономерность, связывающую цель со средствами ее достижения?
- 8. Перечислите основные трудности формализации целевой функции.
- 9. Перечислите формальные методы построения моделей.
- 10. Раскройте суть, особенности и проблемы построения моделей:
 - а) аналитическими методами;
 - б) статистическими методами.
- 11. Раскройте суть проблемы:
 - а) выбора структуры модели;
 - б) оценивания параметров модели;
 - в) выбора критерия оценки качества модели.
- 12. Перечислите основные шаги построения с помощью аналитического подхода:
 - а) математической модели статики объекта;
 - б) математической модели динамики объекта.
- 13. Перечислите шаги экспериментального исследования объекта.
- 14. Укажите отличия активного и пассивного экспериментов.
- 15. Перечислите основные задачи, решаемые при подготовке эксперимента по построению математической модели: а) статики; б) динамики.
- 16. Что понимается под временем установления?

Г Л А В А 9

Системный подход к прогнозированию

Слово «прогноз» происходит от греческого слова «prognosis» (предвидение, предсказание о развитии чего-либо, основанное на определенных данных). Прогнозирование широко используется во многих областях человеческой деятельности, особенно актуально прогнозирование в задачах управления.

☒ *Процесс разработки прогнозов называется **прогнозированием**.*

Под методами прогнозирования подразумевают совокупность приемов мышления, способов, позволяющих на основе анализа информации о прогнозном объекте вынести относительно достоверное суждение о его будущем развитии. Тип применяемого метода зависит от типа объекта. Существует большое количество классификаций видов прогнозов по различным классификационным признакам (подробнее см. [2, 4, 5, 10, 11]).

9.1. Постановка задачи прогнозирования

Прогнозирование означает предсказание состояния какого-либо объекта, процесса или явления в будущем. Фактически любое моделирование дает прогноз, т. е. отвечает на вопрос: «Что будет, если...?», но здесь мы ограничимся прогнозированием в более узком смысле. Различают такие виды прогнозов, как прогноз погоды, предсказание хода болезни, научно-технический прогноз, прогноз экономический и т. д. В данной книге мы будем в основном говорить об экономическом прогнозе, который тесно связано с планированием и управлением.

Задачу прогнозирования в самом общем виде можно поставить следующим образом. Имеется некоторый прогнозируемый показатель P . Необходимо определить значение P_s этого показателя в некоторый заданный момент времени в будущем s .

По времени упреждения прогнозирования разделяется на текущее, краткосрочное, среднесрочное, долгосрочное и сверхдолгосрочное [1]. В зависимости от характера и цели прогнозирования диапа-

зон каждого из видов прогноза может простирается от долей секунды (например, в физике) до миллиардов лет (в космологии). В экономических и общественных науках рассматривают прогнозы: краткосрочные (1–2 года), среднесрочные (5–10 лет), долгосрочные (15–20 лет) и сверхдолгосрочные (50–100 лет). Существуют и другие классификации по срокам прогноза (например, см. [11]).

Наиболее распространен такой подход к прогнозированию. Анализируется временной ряд значений прогнозируемого показателя, устанавливается закономерность изменения показателя во времени, а затем эта закономерность экстраполируется на будущие моменты времени. Однако такой подход не всегда дает удовлетворительный прогноз, поскольку основан на учете только части причин, по которым происходит изменение прогнозируемого показателя. Для повышения точности прогноза необходимо провести системный анализ: определить факторы, действующие в объекте исследования, и оценить их влияние на прогнозируемый показатель. На основании результатов анализа можно выбирать методы прогнозирования, в наибольшей степени пригодные для решения конкретной задачи.

Основу прогнозирования составляют либо причинно-следственные связи между прогнозируемым показателем и факторами, на него влияющими, либо инерционные свойства объекта (в этом случае «причиной» является время).

Основой любого прогнозирования является гипотеза об инерционности объекта. Причем инерционность можно рассматривать не только временную (в последующие моменты времени прогнозируемый показатель будет изменяться в том же направлении, что и сейчас), но и более широко — инерционность функциональную. В этом случае функциональная зависимость прогнозируемого показателя от факторов, на него влияющих (в частном случае это может быть и время), известная на некотором интервале изменения этих факторов, продолжается и за пределами интервала.

Примеры. 1. Последние несколько дней температура воздуха падала ежедневно на 1 °С. Можно предположить, что эта тенденция сохранится в ближайшие дни.

2. Цена на сахар последние месяцы росла в среднем на 3 %. Можно прогнозировать сохранение этой тенденции и в последующие месяцы.

3. Пусть зависимость спроса на некоторый товар S_p от его цены C при изменении цены от 10 до 14 р. описывается моделью вида:

$$S_p = 1,3 + \frac{4,7}{C + 8,2}.$$

Можно предполагать, что при ценах, меньших 10 р. или больших 14 р., эта зависимость сохранится.

На инерционности построен метод научного исследования — экстраполяция (от лат. *extra* — сверх и *polio* — приглаживаю, выправляю).

✓ **Экстраполяция** — это распространение результатов, полученных из наблюдений над одной частью явления, на другую его часть.

✓ **Экстраполяция закономерностей** — это перенос закономерностей, выявленных на одном материале и одном классе задач, на другой материал и другой класс задач.

С математической точки зрения:

✓ **Экстраполяция** — это приближенное определение значений функции $F(x)$ в точках x , лежащих вне отрезка $[x_0, x_n]$, по ее значениям в точках $x_0 < x_1 < \dots < x_n$.

9.2. Причины изменения прогнозируемого показателя

Если ставится задача прогнозирования значения некоторого показателя, то закономерно возникает вопрос о причинах его изменения. Такие причины можно разбить на две группы: внешние причины (по отношению к исследуемой системе) и внутренние [9].

К внешним причинам относятся изменения: возмущающих переменных — вектор X ; управляющих переменных — вектор U ; неконтролируемых переменных (шумов или помех) — вектор ϵ .

К внутренним причинам относятся такие свойства объекта, как динамичность (инерционность), нестационарность, целенаправленность (активность).

Рассмотрим влияние на прогнозируемый показатель каждой из причин в отдельности.

9.2.1. Влияние возмущающих и управляющих переменных

Если пренебречь остальными причинами, то влияние возмущающих и управляющих переменных (для простоты обозначим их векторы пока одной буквой X) можно представить в виде следующей математической модели:

$$P = F(X). \quad (9.1)$$

Зная функцию F и значение входной переменной X_s в заданный момент времени в будущем s , можно вычислить значение прогнозируемого показателя P_s :

$$P_s = F(X_s).$$

9.2.2. Влияние неконтролируемых переменных

Если мы знаем, что ни возмущающие, ни управляющие переменные не изменятся к моменту времени s , а единственной причиной изменения P явятся шумы ϵ , то надо рассматривать такую модель:

$$P = F(\epsilon). \quad (9.2)$$

К сожалению, в этом случае мы чаще всего не знаем причин и значений неконтролируемой переменной ϵ , поэтому построение соответствующей математической модели типа (9.2) является проблематичным. Единственное, что можно сказать, так это то, что при нулевом среднем значении ϵ значение прогнозируемой переменной в среднем не изменится.

9.2.3. Влияние динамичности

Динамические системы, как правило, являются инерционными, т. е. даже при отсутствии наблюдаемых изменений входных переменных выходная переменная продолжает изменяться. Единственный «виновник» этого — время, т. е. если бы удалось остановить время, то выходная величина перестала бы изменяться.

Таким образом, если мы работаем с данными, относящимися к некоторому периоду времени, в пределах которого входные переменные можно считать неизменными, поведение прогнозируемого показателя можно описывать моделью

$$P(t) = F(t). \quad (9.3)$$

Это характерно для систем, содержащих инерционные, интегрирующие, реальные дифференцирующие и колебательные звенья.

9.2.4. Влияние нестационарности

В нестационарной системе происходит изменение ее структуры и/или параметров. В модели (9.1) прогнозируемый показатель зависит не только от входных переменных, но и от вектора параметров (коэффициентов) A . Тогда более точное представление модели (9.1) будет следующим:

$$P = F(X, A). \quad (9.4)$$

Если система стационарная, то при изменении входных воздействий модель (9.4) можно записать

$$P(t) = F(X(t), A).$$

Для нестационарной системы при неизменных внешних воздействиях на объект модель будет иметь вид:

$$P(t) = F(X, A(t)) \quad (9.5)$$

или

$$P(t) = F(A(t)). \quad (9.5')$$

В этом случае задача прогнозирования показателя P столкнется с проблемой прогнозирования значения параметров A . Если она будет решена успешно (что чаще всего невозможно) и будет построена модель (9.5'), то можно надеяться и на решение основной задачи.

Изменение параметров может быть монотонным, случайным или управляемым. В первом случае параметры являются функциями времени $A(t)$, что соответствует рассмотренной выше задаче построения динамической модели типа (9.3). Во втором — параметры изменяются случайным образом. Это можно рассматривать как влияние неконтролируемых переменных — модель типа (9.2).

При управляемом изменении параметров объект не является нестационарным и может описываться моделью типа (9.4).

9.2.5. Влияние целенаправленности (активности)

К целенаправленным объектам относятся объекты, элементами которых являются люди. В таких объектах каждый отдельный человек или группа людей способны поставить свои цели и действовать в соответствии с ними. В этом случае следует говорить о том, что структура зависимостей типа (9.1), (9.3) или (9.4) уже сама будет изменяться во времени, даже при неизменных X , A или ε :

$$P(t) = F_t(\cdot).$$

Формальные методы прогнозирования здесь малопригодны — это поле деятельности в основном для психологов.

9.3. Выбор метода прогнозирования

Всего известно около двухсот методов прогнозирования [3], которые базируются на трех основных подходах (классах методов) [1]:

1) *экстраполяционный*, когда единственной причиной изменения прогнозируемого показателя считается время (используется инерционность процессов во времени);

2) *модельный*, при котором ищется функциональная зависимость прогнозируемого показателя от факторов, на него влияющих;

3) *экспертный* — прогноз на основании мнений экспертов.

9.3.1. Экстраполяционный подход к прогнозированию

Этот подход заключается в установлении закономерности изменения прогнозируемого показателя за предыдущие моменты времени с последующей экстраполяцией этой закономерности на последующие моменты времени. При экстраполяционном подходе единственной причиной изменения прогнозируемого показателя считается время. Для определения закономерности изменения прогнозируемого показателя P во времени (другими словами, модели $P = F(t)$) необходимо знать значения прогнозируемого показателя в предыдущие моменты времени. Прогнозирование в этом случае заключается в установлении закономерности изменения прогнозируемого показателя за предыдущие моменты времени (построение модели типа (9.3)) с последующей экстраполяцией этой закономерности на следующие моменты времени [6]. Таким образом, этот подход пригоден только для прогнозирования динамических процессов. Из-за простоты и наглядности это самый распространенный подход при количественном прогнозировании в экономике, которая по своей сути представляет собой совокупность динамических процессов.

Тенденции развития экономических показателей. Статистическое описание движения экономических явлений осуществляется с помощью *динамических (временных) рядов*. Поведение динамического ряда, характеризующего развитие экономического явления, традиционно рассматривают как сумму четырех компонент, которые непосредственно не могут быть измерены (ненаблюдаемые компоненты): вековой уровень (или тренд), циклическая составляющая, сезонная составляющая и случайные колебания [6].

При анализе динамических рядов наибольший интерес вызывает *тенденция развития* изучаемой системы. Понятие *тенденции развития* не имеет достаточно четкого определения — под ней понимают некоторое общее направление развития, долговременную эволюцию. Обычно тенденцию развития стремятся представить в виде более или менее гладкой траектории, которую можно формализовать в виде некоторой функции от времени. Такую функцию называют *трендом*: он описывает фактическую, усредненную для периода наблюдения тенденцию изучаемого процесса во времени.

Наиболее распространенным и простым путем выявления тренда является *сглаживание*, в частности, *скользящим средним* (см. разд. 8.4.2). К недостатку скользящих средних можно отнести то, что зачастую они сглаживают (читай, уничтожают) важные мелкие волны и изгибы в тренде!

Изобразив в осях координат «прогнозируемый показатель – время» временной ряд значений P , после сглаживания можно графиче-

ски решить задачу прогнозирования путем продолжения выявленной тенденции развития для последующих моментов времени.

Кривые роста. Графическое решение задачи прогнозирования является приближенным и носит субъективный характер. Более точный прогноз можно получить с помощью аналитического выравнивания динамических рядов — нахождения модели $P = F(t)$. При построении этой модели возникают те же проблемы, что и при построении любой другой: выбор структуры модели, оценивание ее параметров (коэффициентов) и оценка точности модели. Рассмотрим первую проблему. При выборе структуры модели приходится определять, какие входные переменные войдут в модель и в каком виде. Здесь мы имеем только одну входную переменную — t , поэтому задача сужается до поиска функции одной переменной.

Функции, описывающие закономерности развития явления во времени, полученные путем аналитического выравнивания динамических рядов, получили название *кривые роста* [6]. Вопрос о выборе типа кривой является основным; ошибка этого этапа более значима по своим последствиям, чем ошибка в оценивании параметров.

Многолетние исследования временных рядов в экономике, социологии, политике, демографии и других экономико-общественных науках позволили выявить ряд наиболее распространенных кривых роста, описывающих соответствующие явления в этих науках.

Наиболее часто применяют такие простые функции, как 1) многочлены (полиномы), 2) различного рода экспоненты и 3) логистические кривые.

Многочлены. Для выравнивания временных рядов используются многочлены:

первой степени: $p_t = a_0 + a_1t$,

второй степени: $p_t = a_0 + a_1t + a_2t^2$,

n -й степени: $p_t = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n$.

При этом коэффициент a_1 можно трактовать как скорость роста, a_2 — ускорение роста, a_3 — изменение ускорения роста. Многочлены первой степени предполагают постоянство приращения ординат для процессов, равномерно развивающихся во времени. Парабола второй степени описывает движение с равномерным изменением прироста, т. е. равноускоренных процессов.

Обоснованием применения полиномов при выборе структуры модели может быть теорема Вейерштрасса, из которой следует, что *любую непрерывную функцию на заданном отрезке можно сколь угодно точно описать многочленом*.

Экспоненты. Самая простая экспоненциальная (показательная) кривая имеет вид $P_t = ab^t$. Если это уравнение прологарифмировать, то в полулогарифмических координатах получим уравнение прямой

$$\log P = \log a + t \log b.$$

Более сложную зависимость можно описать логарифмической параболой

$$P_t = ab^t c^{t^2}.$$

Рассмотренные выше кривые, соответствующие многочленам, не имеют асимптот, их рост ничем не ограничен. В отличие от них экспоненциальная кривая и логарифмическая парабола имеют асимптоты, но только в области $P_t = 0$. Однако есть много процессов, имеющих асимптоту, отличающуюся от нуля. Наиболее простым представителем семейства кривых, имеющих такую асимптоту, является кривая, получившая в статистике название *модифицированной экспоненты*:

$$P_t = k + ab^t.$$

Кривая Гомперца и логистическая кривая. В страховых и некоторых демографических расчетах нашла себе применение *S*-образная кривая, получившая название *кривой Гомперца*:

$$P = ka^{b^t}.$$

Также для описания *S*-образных кривых применяется *логистическая кривая*:

$$\frac{1}{P_t} = k + ab^t.$$

Экспоненциальные кривые роста хорошо описывают процессы, имеющие так называемый лавинообразный характер, а именно, когда прирост зависит в основном от уже достигнутого уровня.

Если же на процесс все время воздействует ограничивающий фактор, то хорошее описание этого процесса можно получить с помощью модифицированной экспоненты. Если же ограничивающий фактор начинает влиять только после некоторого момента времени (точка перегиба), то наилучшее приближение дают *S*-образные кривые, которые описывают два встречных лавинообразных процесса: один с ускорением развития, другой — с замедлением.

9.3.2. Модельный подход к прогнозированию

Рассматривая задачу прогнозирования, мы предполагали, что прогнозируемая величина является функцией времени. Однако

часто это слишком упрощенный подход. Конечно, например, радиоактивный распад можно считать зависимым только от времени, но большинство прогнозируемых показателей все же зависит от других факторов. Например, прогнозирование числа больных в данном населенном пункте зависит не от времени как такового, а от числа жителей, экологической обстановки и т. п. И если в следующем году число жителей резко сократится или возрастет, то во столько же раз изменится потенциальное число больных.

При модельном подходе ищется функциональная зависимость прогнозируемого показателя от факторов, на него влияющих (строится модель типа (9.4)). Модельный подход потенциально дает самый точный прогноз, но является наиболее сложным и наукоемким.

Вернемся к причинам изменения прогнозируемого показателя и оценим пригодность тех или иных подходов к прогнозированию.

1. Если изменение прогнозируемого показателя связано только с динамическими процессами (а точнее, процесс изменения $P(t)$ является частью переходного процесса), то наиболее эффективным будет применение *экстраполяционного подхода*. При этом причинами изменения P могут быть:

- переходные процессы, происходящие в объекте (модель типа (9.3)); динамические процессы в объекте, приводящие к изменению его параметров $A(t)$ (можно рассматривать и динамические процессы в психике людей, входящих в качестве элементов исследуемого объекта);
- динамические процессы, протекающие вне объекта, следствием чего могут быть изменения возмущающих и неконтролируемых переменных — $X(t)$ и $\varepsilon(t)$.

В общем виде это можно описать такой моделью:

$$P(t) = F(X(t), A(t), \varepsilon(t), t). \quad (9.6)$$

При этом, если мы не можем построить модель типа (9.6), прогнозная модель будет строиться на основании временных рядов и описывать зависимость прогнозируемого показателя только как функцию времени (модель типа (9.3)).

2. Другим подходом к прогнозированию динамических процессов можно назвать *модельный авторегрессионный подход*, когда строится модель, связывающая значения прогнозируемого показателя в некоторый момент времени s со значениями этого же показателя в предыдущие моменты времени:

$$P(s) = F[P(s-1), P(s-2), \dots].$$

Авторегрессионная модель фактически является попыткой описать динамический процесс алгебраическим уравнением вместо дифференциального.

3. Если изменение прогнозируемого показателя нельзя объяснить только как функцию времени (т. е. объяснить только динамическими процессами), то применяется *модельный подход*, при котором в модели *учитываются возмущающие и управляющие переменные*. Такой подход предполагает, что прогнозируемая величина является выходной переменной исследуемого объекта (процесса или явления) $P = y$ и, в первую очередь, зависит от множества различных невременных факторов $X = \{x_1, \dots, x_n\}$.

Строятся как простейшие модели типа (9.1), так и более сложные, учитывающие запаздывающие переменные и время:

$$P(t) = F[X(t), X(t-1), X(t-2), \dots, t],$$

а также авторегрессионные составляющие:

$$P(t) = F[P(t-1), P(t-2), \dots, X(t), X(t-1), X(t-2), \dots, t].$$

Построение таких моделей связано с серьезными трудностями. Хотя следует сказать, что такая полная модель никогда и не используется для прогнозирования, но всегда можно допускать присутствие ее членов в прогностической модели. Здесь мы сталкиваемся с серьезной задачей выбора структуры модели, а именно, отбора значимых членов модели. Во-первых, довольно сложно выбрать структуру модели [8]; второй проблемой является ограниченное количество экспериментальных данных, что не позволяет получить статистически значимые оценки параметров модели.

9.3.3. Оценивание точности прогнозных моделей

В предыдущем разделе рассматривался вопрос выбора структуры прогнозных моделей. Что касается оценивания параметров этих моделей, то здесь нет никаких отличий от традиционной задачи построения моделей и обычно применяется метод наименьших квадратов.

Особую проблему представляет вопрос оценки качества прогнозной модели. Выше говорилось, что критерий качества модели должен определяться той целью, для которой строится модель. Прогнозная модель строится с целью предсказания значения выходной переменной в будущие моменты времени, т. е. нам надо проверить, правильно ли модель предсказывает. Но если мы предсказываем что-либо на год или больше вперед, то только через этот срок сможем узнать, хороша ли наша модель. Это, безусловно, нас не устраивает. Остается

единственный выход — «спрятать» одно или несколько (k) последних по времени известных значений прогнозируемой величины (p_i , $i = 1, \dots, k$), построить прогнозную модель по оставшимся значениям и попытаться спрогнозировать известные значения (p_i^M , $i = 1, \dots, k$). Из множества прогнозных моделей лучшей будем считать ту, которая имеет минимальное значение следующего критерия:

$$D = \sum_{i=1}^k (p_i^M - p_i)^2.$$

Вообще же точность прогноза определяют несколько факторов.

1. *Объем статистики* (длина предыстории) — чем данных больше, тем надежнее прогноз. Это верно, к сожалению, только с позиции математической статистики — «чем больше, тем лучше». При прогнозировании социально-экономических и политических процессов часто имеют дело с резкими изломами тенденций изменения прогнозируемых показателей. В этом случае в выборке могут присутствовать разные тенденции. Обработка таких данных приведет к получению некой усредненной тенденции («средней температуре по больнице»), по которой можно получить «среднее» значение прогнозируемого показателя.

2. *Неизменность тенденции изменения прогнозируемого показателя* — важно, чтобы в выборке данных для прогнозирования присутствовали только данные, относящиеся к текущей тенденции. Иногда таких данных бывает крайне мало, что не позволяет сделать надежный прогноз.

3. *Глубина (интервал) прогноза* — чем он больше, тем сильнее возрастает ошибка прогноза. Есть эмпирическое правило — длина предыстории должна как минимум вдвое превышать интервал прогноза.

Пример. Пусть нам необходимо спрогнозировать цену на хлеб в следующем месяце. Можно взять ряд данных о цене на хлеб за прошедшие 100 лет. Умножив на 12 месяцев, получаем 1200 «точек» для построения прогнозных моделей. Эта огромная выборка даст нам усредненную тенденцию за сто лет, которая с крайне малой вероятностью будет соответствовать тенденции изменения цены на хлеб «завтра». Если же мы возьмем выборку, отражающую тенденцию последних месяцев, и экстраполируем полученную тенденцию на сто лет вперед, то достоверность такого прогноза тоже будет чрезвычайно низкой, поскольку очень мала вероятность сохранения современной тенденции изменения цены на хлеб.

9.3.4. Экспертный подход

Экспертный подход основывается на экспертных оценках специалистов в своей области.

☑ **Экспертные оценки** — это неформальный прогноз, основанный на опыте и интуиции специалистов-экспертов.

Такой прогноз обычно применяют в тех случаях, когда либо прогнозируемый показатель и/или факторы, на него влияющие, измеряются в качественных шкалах, либо по ним отсутствует репрезентативная (достаточная) статистика. Экспертные оценки вытекают из анализа и обобщения процессов, происходивших в прошлом и происходящих в настоящем.

Сущность экспертных методов прогнозирования заключается в построении рациональной процедуры интуитивно-логического мышления человека в сочетании с количественными методами оценки и обработки полученных результатов.

Метод экспертных оценок базируется на предположении, что на основе мнений экспертов возможно построить адекватную модель будущего развития системы. Исходной информацией при этом служат мнения специалистов, занимающихся исследованиями и разработками в прогнозируемой области. Экспертные оценки разделяют на индивидуальные и коллективные в зависимости от того, разрабатывается ли прогноз на основе суждений одного эксперта или группы их [12].

Индивидуальные экспертные оценки бывают двух типов: оценки типа «интервью» и аналитические. *Оценка типа «интервью»* — это беседа прогнозиста с экспертом, в ходе которой прогнозист, в соответствии с заранее разработанной программой, ставит перед экспертом вопросы относительно перспектив развития прогнозируемого объекта. Процесс *аналитической экспертной оценки* заключается в самостоятельной работе эксперта, направленной на анализ тенденций и оценку будущего состояния и путей развития прогнозируемого объекта.

Применение *коллективных экспертных оценок* позволяет повысить точность прогноза. Методы коллективных экспертных оценок разделяются на метод комиссий, метод отнесенной оценки и дельфийский метод.

Метод комиссий — это проведение группой экспертов дискуссии с целью выработки общей позиции по вопросам будущего развития прогнозируемого объекта. Недостатком этого метода является взаимное влияние экспертов, экспертам часто бывает трудно отказаться от публично высказанного мнения.

Частично эту проблему решает метод *отнесенной оценки* (метод «мозгового штурма»), при котором эксперты сначала высказывают любые оценки без права их критики другими и только потом анализируют эти оценки и по ним делают выводы. При этом в качестве экспертов могут привлекаться не только специалисты по данной проблеме, но и специалисты в других областях.

Дальнейшим развитием методов коллективной экспертной оценки является *дельфийский метод* (по названию древнегреческого города Дельфы). Этот метод предполагает отказ от прямых коллективных суждений. Дебаты заменяются индивидуальными опросами в форме заполнения таблиц экспертной оценки. Ответы экспертов обобщают и вместе с новой дополнительной информацией и обобщенными аргументами передают в распоряжение экспертов, после чего они уточняют свои первоначальные ответы. Такая процедура повторяется несколько раз до достижения приемлемой сходимости высказанных мнений.

Дельфийский метод дает надежные прогнозы на период 1—3 года и более отдаленный период. В зависимости от цели прогноза привлекают от 10 до 100 экспертов.

Достоинством экспертных методов является их относительная простота и применимость для прогнозирования практически любых ситуаций, в том числе и в условиях неполной информации, а *недостатком* — субъективизм экспертов и невысокая точность прогноза опять же в условиях неполной информации («из ничего нельзя получить ничего»).

Резюме

1. Процесс разработки прогнозов называется *прогнозированием*. Прогнозирование означает предсказание состояния какого-либо объекта, процесса или явления в будущем. Фактически любое моделирование дает прогноз, т. е. отвечает на вопрос: «Что будет, если...?».

2. По времени упреждения прогнозирование разделяется на текущее, краткосрочное, среднесрочное, долгосрочное и сверхдолгосрочное. В зависимости от характера и цели прогнозирования диапазон каждого из видов прогноза может простираться от долей секунды (например, в физике) до миллиардов лет (в космологии).

3. Основой любого прогнозирования является гипотеза об инерционности объекта. Причем инерционность можно рассматривать не только временную, но и более широко — инерционность функциональную, когда функциональная зависимость прогнозируемого показателя от факторов, на него влияющих, известная на некотором интервале изменения этих факторов, продолжается и за пределами интервала. На инерционности построен метод научного исследования — *экстраполяция* — распространение результатов, полученных из наблюдений над одной частью явления, на другую его часть.

4. Причины изменения прогнозируемого показателя можно разбить на две группы: внешние причины (возмущения, управление и помехи) и внутренние (нестационарность, активность и динамичность).

5. Можно выделить следующие основные подходы к прогнозированию: *экстраполяционный* (единственной причиной изменения прогнозируемого показателя считается время), *модельный* (ищется функциональная зависимость прогнозируемого показателя от факторов, на него влияющих) и *экспертный* (прогноз на основании мнений экспертов).

6. Одной из проблем прогнозирования является вопрос оценки качества прогнозной модели.

7. Важной проблемой построения прогнозных моделей является ограниченность количества данных предыстории (длина предыстории должна как минимум вдвое превышать интервал прогноза), что затрудняет применение таких моделей в условиях частой смены тенденций изменения системы.

Литература

1. Большая советская энциклопедия. (В 30 томах). Т. 21. — М.: Советская энциклопедия, 1975. — 640 с.

2. *Вертаков Ю.В., Кузьбожев Э.Н.* Упреждающее управление на основе информационных технологий: Учеб. пособие / Под ред. д-ра экон. наук Э.Н. Кузьбожева. — Курск: Изд-во Курского гос. техн. ун-та, 2001. — 152 с.

3. *Глуценко В.В.* Менеджмент: системные основы. — г. Железнодорожный, Моск. обл.: ТОО НПЦ «Крылья», 1998. — 224 с.

4. *Гмошинский В.Г.* Практика прогнозирования. — М.: Знание, 1972. — 64 с.

5. *Городилин Д. Ю.* Методы анализа и прогнозирования в системе управления субъектом экономики // Поволжский гуманитарный журнал (Электронный научный журнал). 2003. № 1.

http://www.seun.ru/oldsea/Win/Journal/j2003_1r/Economy/Gorodilin 2.doc.

6. *Четыркин Е.М.* Статистические методы прогнозирования. — М.: Статистика, 1977. — 200 с.

7. *Качала В.В.* Основы теории управления. — Мурманск: Изд-во ИМЭП МГАРФ, 1996. — 83 с.

8. *Качала В.В.* Проблемы выбора структуры регрессионных моделей // Хранение и обработка экспериментальных данных. — Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1992. — С. 28—46.

9. *Качала В.В.* Системный подход при прогнозировании экономических показателей // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2001. Т. 4, № 2. С. 209—212.

10. Рабочая книга по прогнозированию / Редкол.: отв. ред. *И.В. Бестужев-Лада*. — М.: Мысль, 1982. — 430 с.

11. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. *В.Н. Волковой, В.Н. Козлова*. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.

12. Энциклопедия кибернетики. В 2-х томах. — Киев: Главная редакция УСЭ, 1974. Т. 2. — 619 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните понятия «прогноз» и «прогнозирование».
2. Перечислите основные виды прогнозов по времени упреждения.

3. Назовите основную гипотезу, лежащую в основе прогнозирования.
4. Объясните суть экстраполяции.
5. Перечислите причины изменения прогнозируемого показателя:
 - а) внешние;
 - б) внутренние.
6. Перечислите основные подходы к прогнозированию.
7. Раскройте суть экстраполяционного подхода к прогнозированию.
8. Перечислите основные виды кривых роста.
9. В каких случаях следует применять экстраполяционный подход?
10. Укажите основные достоинства и недостатки экстраполяционного подхода.
11. Раскройте суть модельного подхода к прогнозированию.
12. С какими основными трудностями сталкивается модельный подход?
13. Укажите основные достоинства и недостатки модельного подхода.
14. Как оценивается качество прогнозных математических моделей?
15. Раскройте суть экспертного подхода к прогнозированию.
16. Укажите основные достоинства и недостатки экспертного подхода.

Г Л А В А 10

Методология системного анализа

Любая научная, исследовательская и практическая деятельность проводится на базе методов, методик и методологий.

✓ **Метод** — это прием или способ действия.

✓ **Методика** — это совокупность методов, приемов проведения какой-либо работы.

✓ **Методология** — это совокупность методов, правила распределения и назначения методов, а также шаги работы и их последовательность.

Имеются свои методы, методики и методологии и у системного анализа. Однако, в отличие от классических наук, системный анализ находится в стадии развития и еще не имеет устоявшегося, общепризнанного «инструментария».

Кроме того, каждая наука имеет свою методологию, поэтому дадим еще одно определение.

✓ **Методология** — это совокупность методов, применяемых в какой-либо науке.

В каком-то смысле можно говорить и о методологии системного анализа, хотя это пока еще очень рыхлая, «сырая» методология.

10.1. Системность

Прежде чем рассматривать системную методологию, надо разобраться с понятием «системный». Сегодня широко используются такие понятия как «системный анализ», «системный подход», «теория систем», «принцип системности» и др. При этом их не всегда различают и часто применяют как синонимы.

Наиболее общим понятием, которое обозначает все возможные проявления систем, является «системность». Ю.П. Сурмин предлагает рассматривать структуру системности в трех аспектах (рис. 10.1) [17]: системная теория, системный подход и системный метод.

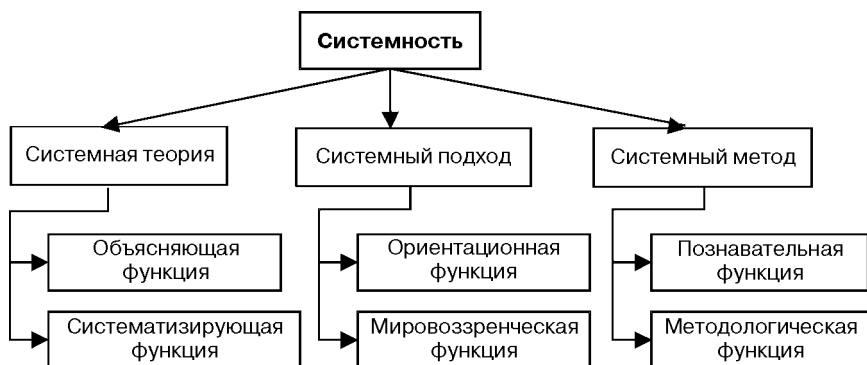


Рис. 10.1. Структура системности и составляющие ее функции

1. *Системная теория (теория систем)* реализует объясняющую и систематизирующую функции: дает строгое научное знание о мире систем; объясняет происхождение, устройство, функционирование и развитие систем различной природы.

2. *Системный подход* следует рассматривать как некоторый методологический подход человека к действительности, представляющий собой некоторую общность принципов, системное мировоззрение.

☑ **Подход** — это совокупность приемов, способов воздействия на кого-нибудь, в изучении чего-нибудь, ведении дела и т. д.

☑ **Принцип** — а) основное, исходное положение какой-либо теории; б) наиболее общее правило деятельности, которое обеспечивает его правильность, но не гарантирует однозначность и успех.

Итак, *подход* — это некоторая обобщенная система представлений о том, как должна выполняться та или иная деятельность (но не детальный алгоритм действия), а принцип деятельности — множество некоторых обобщенных приемов и правил.

Кратко суть системного подхода можно определить так:

☑ **Системный подход** — это методология научного познания и практической деятельности, а также объяснительный принцип, в основе которых лежит **рассмотрение объекта как системы** [11].

Системный подход заключается в отказе от односторонне аналитических, линейно-причинных методов исследования. Основной акцент при его применении делается на анализе целостных свойств объекта, выявлении его различных связей и структуры [14], особенностей функционирования и развития. Системный подход представляется достаточно универсальным подходом при анализе, исследовании,

проектировании и управлении любых сложных технических, экономических, социальных, экологических, политических, биологических и других систем.

Назначение системного подхода заключается в том, что он направляет человека на системное видение действительности. Он заставляет рассматривать мир с системных позиций, точнее — с позиций его системного устройства.

Таким образом, системный подход, будучи принципом познания, выполняет *ориентационную и мировоззренческую функции*, обеспечивая не только видение мира, но и ориентацию в нем.

3. *Системный метод* реализует познавательную и методологическую функции. Он выступает как некоторая интегральная совокупность относительно простых методов и приемов познания, а также преобразования действительности.

Конечная цель любой системной деятельности заключается в выработке решений как на стадии проектирования систем, так и при управлении ими. В этом контексте *системный анализ* можно считать сплавом методологии общей теории систем, системного подхода и системных методов обоснования и принятия решений [5].

10.2. Естественнонаучная методология и системный подход

Системный анализ не является чем-то принципиально новым в исследовании окружающего мира и его проблем — он базируется на естественнонаучном подходе, корни которого уходят в прошлые века.

Центральное место в исследовании занимают два противоположных подхода: анализ и синтез.

Анализ предусматривает процесс разделения целого на части. Он весьма полезен в том случае, если требуется выяснить, из каких частей (элементов, подсистем) состоит система. Посредством анализа приобретаются **знания**. Однако при этом нельзя понять свойства системы в целом.

Задача *синтеза* — построение целого из частей. Посредством синтеза достигается **понимание**.

В исследовании любой проблемы можно указать несколько главных этапов [4]:

- 1) *постановка цели исследования*;
- 2) *выделение проблемы* (выделение системы): выделить главное, существенное, отбросив малозначимое, несущественное;
- 3) *описание*: выразить на едином языке (уровне формализации) разнородные по своей природе явления и факторы;

4) *установление критериев*: определить, что значит «хорошо» и «плохо» для оценивания полученной информации и сравнения альтернатив;

5) *идеализация* (концептуальное моделирование): ввести рациональную идеализацию проблемы, упростить ее до допустимого предела;

6) *декомпозиция* (анализ): разделить целое на части, не теряя свойств целого;

7) *композиция* (синтез): объединить части в целое, не теряя свойств частей;

8) *решение*: найти решение проблемы.

В отличие от традиционного подхода, при котором проблема решается в строгой последовательности вышеприведенных этапов (или в другом порядке), *системный подход состоит в многосвязности процесса решения*: этапы рассматриваются совместно, во взаимосвязи и диалектическом единстве*. При этом возможен переход к любому этапу, в том числе и возврат к постановке цели исследования.

Главным признаком системного подхода является наличие доминирующей роли сложного, а не простого, целого, а не составляющих элементов. Если при традиционном подходе к исследованию мысль движется от простого к сложному, от частей — к целому, от элементов — к системе, то *в системном подходе*, наоборот, *мысль движется от сложного к простому, от целого к составным частям, от системы к элементам*. При этом эффективность системного подхода тем выше, чем к более сложной системе он применяется [13].

10.3. Системная деятельность

Всякий раз, когда ставится вопрос о технологиях системного анализа, сразу же возникают непреодолимые трудности, связанные с тем, что *устоявшихся технологий системного анализа в практике нет* [17]. Системный анализ в настоящее время представляет собой слабосвязанную совокупность приемов и методов неформального и формального характера [9]. В системном мышлении пока чаще господствует интуиция.

Ситуация усугубляется еще и тем, что, несмотря на полувековую историю развития системных идей, *нет однозначности в понимании*

* В «досистемную» эпоху (до середины XIX века) прогрессивное развитие естествознания происходило на основе методологии *элементаризма*. Суть его состояла в разложении объекта на простые (неделимые) составляющие, изучении частей и синтезе целого на основе простого объединения частей, без учета взаимосвязи между ними [1].

самого системного анализа. Ю.П. Сурминым [17] выделяются следующие варианты понимания сущности системного анализа:

- Отождествление технологии системного анализа с технологией научного исследования. При этом для самого системного анализа в этой технологии практически не находится места.
- Сведение системного анализа к системному конструированию. По сути, системно-аналитическая деятельность отождествляется с системотехнической деятельностью.
- Очень узкое понимание системного анализа, сведение его к одной из его составляющих, например к структурно-функциональному анализу.
- Отождествление системного анализа с системным подходом в аналитической деятельности.
- Понимание системного анализа как исследования системных закономерностей.
- В узком смысле под системным анализом довольно часто понимают совокупность математических методов исследования систем.
- Сведение системного анализа к совокупности методологических средств, которые используются для подготовки, обоснования и осуществления решений по сложным проблемам.

Таким образом, то, что называют системным анализом, представляет собой недостаточно интегрированный массив методов и приемов системной деятельности (более подробно см. [17]).

Сегодня упоминание о системном анализе можно найти во многих работах, связанных с управлением, решением проблем. И хотя его вполне справедливо рассматривают как эффективный метод изучения объектов и процессов управления, методики системной аналитики в решении конкретных управленческих задач практически отсутствуют. Как пишет Ю.П. Сурмин [17]: «Системный анализ в управлении представляет ныне не развитую практику, а нарастающие ментальные декларации, не имеющие какого-либо серьезного технологического обеспечения».

10.4. Подходы к анализу и проектированию систем

При анализе и проектировании действующих систем различных специалистов могут интересовать разные аспекты: от внутреннего устройства системы до организации управления в ней. В связи с этим условно выделяют следующие подходы к анализу и проектированию [11]: 1) системно-элементный, 2) системно-структурный, 3)

системно-функциональный, 4) системно-генетический, 5) системно-коммуникативный, 6) системно-управленческий и 7) системно-информационный.

1. Системно-элементный подход. Непременной принадлежностью систем являются их *компоненты, части*, именно то, из чего образовано целое и без чего оно невозможно.

☒ **Системно-элементный подход** отвечает на вопрос, из чего (каких элементов) образована система.

Этот подход иногда называли «перечислением» системы. Его вначале пытались применить для исследования сложных систем. Однако первые же попытки применить такой подход к исследованию систем управления предприятиями и организациями показали, что «перечислить» сложную систему практически невозможно.

Пример. В истории разработки автоматизированных систем управления был такой случай [15]. Разработчики написали несколько десятков томов исследования системы, но так и не могли приступить к созданию АСУ, поскольку не могли гарантировать полноты описания. Руководитель разработки вынужден был уволиться, а впоследствии стал изучать системный подход и популяризировать его.

2. Системно-структурный подход. Компоненты системы являются собой не набор случайных бессвязных объектов. Они интегрированы системой, являются компонентами именно данной системы.

☒ **Системно-структурный подход** направлен на выявление компонентного состава системы и связей между ними, обеспечивающих целенаправленное функционирование.

При *структурном исследовании* предметом исследований, как правило, являются состав, структура, конфигурация, топология и т.п.

3. Системно-функциональный подход. Цель выступает в системе как один из важных системообразующих факторов. Но цель требует действий, направленных на ее достижение, которые есть не что иное, как ее функции. Функции по отношению к цели выступают как способы ее достижения.

☒ **Системно-функциональный подход** направлен на рассмотрение системы с точки зрения ее поведения в среде для достижения целей.

При *функциональном исследовании* рассматриваются: динамические характеристики, устойчивость, живучесть, эффективность, т. е. все то, что при неизменной структуре системы зависит от свойств ее элементов и их отношений.

4. Системно-генетический подход. Любая система не является неизменной, раз и навсегда заданной. Она не абсолютна, не вечна главным образом потому, что ей присущи внутренние противоречия.

Каждая система не только функционирует, но и движется, развивается; она имеет свое начало, переживает время своего зарождения и становления, развития и расцвета, упадка и гибели. А это значит, что время является непременным атрибутом системы, что любая система *исторична*.

✓ **Системно-генетический** (или *системно-исторический*) **подход** направлен на изучение системы с точки зрения ее развития во времени.

Системно-генетический подход определяет генезис — возникновение, происхождение и становление объекта как системы.

5. Системно-коммуникативный подход. Каждая система всегда является элементом (подсистемой) другой, более высокого уровня, системы, и сама, в свою очередь, образована из подсистем более низкого уровня. Иначе говоря, система связана множеством отношений (коммуникаций) с самыми различными системными и несистемными образованиями.

✓ **Системно-коммуникативный подход** направлен на изучение системы с точки зрения ее отношений с другими, внешними по отношению к ней, системами.

6. Системно-управленческий подход. Система постоянно испытывает на себе возмущающие воздействия. Это прежде всего внутренние возмущения, являющиеся результатом внутренней противоречивости любой системы. Это и внешние возмущения, которые далеко не всегда благоприятны: недостаток ресурсов, жесткие ограничения и т. д. Между тем система живет, функционирует, развивается. Значит, наряду со специфическим набором компонентов, внутренней организацией (структурой) и т. д., есть и другие системообразующие, системосохраняющие факторы. Эти факторы обеспечения устойчивости жизнедеятельности системы называют *управлением*.

✓ **Системно-управленческий подход** направлен на изучение системы с точки зрения обеспечения ее целенаправленного функционирования в условиях внутренних и внешних возмущений.

7. Системно-информационный подход. Управление в системе немыслимо без передачи, получения, хранения и обработки информации. Информация — это способ связи компонентов системы друг с другом, каждого из компонентов с системой в целом, а системы в целом — со средой. В силу сказанного, нельзя раскрыть сущность системности без изучения ее информационного аспекта.

✓ **Системно-информационный подход** направлен на изучение системы с точки зрения передачи, получения, хранения и обработки данных внутри системы и в связи со средой.

10.5. Методики системного анализа

Методология системного анализа представляет собой довольно сложную и пеструю совокупность *принципов, подходов, концепций* и конкретных *методов* [17], а также *методик*.

Наиболее важную часть методологии системного анализа составляют ее методы и методики (для простоты в дальнейшем обобщенно будем говорить о методиках).

10.5.1. Обзор методик системного анализа

Имеющиеся методики системного анализа еще не получили достаточно убедительной классификации, которая была бы принята единогласно всеми специалистами [16]. Например, Ю.И. Черняк делит методы системного исследования на четыре группы: неформальные, графические, количественные и моделирование [18]. Достаточно глубокий анализ методик различных авторов представлен в работах В.Н. Волковой [2, 15], а также Ю.П. Сурмина [17].

В качестве простейшего варианта методики системного анализа можно рассматривать такую последовательность [19]:

- 1) постановка задачи;
- 2) структуризация системы;
- 3) построение модели;
- 4) исследование модели.

Другие примеры и анализ этапов первых методик системного анализа приведены в книге [2], где рассматриваются методики ведущих специалистов системного анализа 70-х и 80-х годов прошлого столетия: С. Оптнера [10], Э. Квейда [8], С. Янга [20], Е.П. Голубкова [3], Ю.И. Черняка [18].

Примеры: Этапы методик системного анализа по *С. Оптнеру* [10]:

- | | |
|---|---|
| 1. Идентификация симптомов. | 9. Составление решения. |
| 2. Определение актуальности проблемы. | 10. Признание решения коллективом исполнителей и руководителей. |
| 3. Определение цели. | 11. Запуск процесса реализации решения. |
| 4. Вскрытие структуры системы и ее дефектных элементов. | 12. Управление процессом реализации решения. |
| 5. Определение структуры возможностей. | 13. Оценка реализации и ее последствий. |
| 6. Нахождение альтернатив. | |
| 7. Оценка альтернатив. | |
| 8. Выбор альтернативы. | |

Этапы методик системного анализа по **С. Янгу** [20]:

- | | |
|--|--|
| 1. Определение цели системы. | 6. Согласование решений в организации. |
| 2. Выявление проблем организации. | 7. Утверждение решения. |
| 3. Исследование проблем и постановка диагноза. | 8. Подготовка к вводу. |
| 4. Поиск решения проблемы. | 9. Управление применением решения. |
| 5. Оценка всех альтернатив и выбор наилучшей из них. | 10. Проверка эффективности решения. |

Этапы методик системного анализа по **Ю.И. Черняку** [18]:

- | | |
|--|--|
| 1. Анализ проблемы. | 7. Прогноз и анализ будущих условий. |
| 2. Определение системы. | 8. Оценка целей и средств. |
| 3. Анализ структуры системы. | 9. Отбор вариантов. |
| 4. Формирование общей цели и критерия. | 10. Диагноз существующей системы. |
| 5. Декомпозиция цели и выявление потребности в ресурсах и процессах. | 11. Построение комплексной программы развития. |
| 6. Выявление ресурсов и процессов — композиция целей. | 12. Проектирование организации для достижения целей. |

Из анализа и сопоставления этих методик видно, что в них в той или иной форме представлены такие этапы:

- выявление проблем и постановки целей;
- разработка вариантов и модели принятия решения;
- оценка альтернатив и поиска решения;
- реализация решения.

Кроме того, в некоторых методиках имеются этапы оценки эффективности решений. В наиболее полной методике Ю.И. Черняка особо предусмотрен этап проектирования организации для достижения цели.

При этом различные авторы акцентируют свое внимание на разных этапах, соответственно более подробно их детализируя. В частности, основное внимания уделяется следующим этапам:

- разработке и исследованию альтернатив принятия решений (С. Оптнер, Э. Квейд), выбору решения (С. Оптнер);
- обоснованию цели и критериев, структуризации цели (Ю.И. Черняк, С. Оптнер, С. Янг);
- управлению процессом реализации уже принятого решения (С. Оптнер, С. Янг).

Поскольку выполнение отдельных этапов может занимать достаточно много времени, возникает необходимость большей их детализации, разделения на подэтапы и более четкого определения конечных результатов выполнения подэтапов. В частности, в методике Ю.И. Черняка каждый из 12 этапов разделен на подэтапы, которых в общей сложности — 72.

Из других авторов методик системного анализа можно назвать Э.А. Капитонова [7] и Ю.М. Плотницкого [12].

Примеры: Э.А. Капитонов выделяет следующие последовательные этапы системного анализа [7].

1. Постановка целей и основных задач исследования.
2. Определение границ системы с целью отделения объекта от внешней среды, разграничения его внутренних и внешних связей.
3. Выявление сути целостности.

Близкий подход использует и Ю.М. Плотницкий, который рассматривает системный анализ как совокупность шагов по реализации методологии системного подхода в целях получения информации о системе. Он выделяет в системном анализе 11 этапов [12].

1. Формулировка основных целей и задач исследования.
2. Определение границ системы, отделение ее от внешней среды.
3. Составление списка элементов системы (подсистем, факторов, переменных и т. д.).
4. Выявление сути целостности системы.
5. Анализ взаимосвязанных элементов системы.
6. Построение структуры системы.
7. Установление функций системы и ее подсистем.
8. Согласование целей системы и ее подсистем.
9. Уточнение границ системы и каждой подсистемы.
10. Анализ явлений эмерджентности.
11. Конструирование системной модели.

10.5.2. Разработка методик системного анализа

Конечная цель системного анализа — оказать помощь в понимании и решении имеющейся проблемы, что сводится к поиску и выбору варианта решения проблемы. Результатом будет выбранная альтернатива либо в виде управленческого решения, либо в виде создания новой системы (в частности, системы управления) или реорганизации старой, что опять же является управленческим решением.

Неполнота информации о проблемной ситуации затрудняет выбор методов ее формализованного представления и не позволяет сформировать математическую модель. В этом случае возникает необходимость в разработке методик проведения системного анализа.

Необходимо определить последовательность этапов системного анализа, рекомендовать методы для выполнения этих этапов, предусмотреть при необходимости возврат к предыдущим этапам. Такая последовательность определенным образом выделенных и упорядоченных этапов и подэтапов в сочетании с рекомендованными методами и приемами их выполнения представляет собой *структуру методики системного анализа* [2, 15].

Практики видят в методиках важный инструмент для решения проблем своей предметной области. И хотя к сегодняшнему дню накоплен большой их арсенал, но, к сожалению, следует признать, что

разработка универсальных методов и методик не представляется возможной. В каждой предметной области, для различных типов решаемых проблем системному аналитику приходится разрабатывать свою методику системного анализа на базе множества принципов, идей, гипотез, методов и методик, накопленных в области теории систем и системного анализа.

Авторы книги [2] рекомендуют при разработке методики системного анализа прежде всего определить тип решаемой задачи (проблемы). Затем, если проблема охватывает несколько областей: выбор целей, совершенствование оргструктуры, организацию процесса принятия и реализации решения, выделить в ней эти задачи и разработать методики для каждой из них.

10.5.3. Пример методики системного анализа предприятия

В качестве примера современной методики системного анализа рассмотрим некую обобщенную методику анализа предприятия [6].

Предлагается следующий перечень процедур системного анализа, который может быть рекомендован менеджерам и специалистам по экономическим информационным системам.

1. Определить границы исследуемой системы (см. выделение системы из окружающей среды).

2. Определить все надсистемы, в которые входит исследуемая система в качестве части.

Если выясняется воздействие на предприятие экономической среды, именно она и будет той надсистемой, в которой следует рассматривать его функции (см. иерархичность). Исходя из взаимосвязанности всех сфер жизни современного общества, **любой объект, в частности, предприятие, следует изучать в качестве составной части многих систем** — экономических, политических, государственных, региональных, социальных, экологических, международных (см. полисистемность). Каждая из этих надсистем, например экономическая, в свою очередь имеет немало компонентов, с которыми связано предприятие: поставщики, потребители, конкуренты, партнеры, банки и т. д. Эти же компоненты входят одновременно и в другие надсистемы — социокультурную, экологическую и т. п. А если еще учесть, что каждая из этих систем, а также каждый из их компонентов имеют свои специфические цели, противоречащие друг другу, то становится ясной **необходимость сознательного изучения среды, окружающей предприятие** (см. расширение проблемы до проблематики). В противном случае вся совокупность многочисленных влияний, оказываемых надсистемами на предприятие,

будет казаться хаотичной и непредсказуемой, исключая возможность разумного управления им.

3. Определить основные черты и направления развития всех надсистем, которым принадлежит данная система, в частности, сформулировать их цели и противоречия между ними.

4. Определить роль исследуемой системы в каждой надсистеме, рассматривая эту роль как средство достижения целей надсистемы.

Следует рассмотреть при этом два аспекта:

- **идеализированную, ожидаемую роль** системы с точки зрения надсистемы, т. е. те функции, которые следовало бы выполнять, чтобы реализовать цели надсистемы;
- **реальную роль** системы в достижении целей надсистемы.

Например, с одной стороны, оценка потребностей покупателей в конкретном виде товаров, их качестве и количестве, а с другой — оценка параметров товаров, реально выпускаемых конкретным предприятием.

Определение ожидаемой роли предприятия в потребительской среде и его реальной роли, а также их сравнение, позволяют понять многие причины успеха или неудачи компании, особенности его работы, предвидеть реальные черты ее будущего развития.

5. Выявить состав системы, т. е. определить части, из которых она состоит.

6. Определить структуру системы, представляющую собой совокупность связей между ее компонентами.

7. Определить функции активных элементов системы, их «вклад» в реализацию роли системы в целом.

Принципиально важным является гармоническое, непротиворечивое сочетание функций разных элементов системы. Эта проблема особенно актуальна для подразделений, цехов крупных предприятий, чьи функции часто во многом «не состыкованы», недостаточно подчинены общему замыслу.

8. Выявить причины, объединяющие отдельные части в систему, в целостность.

Они носят название интегрирующих факторов, к которым в первую очередь относится человеческая деятельность. В ходе деятельности человек осознает свои интересы, определяет цели, осуществляет практические действия, формируя системы средств для достижения целей. Исходным, первичным интегрирующим фактором является цель.

Цель в любой сфере деятельности представляет собой сложное сочетание различных противоречивых интересов. В пересечении подобных интересов, в своеобразной их комбинации заключается истинная цель. Всестороннее познание ее позволяет судить о степени устойчивости системы, о ее непротиворечивости, целостности, предвидеть характер ее дальнейшего развития.

9. Определить все возможные связи, коммуникации системы с внешней средой.

Для действительно глубокого, всестороннего изучения системы недостаточно выявить ее связи со всеми надсистемами, которым она принадлежит. Необходимо еще познать такие системы во внешней среде, которым принадлежат компоненты исследуемой системы. Так, следует определить все системы, которым принадлежат работники предприятия — профсоюзы, политические партии, семьи, системы социокультурных ценностей и этических норм, этнические группы и т. д. Необходимо также хорошо знать связи структурных подразделений и работников предприятия с системами интересов и целей потребителей, конкурентов, поставщиков, зарубежных партнеров и пр. Нужно также видеть связь между используемыми на предприятии технологиями и «пространством» научно-технического процесса и т. п. Осознание органического, хотя и противоречивого единства всех систем, окружающих предприятие, позволяет понимать причины его целостности, предотвращать процессы, ведущие к дезинтеграции.

10. Рассмотреть исследуемую систему в динамике, в развитии.

Для глубокого понимания любой системы нельзя ограничиваться рассмотрением коротких промежутков времени ее существования и развития. Целесообразно по возможности исследовать всю ее историю, выявить причины, побудившие создать эту систему, определить иные системы, из которых она выросла и строилась. Также важно изучать не только историю системы или динамику ее нынешнего состояния, но и попытаться, используя специальные приемы, увидеть развитие системы в будущем, т. е. прогнозировать ее будущие состояния, проблемы, возможности.

Необходимость динамического подхода к исследованию систем легко проиллюстрировать сравнением двух предприятий, у которых в какой-то момент времени совпали значения одного из параметров, например объем продаж. Из этого совпадения совсем не вытекает, что предприятия занимают на рынке одинаковое положение: одно из них может набирать силу, двигаться к расцвету, а другое, наоборот, переживать спад. Поэтому судить о любой системе, в частности, о предприятии нельзя лишь по «моментальной фотографии» по одному

значению какого-либо параметра; необходимо исследовать **изменения** параметров, рассмотрев их в динамике.

Изложенная здесь последовательность процедур системного анализа не является обязательной и закономерной. Обязательным является скорее сам перечень процедур, чем их последовательность. Единственное правило заключается в целесообразности многократного возвращения в ходе исследования к каждой из описанных процедур. Только это является залогом глубокого и всестороннего изучения любой системы.

Резюме

1. Любая научная, исследовательская и практическая деятельность проводится на базе методов (приемов или способов действия), методик (совокупности методов и приемов проведения какой-либо работы) и методологий (совокупности методов, правил распределения и назначения методов, а также шагов работы и их последовательности).

2. Наиболее общим понятием, которое обозначает все возможные проявления систем, является «системность», которую предлагается рассматривать в трех аспектах:

а) *системная теория* — дает строгое научное знание о мире систем и объясняет происхождение, устройство, функционирование и развитие систем различной природы;

б) *системный подход* — выполняет ориентационную и мировоззренческую функции, обеспечивает не только видение мира, но и ориентацию в нем;

в) *системный метод* — реализует познавательную и методологическую функции.

3. Системный анализ не является чем-то принципиально новым в исследовании окружающего мира и его проблем — он базируется на естественнонаучном подходе. В отличие от традиционного подхода, при котором проблема решается в строгой последовательности вышеприведенных этапов (или в другом порядке), *системный подход состоит в многосвязности процесса решения*.

4. Главным признаком системного подхода является наличие доминирующей роли сложного, а не простого, целого, а не составляющих элементов. Если при традиционном подходе к исследованию мысль движется от простого к сложному, от частей — к целому, от элементов — к системе, то *при системном подходе, наоборот, мысль движется от сложного к простому, от целого к составным частям, от системы к элементам*.

5. При анализе и проектировании действующих систем различных специалистов могут интересовать разные аспекты — от внутрен-

него устройства системы до организации управления в ней, что порождает следующие подходы к анализу и проектированию: *системно-элементный, системно-структурный, системно-функциональный, системно-генетический, системно-коммуникативный, системно-управленческий и системно-информационный*.

6. Методология системного анализа представляет совокупность *принципов, подходов, концепций* и конкретных *методов*, а также *методик*.

Литература

1. Бондаренко Н.И. Методология системного подхода к решению проблем: история, теория, практика. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та экономики и финансов, 1997. — 388 с.
2. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории управления и системного анализа. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. — 510 с.
3. Голубков Е.П. Использование системного анализа в принятии плановых решений. — М.: Экономика, 1982. — 160 с.
4. Дружинин В.В., Которов Д.С. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем). — М.: Сов. радио, 1976. — 296 с.
5. Ерохина Е.А. Теория экономического развития: системно-синергетический подход — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1999. — 160 с.
6. Камионский С.А. Менеджмент в российском банке: опыт системного анализа и управления. — М.: Деловая библиотека Омскпромстройбанка, 1998. — 112 с.
7. Капитонов Э.А. Социология XX века: История и технологии. — Ростов-н/Д.: Феникс, 1996. — 512 с.
8. Квейд Э. Анализ сложных систем. — М.: Сов. радио, 1969. — 520 с.
9. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985. — 199 с.
10. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. — М.: Сов. радио, 1969. — 216 с.
11. Основные понятия системного подхода. — <http://www1.tpu.edu.ru:8101/rus/dist/sysan/system.htm>.
12. Плотницкий Ю.М. Теоретические и эмпирические модели социальных процессов: Учеб. пособие для вузов. — М.: Логос, 1998.
13. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. — М.: СИНТЕГ, 2000. — 528 с.
14. Садовский В.Н. Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ. — М.: Наука, 1974. — 279 с.
15. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. — М.: Высш. шк., 2004. — 616 с.
16. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: Учеб. пособие. — СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2000. — 326 с.
17. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учеб. пособие. — Киев: МАУП, 2003. — 368 с.
18. Черняк Ю.И. Системный анализ в управлении экономикой. — М.: Экономика, 1975. — 191 с.
19. Чубарова Т.П. Моделирование и элементы системологии. — <http://news.1september.ru/inf/2000/3/art/chub.htm>.

20. Янг Э. Системное управление организацией. — М.: Сов. радио, 1972. — 454 с.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятия: а) «метод»; б) «методика»; в) «методология».
2. Опишите структуру системности и укажите составляющие ее функции.
3. Объясните роль:
 - а) системной теории;
 - б) системного подхода;
 - в) системного метода.
4. Перечислите последовательность шагов при естественнонаучном подходе к исследованию проблемы.
5. Укажите отличия системного подхода от естественнонаучного.
6. Раскройте суть анализа и проектирования систем при подходе:
 - а) системно-элементном;
 - б) системно-структурном;
 - в) системно-функциональном;
 - г) системно-генетическом;
 - д) системно-коммутативном;
 - е) системно-управленческом;
 - ж) системно-информационном.
7. Назовите авторов методик системного анализа.
8. Перечислите обобщенные этапы системного анализа предприятия.

Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
Литература	10
Глава 1. Цели и трудности целеполагания	11
1.1. Цели	11
1.2. Формирование критериев	15
1.3. Трудности целеполагания	16
1.4. Требования к цели	23
1.5. «Деревья» в целеполагании	23
Резюме	28
Литература	29
Контрольные вопросы и задания	29
Глава 2. Модели и моделирование	31
2.1. Моделирование	31
2.2. Классификация моделей	36
2.3. Виды моделирования	37
Резюме	40
Литература	41
Контрольные вопросы и задания	41
Глава 3. Измерительные шкалы	42
3.1. Шкалы наименований	43
3.2. Порядковые шкалы	44
3.3. Шкалы интервалов	47
3.4. Шкалы разностей	47
3.5. Шкалы отношений	48
3.6. Абсолютная шкала	48
3.7. Шкалирование	49
Резюме	50
Литература	51
Контрольные вопросы и задания	51

Глава 4. Системы	52
4.1. Связь объекта с окружающей средой	52
4.2. Объект и система	55
4.3. Выделение системы	56
4.4. Система как совокупность элементов	57
4.5. Структура	64
4.6. Система как средство достижения цели	71
Резюме	72
Литература	74
Контрольные вопросы и задания	75
Глава 5. Состояние и функционирование систем	77
5.1. Состояние системы	77
5.2. Статические и динамические свойства динамических систем	83
5.3. Пространство состояний	92
5.4. Устойчивость динамических систем	93
Резюме	95
Литература	96
Контрольные вопросы и задания	97
Глава 6. Общесистемные закономерности	99
6.1. Закономерности взаимодействия части и целого	99
6.2. Закономерности иерархической упорядоченности систем	104
6.3. Энтропийные закономерности	106
6.4. Закономерности развития	111
6.5. Другие общесистемные закономерности	116
Резюме	118
Литература	120
Контрольные вопросы и задания	121
Глава 7. Классификация систем	123
7.1. Классификация по происхождению	123
7.2. Классификация по объективности существования	123
7.3. Действующие системы	123
7.4. Централизованные и децентрализованные системы	127
7.5. Классификация по размерности	128
7.6. Классификация систем по однородности и разнообразию структурных элементов	128

7.7. Линейные и нелинейные системы	129
7.8. Дискретные системы	129
7.9. Каузальные и целенаправленные системы	130
7.10. Большие и сложные системы	130
7.11. Детерминированность	135
7.12. Классификация систем по степени организованности	136
Резюме	140
Литература	141
Контрольные вопросы и задания	143
Глава 8. Модели в системном анализе	145
8.1. Задачи и проблемы принятия решения	146
8.2. Методы моделирования систем	149
8.3. Математические модели	152
8.4. Математическое описание объектов	162
Резюме	172
Литература	173
Контрольные вопросы и задания	175
Глава 9. Системный подход к прогнозированию	177
9.1. Постановка задачи прогнозирования	177
9.2. Причины изменения прогнозируемого показателя	179
9.3. Выбор метода прогнозирования	181
Резюме	189
Литература	190
Контрольные вопросы и задания	190
Глава 10. Методология системного анализа	192
10.1. Системность	192
10.2. Естественнаучная методология и системный подход ..	194
10.3. Системная деятельность	195
10.4. Подходы к анализу и проектированию систем	196
10.5. Методики системного анализа	199
Резюме	205
Литература	206
Контрольные вопросы и задания	207