

УДК 517(075.8)
ББК 32.81:22.16а73
К49

Рецензенты:

А.С. Крюковский, научный руководитель Института инженерно-компьютерных и информационных технологий АНО ВО «РосНОУ», д-р физ.-мат. наук, проф.,

Л.В. Лабунец, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук, проф.

Автор

И.С. Клименко, Российский Новый Университет

Клименко, Игорь Семенович.

К49 Теория систем и системный анализ : учебное пособие / И.С. Клименко. — Москва : КНОРУС, 2021. — 264 с. — (Магистратура).

ISBN 978-5-406-07954-6

Изложены основные принципы системного подхода к исследованию систем различной природы и происхождения. Сформулированы базовые положения междисциплинарного научного направления — теории систем и системного анализа. Изложена методология системного исследования как совокупности информационных процессов. Проанализирована структура информационных объектов и задачи их интерпретации. Показаны возможности и ограничения процедур моделирования сложных систем с целью выбора оптимальных управляющих решений. Описана базовая методика проведения системного анализа при разрешении проблем. Обсуждены основные подходы к оцениванию качества и эффективности сложных систем, в том числе качества управляющих решений и эффективности процессов управления. В рамках общей задачи принятия решений рассмотрены источники неопределенности, препятствующей оперативному выбору оптимальных решений, и пути ее снижения.

Соответствует ФГОС ВО последнего поколения.

Для студентов, магистрантов и аспирантов, обучающихся по специальностям, относящимся к области информационных систем и методологии их использования в экономике и управлении. Может быть полезным при подготовке специалистов в области экономики и менеджмента.

Ключевые слова: система, информация, измерение, управление, решение.

УДК 517(075.8)
ББК 32.81:22.16а73

Клименко Игорь Семенович

ТЕОРИЯ СИСТЕМ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Над. № 596890. Подписано в печать 25.08.2020. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Petersburg». Усл. печ. л. 16,5. Уч.-изд. л. 14,22. Тираж 500 экз.

ООО «Издательство «КниГус»,
117218, г. Москва, ул. Кедровая, д. 14, корп. 2. Тел: +7 (495) 741-16-28.
E-mail: welcome@knigus.ru www.knigus.ru

Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.
Тел.: +7 (495) 221-89-80.

© Клименко И.С., 2021

ISBN 978-5-406-07954-6

© ООО «Издательство «КниГус», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
ЧАСТЬ I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ	15
ГЛАВА 1. СУЩНОСТЬ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА	15
1.1. Системность как общее свойство материи и мышления	15
1.2. Основные понятия и определения теории систем	17
1.3. Классификация систем	21
1.4. Эмерджентные свойства систем	25
1.5. Обратная связь в системе	27
1.6. Феномен упреждающей обратной связи	31
Вопросы и задания для самостоятельной работы	32
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ	34
2.1. Ментальные модели	34
2.2. Отображение поведения систем	35
2.3. Представление системы семантической моделью	37
2.4. Моделирование сложных систем	39
2.5. Классификация видов моделирования	41
2.6. Математическое моделирование систем	44
2.7. Принципы построения математических моделей	46
2.8. Статические и динамические модели	48
Вопросы и задания для самостоятельной работы	52
ГЛАВА 3. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМ	54
3.1. Основные понятия теории информации	54
3.2. Количественные меры информации	56
3.3. Качественные меры и свойства информации	60

3.4. Информационные процессы	65
3.5. Структура информационных объектов	68
3.6. Элементы теории принятия решений	70
3.7. Условия ситуации принятия решений.....	73
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	76
ГЛАВА 4. СИСТЕМЫ С УПРАВЛЕНИЕМ	77
4.1. Структура системы с управлением	77
4.2. Аксиомы теории управления.....	80
4.3. Функции управления.....	82
4.4. Принцип необходимого разнообразия	84
4.5. Организационная структура систем управления	91
4.5.1. Структура системы	91
4.5.2. Организационная структура управления	92
4.5.3. Классы организационных структур.....	94
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	96
ЧАСТЬ II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	98
ГЛАВА 5. ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	98
5.1. Принципы системного анализа.....	98
5.2. Структура системного исследования.....	101
5.3. Целеполагание в системном анализе	105
5.4. Структурирование цели	108
5.5. Процедура выбора в системном анализе	111
5.6. Методы качественного оценивания систем	113
5.7. Методы группового выбора	116
5.8. Метод и процедуры ранжирования	118
5.9. Парные и множественные сравнения	120
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	123
ГЛАВА 6. ОЦЕНИВАНИЕ СИСТЕМ	125
6.1. Основные понятия теории эффективности	125
6.2. Основные виды измерительных шкал.....	127
6.3. Обработка результатов измерений на разных шкалах	133
6.4. Статистические измерения	136
6.5. Регистрация и обработка статистических данных	137
6.6. Содержание обработки статистических данных	139
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	140

ГЛАВА 7. ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	142
7.1. Критерии оценивания систем.....	142
7.2. Показатели и критерии качества.....	143
7.3. Показатели и критерии эффективности	147
7.4. Методы количественного оценивания систем.....	151
7.5. Оценивание систем методами теории полезности.....	153
7.6. Определение функции полезности.....	155
7.7. Общая методология векторной оптимизации.....	157
7.8. Методы векторной оптимизации	158
7.9. Методы свертки векторного критерия	160
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	163
ГЛАВА 8. ПРОБЛЕМА ВЫБОРА В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ	165
8.1. Выбор в условиях риска	165
8.2. Выбор в условиях неопределенности.....	168
8.3. Выбор в условиях статистической неопределенности	171
8.4. Выбор решений в конфликтных ситуациях	178
8.5. Системы поддержки принятия решений	182
8.6. Интеллектуальные системы	184
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	187
ГЛАВА 9. БАЗОВАЯ МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	189
9.1. Формулировка проблемы.....	189
9.2. Структурирование проблематики	190
9.3. Конфигурирование проблемы	192
9.4. Постановка задачи и определение целей	193
9.5. Выбор и агрегирование критерии.....	194
9.6. Генерирование альтернатив.....	196
9.7. Исследование ресурсных ограничений	197
9.8. Моделирование проблемы	198
9.9. Синтез решения.....	199
9.10. Реализация решения.....	200
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	201
ЧАСТЬ III. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В УПРАВЛЕНИИ	203
ГЛАВА 10. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ	203
10.1. Содержание функций управления	203
10.2. Моделирование функций управления	207

10.2.1. Модель функции контроля.....	208
10.2.2. Модели функции оперативного управления.....	210
10.2.3. Модель функции планирования.....	215
10.2.4. Моделирование функции прогнозирования.....	217
10.3. Оценивание эффективности управления.....	219
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	222
ГЛАВА 11. КАЧЕСТВО УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ	223
11.1. Определение ключевых понятий	223
11.2. Использование критерия ценности информации	225
11.3. Использование критерия минимума эвристик	228
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	231
ГЛАВА 12. ОБЩАЯ ЗАДАЧА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ И ФЕНОМЕН НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	232
12.1. Проблематика общей задачи принятия решения.....	232
12.2. Постановка общей задачи принятия решения	234
12.3. Определение цели принятия решения.....	235
12.4. Обеспечение наблюдаемости объекта управления.....	236
12.5. Риск как характеристика ситуации принятия решения	238
12.6. Проблема наличия ресурсов управления	240
12.7. Проблема свободы выбора решения.....	242
12.8. Обеспечение управляемости объекта управления.....	243
12.9. Методология оценивания результатов управления	244
Вопросы и задания для самостоятельной работы.....	247
Заключение	249
Рекомендуемая литература	251
Основные математические обозначения	253
Словарь терминов	254
Предметный указатель	259

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из основополагающих принципов формирования информационного общества и экономики знаний является преобразование генерируемых знаний в новые стратегии управления сложными техническими и организационными системами. Сегодня на первый план выдвигается проблема эффективной генерации новых знаний. Объективное возрастание сложности систем и объектов управления порождает высокую неопределенность ситуации принятия решений.

Для корректной постановки и полноценного решения этой проблемы необходима разработка фундаментальной теоретической базы новой парадигмы развития общества, а также подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих широким научным кругозором.

Совершенно очевидно, что развитие научных направлений, связанных с созданием и использованием информационных технологий, привело к формированию комплексной предметной области на стыке теории информации, прикладной информатики, теории принятия решений, теории управления, теории эффективности и ряда смежных дисциплин.

Объективное возрастание сложности проблем формирования информационного общества усугубляется высокой степенью неопределенности и порождаемого ею риска, чреватого самыми серьезными последствиями. Пользователи сети Интернет привыкли не доверять большинству сообщений, циркулирующих в сети.

Проблема объективного измерения эффективности менеджмента приобретает все более важное значение. Нередко управленческие решения признаются эффективными задолго до того, как можно говорить о достижении цели управления.

В то же время сегодняшнее образование в области информационных технологий и прикладной информатики в полной мере отражает тенденцию дифференциации современной науки. С открытием все новых специальностей подготовки появляются разнообразные учебные дисциплины, раскрывающие те или иные прикладные аспекты применения информационных технологий. Эта же тенденция в полной мере проявляется

в процессе подготовки специалистов в области экономики и управления. Логическая связь и преемственность изложения многочисленных профильных дисциплин прослеживаются не в полной мере, что препятствует их системному освоению.

В результате это приводит к массовой подготовке узкопрофильных специалистов, способных выполнять ограниченный набор конкретных процедур. Что же касается владения навыками аналитического мышления и синтеза новых решений, то найти таких специалистов становится все сложнее. Относительная простота освоения работы на компьютере входит в противоречие с невысокой эффективностью функционирования информационных систем.

На наш взгляд необходимо сконцентрировать внимание на интеграционной составляющей высшего образования, которая в учебных планах и программах отражена пока крайне слабо. Учебная дисциплина «Теория систем и системный анализ», пожалуй, в наибольшей степени соответствует задаче систематизации знаний, умений и навыков специалистов.

Однако круг доступных литературных источников для освоения этой дисциплины ограничен монографиями и учебными пособиями для инженерных специальностей, которые далеко не в полной мере пригодны для подготовки в многочисленных областях прикладной информатики. Полагаем, что настоящее ученое пособие может в определенной степени восполнить этот пробел.

Будучи тесно связанным с рабочей программой дисциплины «Теория систем и системный анализ», материал пособия в полной мере ориентирован также на программы дисциплин «Теория информационных процессов и систем» и «Системный анализ в управлении».

Структура учебного пособия сформирована в расчете на достаточно широкий круг читателей, включая студентов, обучающихся по различным специальностям направлений подготовки 09.03.02 и 09.03.03. Она также ориентирована на магистрантов со специализацией по направлениям подготовки 09.04.02 и 09.04.03 и аспирантов, обучающихся по специальностям 05.13.01 и 05.13.10.

Структура пособия включает три части, содержащие соответственно основные положения теории систем, системного анализа и их использования в управлении. Материал пособия разбит на двенадцать глав, каждая из которых по объему соответствует двум лекциям. Каждую главу завершает перечень вопросов и заданий для самоконтроля и самостоятельной работы.

Автор благодарит профессора Л. Г. Лабскера за плодотворное обсуждение проблем принятия решений в условиях статистической неопределенности и риска. Автор также признателен профессору А. С. Крюковскому и профессору Л. В. Лабунцу за поддержку, конструктивную критику и ценные замечания.

Надо измерять все измеримое и сделать измеримым то, что пока не поддается измерению

Галилео Галилей

ВВЕДЕНИЕ

Человечество вступило в эпоху информационного общества. Масштабная научно-техническая революция последних тридцати лет коснулась практически всех областей человеческой деятельности. Технические и организационно-технические системы становятся все более сложными. Поэтому возникает необходимость в автоматизации интеллектуальной деятельности, в частности управления сложными системами. Понимание важности системного подхода вышло за рамки специальных научных дисциплин и буквально пронизывает повседневную практику.

По мере познания окружающего мира человек все в большей степени осознавал его системное устройство. В ходе этого процесса возник феномен системного мышления. Собственно говоря, система мира познается в силу системности мышления. Однако материальный мир не только познаем, его можно также создавать искусственным путем. Именно на развитии техники и технологий базируется стратегия выживания нашего биологического вида. Одним из принципиальных условий развития человеческой цивилизации стало формирование и совершенствование системы информационного обмена, начало которой положило возникновение языка, речи. Основу языка, как известно, составляют понятия, введение которых открыло путь теоретического познания на основе обобщения.

Современная наука представляет собой чрезвычайно разветвленный комплекс направлений исследования. В эмпирической области она занимается анализом разнообразных конкретных систем, а в теоретической — синтезом абстрактных моделей этих систем. Назначение теоретических моделей состоит в нахождении непротиворечивого языка описания, объяснения и предсказания поведения систем различной природы и происхождения. Следует, однако, подчеркнуть, что абстрактное, понятийное мышление, принципиально отличающее человека от всех высших животных, порождает неустранимую неоднозначность естественного языка. Действительно, любое понятие нуждается в определении, дефиниции с помощью других понятий, которым, в свою очередь, необходимо дать определения. Возникает потребность в разработке тезауруса, терминологического словаря, очищенного от неоднозначности, в котором каждому слову соответствует одно понятие.

Поэтому в каждой отрасли науки и техники создается, развивается и уточняется свой собственный понятийный аппарат, и в этом состоит одно из проявлений дифференциации научного знания. Как следствие, представители различных научных дисциплин зачастую по-разному трактуют одни и те же термины, приписывая им разный смысл. С другой стороны, для науки на современном этапе ее развития естественным является процесс ее интеграции, что проявляется, в первую очередь, в формировании междисциплинарных областей знания. В наибольшей степени, пожалуй, междисциплинарный характер присущ именно общей теории систем, которая не только опирается на использование знаний из самых разных областей науки, но и объединяет, интегрирует их в себе.

Общая теория систем составляет основу развития таких прикладных направлений исследования проблем с неопределенностью, как исследование операций, кибернетика, системология, системотехника и другие, объединяемые общим названием системные исследования. Наиболее конструктивным направлением системных исследований в настоящее время признается *системный анализ*. Методология системного анализа стала эффективным инструментом принятия решений в ситуациях с высокой начальной неопределенностью, характерных для многих сфер современной деятельности.

Таким образом, системный подход, постепенно сложившийся в процессе развития познавательного процесса, закономерно стал важнейшим средством изучения, создания, обучения сложных систем, а также управления ими. В основе системного подхода лежит осознание того обстоятельства, что понимание поведения сложных объектов природы, техники, общества и мышления возможно только при рассмотрении их как *систем*, т.е. в их целостном единстве.

Основными отличительными признаками системного подхода являются:

- направленность на выявление все более широкой познавательной реальности;
- новый принцип объяснения реальности, в основе которого лежит поиск конкретных механизмов обеспечения целостности объекта и достаточно полной типологии его связей;
- представление многообразия разнотипных связей в операционном виде, допускающем их непосредственное сопоставление, сравнение и оценивание;
- признание того, что сложные объекты допускают не один, а множество вариантов расчленения на компоненты.

Системный подход основан на рассмотрении предметов и явлений окружающего нас мира как элементов определенного целостного процесса. Основными признаками, определяющими систему как таковую, являются взаимодействие элементов в рамках целого и несводимость свойств целого к свойствам его элементов и подсистем. При этом любая из подсистем, в свою очередь, может рассматриваться как самостоятельная система, а любая из систем — как подсистема или элемент системы более высокого уровня иерархии. Все зависит от постановки цели и задач исследования.

Поскольку все реальные системы в природе и обществе являются в той или иной степени открытыми, то в процессе их изучения в рассмотрение включаются системы, с которыми данная система взаимодействует и которые составляют для нее внешнюю среду. Взаимодействие системы с внешней средой всегда осуществляется посредством обмена с ней материей, энергией и информацией. При этом, подчеркнем, и энергия, и информация нуждаются в материальном носителе.

На современном уровне научного знания установлено, что системы неживой природы обмениваются с окружающей средой веществом и энергией. Системы живой природы, кроме того, передают и получают информацию, посредством которой осуществляется управление наследственностью. В социально-экономических и организационных системах обмен информацией все в большей степени приобретает воистину первостепенное значение, составляя основу жизнедеятельности общества.

Поэтому важнейшую роль в использовании системного подхода играет теория информации, которая всегда рассматривает множество событий или состояний, поэтому ее исходные данные и окончательные выводы относятся исключительно к множеству как таковому, а не к какому-либо его элементу. Этим, в частности, объясняется необходимость

широкого использования математического аппарата теории множеств в системных исследованиях.

Феномен информации является прямым следствием такого эволюционного события, как появление во Вселенной наблюдателя —носителя сознания и мышления. Дело в том, что взаимодействие одного материального объекта с другим приводит их в состояние взаимного соответствия, которое представляет собой на элементарном уровне то, что в философии называется «отражением». Однако только человеку присуща та высшая форма отражения реальности, которая порождает знание, т.е. информацию.

Физическое взаимодействие остается необходимым при обмене информацией, ее перенесении в пространстве и во времени. Эту роль выполняют сигналы, материальные носители информации. При этом передаваемый от источника к приемнику сигнал только тогда переносит информацию, когда снимает неопределенность приемника относительно ожидаемого сообщения.

Понятие информации является, безусловно, наиболее сложным из всех, используемых человечеством. Его осмысление еще далеко не завершено и ждет своего развития. Именно поэтому мы рассматриваем разные подходы к определению и интерпретации феномена информации.

На современном этапе развития информационного общества, становления цифровой экономики определяющим ресурсом среди основных факторов производства становится знания. Поэтому нередко понятия информационного общества и общества знаний трактуются как эквивалентные. Принцип функционирования экономики знаний состоит в непрерывной генерации инноваций, т.е. преобразовании новых знаний и технологий в новые товары, услуги и *стратегии управления*, направленные на повышение качества жизни.

Знания принято рассматривать как продукт мыслительной деятельности человека по проникновению его в суть явлений окружающего мира. Они, безусловно, составляют основу формирования и развития человеческого капитала. Сегодня на первый план выдвигается проблема эффективной генерации новых знаний. Для корректной постановки и полноценного решения этой проблемы необходима разработка фундаментальной теоретической базы новой парадигмы развития общества.

Очевидно, что понятие «знания» имеет глубокую связь с таким фундаментальным понятием, как «информация». В настоящее время термин «информация» используется практически во всех областях человеческой деятельности, неся при этом чрезвычайно широкий спектр смыслового содержания и разнообразие трактовок.

Существует множество (по различным данным от 300 до 500) определений феномена информации, и вряд ли можно ожидать, что в обозримом будущем будет принято некое каноническое определение, тем более что, по мере развития общества, выявляются все новые аспекты интерпретации и понимания этого чрезвычайно дискуссионного понятия.

Особо следует отметить, что по мере развития информационно-коммуникационных технологий и глобальной информатизации общества все более очевидным становится следующий факт: циркулирующие в обществе, в частности в средствах массовой коммуникации сведения, которые принято называть информацией, содержат в общем случае три составляющие: собственно информацию (достоверные сведения), дезинформацию и информационный шум. С экономической (и не только) точки зрения эти составляющие обладают совершенно разной ценностью. Поэтому их использование по конкретному назначению будет с очевидностью приводить к разным результатам.

Совершенно очевидно, что в отличие от информации, по определению снимающей неопределенность, сведения, несущие дезинформацию и информационный шум, только повышают и без того высокий уровень неопределенности в обществе.

Проблему усугубляет разнообразие зачастую противоречивых трактовок многих других понятий, неотъемлемо связанных с феноменом информации, в том числе публикуемых в научной литературе. Это означает, что для понятийного аппарата на стыке теории информации, теории принятия решений, теории информационных процессов, теории эффективности и ряда смежных прикладных дисциплин характерна существенная степень неопределенности, что отнюдь не способствует подготовке по-настоящему квалифицированных специалистов.

Ситуацию принятия решения в условиях неопределенности, на наш взгляд, можно ассоциировать с фундаментальной неупорядоченностью природы, заложенной в ее принципом неопределенности квантовой механики.

Согласно этому принципу у квантовой системы (частицы) отсутствует определенная траектория (копенгагенская интерпретация квантовой механики). Альтернативная трактовка, напротив, предполагает наличие сколь угодно большого количества траекторий, вероятности реализации которых лежат в чрезвычайно широком интервале значений (так называемая сумма по историям).

Подобным же двояким образом можно трактовать ситуацию неопределенности относительно структуры и поведения априори неизвестной наблюдателю макроскопической системы (объекта познаваемого материального мира). Действительно, познающий субъект априори

может говорить об отсутствии у него какой-либо модели такой системы, но, с другой стороны, это означает, что, в принципе, может быть принято к рассмотрению сколь угодно большое количество альтернативных пробных моделей (гипотез) для описания этой системы.

Развивая эту аналогию, можно утверждать, что что априорная сложность познавательной задачи отражает неопределенность относительно искомого полного и точного описания (моделирования) структуры и поведения исследуемого объекта. Для снятия этой неопределенности необходим некоторый (нередко весьма продолжительный) промежуток времени. Дело в том, что генеральное множество альтернативных гипотез должно, как известно, непременно содержать оптимальную (ключевую) гипотезу, которая нередко длительное время находится «за пределами досягаемости». Сошлемся, в частности, на историю открытия и объяснения природы фотозефекта.

Поэтому можно утверждать, что чем меньше промежуток времени исследования, тем большая остаточная неопределенность, т.е. тем меньшей точностью будет обладать синтезируемая наблюдателем модель исследуемого объекта. Аналогия с одним из основных соотношений неопределенности Гейзенберга (промежуток времени — точность измерения энергии) выглядит вполне уместной.

Приведенные аналогии, на наш взгляд, не зависят от природы неопределенности и могут представлять интерес с точки зрения дальнейшего развития теории и методологии принятия решения в условиях риска и неопределенности. Практика применения системного анализа демонстрирует широкий круг оптимизационных задач, при решении которых принципиально невозможно одновременно улучшать две неоднородно связанные характеристики системы.

может говорить об отсутствии у него какой-либо модели такой системы, но, с другой стороны, это означает, что, в принципе, может быть принято к рассмотрению сколь угодно большое количество альтернативных пробных моделей (гипотез) для описания этой системы.

Развивая эту аналогию, можно утверждать, что что априорная сложность познавательной задачи отражает неопределенность относительно искомого полного и точного описания (моделирования) структуры и поведения исследуемого объекта. Для снятия этой неопределенности необходим некоторый (нередко весьма продолжительный) промежуток времени. Дело в том, что генеральное множество альтернативных гипотез должно, как известно, непременно содержать оптимальную (ключевую) гипотезу, которая нередко длительное время находится «за пределами досягаемости». Сошлемся, в частности, на историю открытия и объяснения природы фотозефекта.

Поэтому можно утверждать, что чем меньше промежуток времени исследования, тем большая остаточная неопределенность, т.е. тем меньшей точностью будет обладать синтезируемая наблюдателем модель исследуемого объекта. Аналогия с одним из основных соотношений неопределенности Гейзенберга (промежуток времени — точность измерения энергии) выглядит вполне уместной.

Приведенные аналогии, на наш взгляд, не зависят от природы неопределенности и могут представлять интерес с точки зрения дальнейшего развития теории и методологии принятия решения в условиях риска и неопределенности. Практика применения системного анализа демонстрирует широкий круг оптимизационных задач, при решении которых принципиально невозможно одновременно улучшать две неоднородно связанные характеристики системы.

С другой стороны, стало очевидным, что все устанавливаемые наукой законы в той или иной степени неточны и имеют ограниченную область применения, т.е. дают приближенную модель познаваемой реальности. Следовательно, для описания, объяснения и предсказания поведения сложных систем необходима разработка все более сложных моделей, что, естественно, связано с необходимостью преодоления нелинейно возрастающих вычислительных трудностей и затрат времени.

Выход из этого тупика наметился благодаря системному подходу — методологии научного познания и социальной практики, в основу которой было положено исследование объектов природы, техники, общества и мышления как систем, т.е. единства многообразия как целого.

Классическая наука использовала понятие системы и сформулировала основные законы движения и тяготения материи, введя фундаментальное понятие *системы отсчета*. Ее наиболее общие положения — закон сохранения энергии и закон увеличения энтропии (второе начало термодинамики) базируются на понятии *изолированной системы*. В такой системе самопроизвольный процесс, протекающий при постоянной энергии, необратимо приводит ее в равновесное, предельно неупорядоченное (хаотическое) состояние. Энтропия, как известно, служит мерой неупорядоченности и тем самым отражает степень необратимого уменьшения *упорядоченной сложности* изолированных систем. Это обстоятельство и предопределило в дальнейшем важнейшую роль понятия энтропии в теории информации и в теории систем в целом.

Поворот науки XX века к исследованию открытых неравновесных систем, в частности биологических и технических, ознаменовался становлением таких принципиально новых отраслей науки, как синергетика (теория самоорганизации) и кибернетика (теория управления), приспособленных для исследования сложных систем. Стало реальным решение проблемы описания, объяснения и предсказания поведения сложных и очень сложных систем.

Определим понятие *сложности*, следуя А. Н. Колмогорову:

- сложный объект можно закодировать некоторым сообщением, в частности последовательностью нулей и единиц;
- тогда сложность определяется как минимальное количество таких двоичных знаков, содержащее всю информацию об объекте, достаточную для воспроизведения (декодирования);
- другими словами, сложность есть выраженная в битах длина самой экономной программы, порождающей последовательность двоичных знаков, описывающих объект.

Так вводится понятие дескриптивной или описательной сложности, отражающее наше естественное понимание того, что чем сложнее объект

(система), тем больше должен быть объем информации, необходимой для его исчерпывающего и неизбыточного описания, т.е. для снятия начальной (априорной) неопределенности относительно этого структуры и поведения этого объекта.

1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Начнем с того, что базовому понятию «система» соответствует множество определений, предлагаемых и используемых в специальной литературе по теории систем и системному анализу, а также многих смежных дисциплин. Отметим, что это обстоятельство обусловлено именно тем, что *одной* системе можно поставить в соответствие множество моделей, отражающих те или иные аспекты ее *поведения*, т.е. происходящих с ней изменений.

Общепринятый термин «система» происходит от греческого *σύστημα* — целое, составленное из частей, соединение. Мы будем использовать в качестве исходного определения этого понятия следующее: *система есть упорядоченное множество взаимодействующих элементов, образующих целостное единство*. Нередко говорят о том, что элементы системы находятся в связи или отношениях между собой. В любом случае совокупность элементов и их связей образует *структур*у системы, в то время как совокупность элементов — только ее состав.

Для более полного определения обратимся к формулировке создателя теории самоорганизации нобелевского лауреата И. Р. Пригожина: система — это *целостность, определяемая ее составом, отношением с окружающей средой, взаимодействиями между компонентами и теми следствиями, к которым приводят эти взаимодействия*.

Итак, для definиции понятия системы с необходимостью потребовалось привлечь понятие *элемента*. Элемент (от латинского *elementum* — первоначальное вещество) в наиболее общем понимании означает составную часть сложного целого. Наряду с этим понятие элементарного отражает предел познания микроструктуры материи, достигнутый естественными науками на каждом этапе своего развития. Поэтому в теории систем и системном анализе под элементом понимается *компонент* системы, дальнейшее дробление (декомпозиция) которого невозможно либо нецелесообразно. Последнее ограничение относится к проблеме исследования сложных систем, обладающих глубокой иерархией.

Коль скоро в сложных системах различается множество уровней иерархии, следует ввести также понятие *подсистемы* — компонента системы, обладающего *определенной самостоятельностью* и допускающего дальнейшую декомпозицию, т.е. *расчленение на элементы*.

Таким образом, любая система включает в себя взаимодействующие подсистемы (элементы) и сама является подсистемой (элементом) систем более высокого уровня иерархии. Последние играют для нее роль *внешней среды*, взаимодействие с которой определяет *поведение* системы и ее *функционирование*. Различие двух этих понятий обусловлено существованием двух основных подходов к исследованию систем любой природы: поведенческого и функционального.

Поведенческий анализ систем состоит в рассмотрении их выходных переменных (характеристик) и их связи с входными воздействиями. При этом вводятся понятия *вход* и *выход* системы. Входом называется любое внешнее по отношению к системе событие, изменяющее ее любым образом. Выходом называется любое изменение, производимое системой во внешней среде. Поведенческий подход никоим образом не связан с рассмотрением структуры системы, ее внутренней организации, задача состоит в выяснении того, как ведет себя система, взаимодействуя с внешней средой.

Функциональный анализ сосредоточивает внимание как раз на внутренней организации системы, ее структуре и свойствах, уделяя второстепенное внимание отношениям системы с внешней (окружающей) средой. В нем процессы, происходящие в системе, рассматриваются с позиций структурно-расщепленной целостности, в которой каждый элемент структуры выполняет определенную функцию. Понятие *функции* здесь и далее используется в двух смыслах. Во-первых, в смысле предназначения каждого элемента по отношению к другим элементам или к системе в целом; во-вторых, в смысле проявления той или иной зависимости, когда изменения характеристик одного элемента (подсистемы) являются функцией от изменений в других элементах системы.

К основным функциям систем принято относить обеспечение интегративности (целостности), адаптируемости к условиям среды, достижения целевого эффекта и разрешения внутренних противоречий.

Подчеркнем, что в рамках поведенческого анализа исследуемая система рассматривается как «черный ящик» — так в теории систем называется любая система (устройство), которая выполняет наблюдаемые операции над входами и выходами (откликается на входные воздействия определенными выходами), но структура, обеспечивающая выполнение этих операций (функций), остается неизвестной. Функциональную зависимость выходных сигналов системы от входных (управляющих) воздействий принято называть *законом функционирования системы*.

Задача системного исследования, решаемая в рамках функционального подхода, как раз и состоит в том, чтобы сделать «черный ящик»,

образно говоря, «прозрачным», т.е. из множества возможных альтернативных способов реализации закона его функционирования выявить единственный реально действующий алгоритм, однозначно обусловленный конкретной внутренней структурой.

Решение этой задачи и будет означать установление *алгоритма функционирования системы*.

В теории систем и системном анализе рассматриваются в первую очередь *целенаправленные* системы. Понятие цели поэтому является крайне важным: с определения цели, стоящей перед системой, т.е. *целеполагания*, начинается любой этап системного исследования, будь это анализ или синтез. Цель в человеческом обществе формулируется при возникновении определенной *потребности* и представляет собой некоторую идеальную модель *будущего*, которая корректируется в ходе ее достижения.

Определим цель как модель (*проект*) *действия, определяющую характер и системную упорядоченность операций и алгоритмов, выбираемых на множестве альтернатив*. Иными словами, цель — ситуация или область ситуаций, которая должна быть достигнута при функционировании системы за определенный промежуток времени. Речь, таким образом, идет об оптимальном варианте практической реализации мыслимой идеальной модели с учетом принципиально ограниченных ресурсов и времени, а также ограничений, накладываемых условиями окружающей среды.

Оптимальным будем называть наилучший результат (выбор), который может быть достигнут при действующих условиях и ограничениях. *Оптимизация* означает выбор системы с экстремальными значениями ее существенных *характеристик*, отражающих *свойства* системы.

Характеристику системы y_j принято задавать кортежем $y_j = \langle \text{name}, \{\text{value}\} \rangle$, где *name* — имя j -ой характеристики, *{value}* — область ее допустимых значений. В зависимости от вида отношений характеристик на множество их значений их разделяют на два класса: количественные и качественные. Если на множество значений характеристик заданы *метризованные отношения*, т.е. указана степень их количественных соотношений (на сколько градаций измерительной шкалы или во сколько раз одно значение превосходит другое), то характеристика является количественной. Такая характеристика называется *параметром*. Если же область значений не метризована, то характеристика называется качественной.

Одной из важных задач системного анализа является сравнение качественных характеристик систем посредством установления порядка их

предпочтительности. Для этого используются качественные (ранговые) шкалы измерения.

Поскольку характеристики отражают свойства системы (элемента), они являются зависимыми переменными. Выходные характеристики, отражающие *внешние* свойства системы, они проявляются при ее взаимодействии с объектами окружающей среды. Что же касается *внутренних* свойств, то они проявляются в форме переменных состояния системы z , обусловленных взаимодействием ее элементов, и задают ее *внешние* свойства.

Внешние свойства, как правило, доступны непосредственному наблюдению, в то время как внутренние свойства формируются (конструируются) в сознании исследователя логически и в большинстве случаев недоступны наблюдению. Подчеркнем, что важнейшей целью анализа системы является выявление ее внутренних свойств и их характеристик, поскольку именно они определяют поведение системы.

Характеристику, отражающую качество системы или эффективность ее функционирования, будем называть *показателем*. Показатели качества или эффективности делятся на частные, отражающие определенные существенные свойства системы, и обобщенные, объединяющие совокупность свойств системы как целого.

Определим *качество* как совокупность существенных свойств системы, обуславливающих ее пригодность для использования по назначению, а *эффективность* — как степень ее приспособленности к достижению цели системы. Эффективность проявляется и может быть оценена исключительно в процессе функционирования системы и зависит не только от качества системы, но и от способа ее применения и условий (воздействий) внешней среды.

Процессом называется множество состояний системы $\{z\}$, упорядоченное по изменению какого-либо параметра t , определяющего свойства системы. Как правило, в качестве такого параметра выступает время. Совокупность всех возможных состояний принято называть *пространством состояний* системы, а множество значений параметра t — *параметрическим пространством*.

Состояние системы — это множество значений характеристик, отражающих ее внутренние свойства в конкретный момент времени (при определенном значении параметра t). Формально состояние системы в момент времени t полностью определяется ее начальным состоянием в момент времени t_0 , всеми входными воздействиями, внутренними параметрами и воздействиями внешней среды, которые имели место за промежуток времени $t - t_0$.

Одновременное рассмотрение состояний исследуемой системы и окружающей среды требует введения еще двух понятий. Ситуацией будем называть состояние системы и внешней среды в один и тот же момент времени, а проблемой — противоречие (несоответствие) между достигнутым и требуемым состояниями системы при существующем состоянии среды.

Приведенные определения далеко не исчерпывают тезаурус теории систем, поэтому в дальнейшем необходимые понятия будут последовательно вводиться в ходе изложения материала.

1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ

Понятие системы применимо к практически неограниченному множеству объектов природы, техники, общества и мышления. Поэтому возникает необходимость упорядочения этого множества путем выделения в нем основных подмножеств (классов) по определенным признакам. Задача классификации состоит в отнесении конкретного объекта к одному из заданных классов. Для задания классов используется два принципа классификации: принцип разбиения и принцип покрытия.

Формально принцип разбиения состоит в том, что исходное множество A разделяется на непересекающиеся подмножества A_1, A_2, \dots, A_n , называемые *классами эквивалентности*, так, что

$$A = \cup A_i \text{ и } A_i \cap A_j = \emptyset. \quad (1.1)$$

Принцип покрытия состоит в разбиении исходного множества на пересекающиеся подмножества, именуемые *классами поларности*:

$$A_i \cap A_j \neq \emptyset. \quad (1.2)$$

Поскольку в общем случае принято разделять системы на пары подмножеств по противоположным проявлениям определенного признака, то мы будем иметь дело, как правило, с классами эквивалентности.

В качестве признаков классификации ограничимся следующими категориями: природа систем, их происхождение, структура, поведение, характер отношения с внешней средой, степень сложности. При необходимости перечень существенных признаков систем может быть расширен. Зададим классы в компактной форме в виде таблицы:

Основные классы систем

Признак классификации	Классы эквивалентности систем	
Природа	Материальные	Абстрактные
Происхождение	Естественные	Искусственные
Структура	Дискретные	Непрерывные
Процесс	Статические	Динамические
Поведение	Детерминированные	Стохастические
Отношение со средой	Открытые	Изолированные
Степень сложности	Простые	Сложные
Организация	Технические	Организационные
Гибкость	Жесткие	Адаптивные

Разграничение систем на *материальные (физические)* и *абстрактные* позволяет различать реальные объекты и процессы и системы, представляющие собой модели (отображения в сознании) реальных объектов и процессов. Отметим, что любая материальная система может быть отображена множеством абстрактных систем (моделей), отличаемых по цели моделирования, степени точности, наглядности и другим признакам.

Деление систем по происхождению на *естественные (природные)* и *искусственные* связано с тем, что природные системы являются продуктом естественного отбора (эволюции материи), в то время как искусственные системы (и материальные, и абстрактные) создаются человеком в ходе искусственного отбора сознательно и с определенной целью.

При этом отбор производится по определенным критериям из множества альтернативных вариантов с использованием логических, расчетных и эвристических процедур. Как видим, в зависимости от выбранного признака классификации системы, ранее отнесенные к одному классу, могут оказаться в разных классах. В частности, материальные системы по своему происхождению могут быть как естественными, так и искусственными.

Рассмотрение *непрерывных* и *дискретных* систем имеет два аспекта. Во-первых, в части представления внутренней структуры материальных объектов. Классическая наука, как известно, строила макроскопические модели объектов и процессов, абстрагируясь от их внутренней структуры, т.е. считая их непрерывными. На самом же деле, как показывает современная наука, материя на уровне своей микроструктуры дискретна: вещество и излучение состоят из отдельных частиц, а энергия квантуется, т.е. изменяется порциями. Поэтому, в зависимости от задачи исследования, система при анализе ее структуры может быть представлена либо непрерывной, либо дискретной моделью.

Во-вторых, деление систем на непрерывные и дискретные проводится в целях выбора математического аппарата моделирования. Для процессов изменения входов, выходов и состояний системы, которые можно считать непрерывными, прекрасно подходит теория обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных. Однако во многих современных технических системах изменение параметров происходит в дискретные моменты времени, как принято говорить, «от события к событию». Такие процессы не поддаются привычному для нас аналитическому описанию, поэтому вместо аналитических моделей привлекаются имитационные, дискретно-событийные модели, теоретико-множественные, графические и другие представления.

Рассмотрение объекта как динамической системы требует различия типа ее поведения. *Детерминированной* называется система, каждое состояние которой однозначно определяет, т.е. делает единственно возможным ее последующее состояние. Иными словами, изменения (поведение) детерминированной системы регуляры и воспроизводимы. Соответственно *стохастической* будем называть систему, в поведении которой присутствуют случайные события, поэтому ее переход в следующее состояние — неоднозначен: объективно существуют альтернативные (взаимоисключающие) пути перехода в новое состояние.

Признаком, по которому определяется *открытая* система, является взаимодействие с окружающей средой, которая генерирует неуправляемые входные сигналы. Это приводит к неоднозначности реакции такой системы и порождает проблему предсказуемости ее поведения. Следовательно, открытые системы обладают признаком стохастичности. В отличие от открытых, *изолированные* (закрытые) системы с внешней средой не взаимодействуют, входных сигналов в них не поступает. Поведение изолированной системы однозначно определяется динамикой изменения ее состояний, т.е. является детерминированным.

Поскольку изолированные системы необратимо стремятся к состоянию термодинамического равновесия (к состоянию с максимальной энтропией), то их эволюция направлена к предельной дезорганизации (несупорядоченности) внутренней структуры. Это означает, что их дескриптивная сложность «разрушается» и количество информации в них стремится к нулю. Стого говоря, закон увеличения энтропии выполняется с точностью до флуктуаций (случайных отклонений параметров системы от равновесного значения), поэтому, с учетом микроструктуры, равновесное состояние изолированной системы является для нее наиболее вероятным.

Что же касается открытых систем, то они обладают возможностью использовать ресурсы внешней среды и за их счет не только сохранять,

но и повышать уровень своей упорядоченности, усложняя и оптимизируя свою структуру и алгоритм поведения.

Как уже отмечалось, теория систем и системный анализ формируют методологию исследования сложных систем. Четкой общепринятой грани между сложными и простыми системами в настоящее время не установлено. Однако по совокупности признаков сложную систему можно идентифицировать достаточно уверенно.

Во-первых, сложные системы в наиболее полной мере проявляют свойство *эмержентности* (целостности), которым не обладают ни ее элементы (подсистемы), ни любая их комбинация. Эмерджентность сложной системы означает, что ее позлементное рассмотрение не может дать полного представления относительно ее поведения и возможностей в целом. Иными словами, эмерджентные свойства системы не сводятся к свойствам ее элементов и не выводятся из них.

Во-вторых, сложные системы, как правило, обладают свойством *робастности*, т.е. способностью сохранять частичную работоспособность при выходе из строя отдельных элементов или подсистем. Робастность обусловлена функциональной избыточностью сложных систем. Простые системы функциональной избыточностью не обладают и поэтому могут находиться в одном из двух возможных состояний: работоспособном (исправном) и неработоспособном (нисправном). Отметим, что свойство робастности может быть присуще не только материалным системам искусственного происхождения, но также и природным системам (в первую очередь живым организмам) и системам абстрактным. Так, например, преобразования Лоренца релятивистской механики пригодны для расчета закономерностей движения при любых скоростях, но будучи упрощенными до вида преобразований Галилея, становятся пригодными только для скоростей, существенно меньших скорости света.

В-третьих, для сложной системы характерно наличие *неоднородных* (разных по типу) связей между разнотипными элементами. В сложной системе могут одновременно присутствовать связи структурные, иерархические, функциональные, каузальные (причинно-следственные), ассоциативные, пространственно-временные, информационные и другие. Наличие неоднородных связей отличает сложные системы от систем больших. Последние представляют собой совокупность множества однородных элементов, объединенных связью одного типа.

Здесь следует особо подчеркнуть следующее обстоятельство. Наличие в сложной системе неоднородных связей порождает ситуацию, когда улучшение (оптимизация) одних характеристик системы неизбежно приводит к ухудшению других ее характеристик. Поэтому неоднородные связи принято называть *векторными*.

Нередко в литературе друг другу противопоставляются системы с управлением и без управления. При этом имеется в виду, что искусственные системы отличаются от природных систем наличием цели функционирования (назначением) и осуществлением управления. Однако, по нашему мнению, при более общем взгляде на проблему следует принимать во внимание существование в природе (по крайней мере, в живой природе) эволюционной цели (адаптация с целью выживания, сохранение и усложнение структуры, т.е. самоорганизация) и управления поведением как средства достижения этой цели.

Сошлемся в частности на название основополагающей работы Н. Винера «Управление и связь в живом организме и машине». Связи в природных системах обеспечиваются четырьмя известными фундаментальными взаимодействиями (гравитационным, электромагнитным, сильным и слабым), и пример Солнечной системы демонстрирует управление упорядоченным поведением ее подсистем с помощью однородной связи (гравитационного взаимодействия).

Существуют и другие подходы к классификации систем (по другим признакам или критериям). Так, в частности, применяется классификация систем по виду отображаемого объекта (технические, биологические, социально-экономические и другие системы). Нередко классы эквивалентности выделяются по виду научного направления, используемого для моделирования (математические, физические, химические, термодинамические системы и т.д.). Возможна классификация систем по степени их организованности (хорошо организованные, диффузные и самоорганизующиеся системы).

В последнем случае выделенные классы разграничивают сложные системы по признаку степени полноты информации, которую можно о них получить.

Подчеркнем, что цель любой классификации состоит в ограничении и конкретизации при выборе методов исследования различных систем в зависимости от поставленной задачи. Тот факт, что одна и та же система может быть охарактеризована множеством признаков, свидетельствует о возможности ее отображения множеством моделей.

1.4. ЭМЕРДЖЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ

Мы ввели понятие эмерджентности как свойство систем, не сводимое к свойствам ее элементов и не выводимое из них. «Система это нечто большее, чем сумма ее частей» — это определение приписывают Аристотелю, тем самым характеризуя его как первого в истории системного аналитика.

Действительно, наличие всех необходимых элементов системы недостаточно для того, чтобы выполнялась ее функция. Речь, таким образом, идет о таком кардинальном свойстве системы, как целостность. Согласно одному из распространенных определений система есть сущность, которая в результате взаимодействия ее частей может поддерживать свое существование и функционировать как единое целое. Такое определение акцентирует внимание на трех важных моментах:

- на целостности системы, способной поддерживать свое существование и функционирование;
- на взаимодействии частей как первопричине целостности;
- на проявлении целостности в процессе функционирования.

Под целостностью подразумевается не только внутреннее единство системы, но также и несводимость к совокупности свойств ее элементов и подсистем. Более того, вследствие обеспечения вполне определенных связей при объединении компонентов возникают принципиально новые свойства, которыми не обладали ни элементы, ни подсистемы.

Поскольку эмерджентность проявляется только в целостной системе, следовательно, при декомпозиции системы она не может быть обнаружена. Для того чтобы выявить и идентифицировать эмерджентные свойства, необходимо наблюдать систему в процессе ее функционирования.

Особенность эмерджентных свойств состоит в том, что для их использования необходимо понимать, как в системе обеспечивается их проявление. Можно быть, например, грамотным пользователем компьютера, не имея представления о его программном обеспечении, или, скажем, водить автомобиль, не зная, каким образом выполняются управляющие воздействия.

Очевидно, что вследствие того или иного нарушения целостности эмерджентные свойства исчезают, и только восстановление целостности позволяет их вернуть. Можно говорить, что целостность системы *состоит* в поддержании связей между элементами, но *проявляется* в сохранении эмерджентных свойств.

Важно отметить, что свойство эмерджентности относится как к внутренним, так и к внешним связям системы. Оно возникает и существует благодаря взаимодействию элементов, обусловленному внутренними связями системы. В то же время целостность системы определяет характер ее взаимодействия с внешней средой и реализуется в виде функций системы через внешние связи (входы и выходы системы).

Для поддержания целостности системы в условиях изменяющейся внешней среды и внутренних трансформаций необходима ее специальная организация, обеспечивающая устойчивость системы, т.е. ее способность противостоять возмущениям. Для обозначения устойчивого состояния

используются понятия равновесие и гомеостазис. Можно утверждать, что целостностью обладают именно гомеостатические системы.

Поддержание устойчивого состояния, по сути, и составляет внутреннюю цель системы, в то время как ее внешняя цель достигается во взаимодействии с окружающей средой. Следовательно, организация (структурой) системы должна обеспечивать ей выживание, стабильность в меняющемся окружении, но вместе с тем развитие и эволюцию.

Собственно говоря, эмерджентные свойства и возникают в ходе эволюции системы, когда она, адаптируясь к условиям среды, изменяет свою структуру и поведение. Очевидно, что глобальный эволюционный процесс во Вселенной стал возможным именно благодаря феномену эмерджентности, проявившемуся в длинной цепи качественных изменений природных систем.

Так, образование звезд открыло возможность синтеза ядер атомов, охлаждение расширяющейся материи позволило образоваться электронным оболочкам атомов, что открыло дорогу химической эволюции. Ну а такие эмерджентные свойства приматов, как бипедализм, изготовление орудий, появление речи, создали человека.

Что же касается систем искусственного происхождения, создаваемых человечеством в ходе его биологической и, одновременно, социальной эволюции, то они создавались и создаются именно с целью появления все новых и новых эмерджентных свойств у все более и более сложных систем.

1.5. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СИСТЕМЕ

Понятие *обратной связи* является в теории систем фундаментальным. Без обратной связи существование системы немыслимо, поскольку ее поведение превращается в случайное блуждание, которое рано или поздно оборачивается распадом (гибелью) системы. Наличие обратной связи является необходимым условием управления системой.

Обеспечение в системе контура (петли) обратной связи состоит в подаче выходного сигнала на вход системы. Тем самым открывается возможность сравнения состояния системы с *требуемым состоянием* для определения отклонения от этого состояния и формирования (выбора) управляемого воздействия, компенсирующего это отклонение.

Если система изолирована от воздействий окружающей среды, то регуляриро поступающие по контуру обратной связи на вход сведения о состоянии системы оказываются вполне достаточными для ее устойчивого функционирования при условии достаточности необходимых ресурсов.

Ясно, однако, что для функционирования открытых систем сведений об их внутреннем состоянии будет недостаточно для выбора оптимальных или близких к оптимальным управляемых воздействий. Необходимо поступление сведений о *ситуации* в целом, т.е. о состоянии самой системы и окружающей среды (обстановки).

Словосочетание «обратная связь» нередко используется для обозначения любой реакции системы на внешнее воздействие, однако на самом деле речь идет о восприятии результата воздействий на систему с целью выбора последующих воздействий. Иными словами, обратная связь реализуется только в замкнутом контуре.

Итак, наличие обратных связей представляет собой неотъемлемое свойство систем: их отсутствие означает отсутствие системы как таковой. Все множество проявлений обратных связей сводится к двум их основным типам:

- *Уравновешивающая* (балансирующая) обратная связь, при которой появление различия между требуемым (желаемым) состоянием системы и ее реальным состоянием служит сигналом для движения в сторону устранения этого различия.
- *Усиливающая* обратная связь, при которой изменение состояния системы служит сигналом для наращивания этого изменения.

Начнем с рассмотрения уравновешивающей обратной связи. Ее часто называют «отрицательной», но такое название может ввести в заблуждение по двум причинам. Во-первых, оно придает определению негативный оттенок, во-вторых такую связь нередко отождествляют с критикой. На самом деле, с точки зрения целеполагания такая обратная связь может приводить как к положительным, так и к отрицательным результатам.

Можно предположить, что это название укоренилось в связи с тем, что наиболее часто уравновешивающая обратная связь реализуется при решении задач *стабилизации*, когда изменение состояния системы служит сигналом для ее движения в *противоположном* направлении (изменение знака отклонения на противоположный), чтобы восстановить утраченное равновесие. Такая форма обратной связи позволяет системе противостоять переменам и поддерживать стабильное состояние.

Следует, однако, подчеркнуть, что действие уравновешивающей обратной связи отнюдь не ограничено выполнением задач стабилизации. Она используется всякий раз, когда в очередном цикле управления систему (объект управления) надлежит перевести в новое требуемое состояние (задачи обучения, выполнения программы, удержания системы на заданной траектории, перевода системы в состояние с оптимальными значениями характеристик).

Множество уравновешивающих обратных связей, например, действует в нашем организме, обеспечивая нам гомеостазис — неизменные значения существенных для жизни параметров: температуры, кровяного давления, частоты сердечных сокращений и т.п.

Огромное количество уравновешивающих обратных связей поддерживает равновесие в природе. Так, хищники сдерживают рост численности травоядных животных, обеспечивая механизм уравновешивающей обратной связи. Однако и травоядные, будучи пищевым ресурсом хищников, регулируют численность их популяции. В результате поддерживается баланс в экосистеме, поскольку неограниченный рост численности популяций травоядных неизбежно приведет к катастрофической для них нехватке продовольственных ресурсов экосистемы.

Можно было бы привести десятки и сотни примеров действия уравновешивающей обратной связи в окружающем нас мире, но вывод будет один: без механизмов уравновешивающей обратной связи не смогли бы существовать ни мы, ни экосистемы, ни человеческое общество.

Другая сторона действия уравновешивающей обратной связи проявляется тогда, когда поставленная цель состоит в том, чтобы существенно изменить систему. Тогда она начинает играть роль силы сопротивления.

В этом состоит извечная проблема реформ, в том числе политических и государственных, когда предполагаемый исполнитель программы реформ — огромный бюрократический аппарат — всемерно блокирует благие намерения реформаторов. Причина проста: цели реформаторов и цели чиновничества никоим образом не совпадают.

Перейдем к рассмотрению усиливающей обратной связи. Ее зачастую называют «положительной», что создает впечатление, что с ее действием связаны непременно позитивные результаты. На самом деле связь такого типа может быть как весьма полезной, так и иметь катастрофические последствия. Можно сказать, что усиливающая обратная связь упорно толкает систему по выбранному пути.

Простым, но весьма убедительным примером усиливающей обратной связи является банковский депозит. Если мы положили на счет, скажем, 100 тысяч рублей под 10% годовых с ежегодной пролонгацией, то через год сумма вырастет до 110 тысяч. Еще через год сумма на счете составит 121 тысячу рублей. Через семь лет сумма на счете удвоится и будет удваиваться каждые семь лет. Обратим внимание на то, что если за первые семь лет на счете прибавилось 100 тысяч рублей, то за вторую семилетку мы станем богаче уже на 200 тысяч.

При отсутствии ограничений усиливающая обратная связь порождает экспоненциальный рост, при котором прирост пропорционален ранее достигнутому результату, а время удвоения количественного

показателя роста остается постоянным. Для экспоненциального роста характерно достаточно медленное начало процесса и все более быстрый рост с течением времени (медленно запрягаем, но быстро ездим). Если ограничения по-прежнему отсутствуют, то рост принимает неограниченный характер, однако рано или поздно в игру вступят ограничения и рост резко затормозится.

Яркий пример усиливающей обратной связи демонстрирует известная легенда о скромной, на первый взгляд, награде, которую попросил у своего правителя изобретатель шахмат. Помните — одно зерно на первую клетку шахматной доски, два — на вторую, четыре — на третью и так далее, вдвое больше на каждую последующую. Казалось бы — какие проблемы? Но на двадцать первой клетке будет уже миллион зерен, а для шестьдесят четвертой — не хватило бы мировых запасов зерна!

Как видим, усиливающая обратная связь способствует ускоренному движению системы в том направлении, куда ее сдвинуло первоначальное отклонение. Если речь идет об изменении в желательном (благоприятном) направлении, то это дает существенное преимущество даже по сравнению с линейным ростом. Но представим себе развитие ситуации, если первоначальное отклонение окажется направленным в нежелательную сторону. Тогда усиливающая обратная связь «включает» движение по порочному кругу.

Хорошим примером служит ситуация, когда отношения с банком строятся на другой основе: мы взяли кредит. Долг величиной в 100 тысяч рублей по кредиту с годовой ставкой 20% увеличится до 120 тысяч до конца первого года и до 144 тысяч — к концу второго. Долг удвоится уже через четыре года и еще раз — за следующие четыре года.

В реальных условиях функционирования, развития и эволюции сложных систем усиливающая обратная связь не обязательно ведет к экспоненциальному росту, но во всех случаях она усиливает изменения в том направлении, куда ее сдвинула исходная флуктуация.

Мы уже обсуждали действие уравновешивающей обратной связи в живой природе, когда популяции хищников и их жертв регулируют численность друг друга, которая балансирует вблизи оптимальных для экосистемы значений. Но нарушение природного баланса может запустить петлю усиливающей обратной связи. Так, при искусственном сокращении численности хищников вследствие усиленной охоты на них, популяция травоядных начинает неограниченно расти до тех пор, пока не включится петля уравновешивающей обратной связи вследствие исчерпания пищевых ресурсов экосистемы, и нередко происходит массовая гибель травоядных от голода.

Известен печальный опыт интродукции (искусственного заселения) кроликов в Австралии, где они, не имея природных врагов, непомерно размножились, а завезенные для борьбы с ними лисы нашли более привлекательный пищевой ресурс в лице местных сумчатых.

Как видим, в сложных системах может быть задействовано много обратных связей, которые оказывают друг на друга взаимное влияние и могут переключать системы с одного типа поведения на другой.

1.6. ФЕНОМЕН УПРЕЖДАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Человеческий индивид, безусловно, представляет собой чрезвычайно сложную систему. Неизмеримо более сложной системой является человеческое общество — социум. В его жизнедеятельности особую роль играет стремление людей предвосхищать будущее. Недаром триаду функций научного познания венчает предсказательная (прогнозная) функция, самая сложная с точки зрения снимаемой неопределенности. Людей во все времена интриговали и продолжают интриговать сегодня заявления всевозможных предсказателей, ясновидцев и прочих магов и колдунов, ибо они претендуют на предсказание будущего. И им хочется верить, поскольку они *aприори* как бы снимают неопределенность завтрашнего дня. Правда, чтобы привлечь к себе внимание, им приходится «предсказывать» конец света, войну, денежную реформу, дефолт и прочие ужасы. Кому же будет интересно твое пророчество, если ты предскажешь «отсутствие новостей»?

Немаловажное значение здесь имеет наша *психологическая потребность* быть «уверенными в завтрашнем дне». Завтра должно быть, по крайней мере, не хуже, чем вчера, с такой верой живет человек. Всем хочется перманентного спокойствия и благополучия, но все знают, что время от времени кризисы все-таки случаются. И люди стараются сохранять бдительность, прислушиваясь к слухам.

Например, ходят слухи, что акции некоторых компаний будут расти. На самом деле ничего не происходит, однако слухи привлекают покупателей. Курс акций идет вверх, и чем он выше, тем больше становится покупателей. Так слухи оказываются *сбывающимися пророчествами*. Через некоторое время рыночные аналитики объявляют через средства массовой коммуникации, что курс акций завышен, и владельцы акций спешат их продать. Естественно, курс падает и даже «проскакивает» первоначальный уровень. И вновь пророчество сбывается.

Теперь представим себе, что в обществе активно муссируются слухи о том, что у банков не хватает денег. В какой-то момент вкладчики

не выдержат и бросятся спасать свои сбережения. Но денег на всех никак не может хватить, таков принцип работы банковской системы. Массовая паника не заставит себя ждать, и слухи сбудутся. Если не будут предприняты решительные действия, то усиливающая обратная связь приведет к самым печальным последствиям.

Аналогичным образом срабатывают прогнозы грядущего дефицита. Услышав, что определенный товар исчезнет из продажи, и поверив в это, люди купят его «про запас» гораздо больше, чем обычно. Так, стараясь защитится от дефицита, мы этот дефицит создаем. Бесперебойное снабжение товарами с точки зрения экономической целесообразности ориентировано на средний уровень потребления. И если спрос принимает ажиотажный характер, то дефицит гарантирован. Для включения уравновешивающей петли приходится на определенный период увеличить товарные запасы до уровня возникшего спроса.

Слухи могут быть абсолютно беспочвенными, пророчество — ложным, но оно сбудется, если люди поверят в него и будут действовать *соответствующим образом*.

В некоторых случаях упреждающая обратная связь может нарушить ожидаемый ход событий. Целеустремленный и самолюбивый человек может отреагировать на предсказание, казалось бы, неизбежной неудачи мобилизацией скрытых ресурсов и опровергнуть неблагоприятный прогноз. Такие случаи, например, нередки в спорте.

Как видим, наши мысли и действия могут помочь нам сделать наше будущее таким, каким мы хотели бы его видеть. Мы действительно способны своими убеждениями формировать свое будущее.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте определение понятия «система».
2. Какие типы систем вам известны?
3. Какими признаками характеризуются сложные системы?
4. Как можно охарактеризовать элемент системы?
5. Что представляют собой подсистема и надсистема?
6. Дайте определение процесса.
7. В чем состоит процесс функционирования системы?
8. Дайте определение структуры системы.
9. Что такое «черный ящик»?
10. В чем состоит закон функционирования системы?
11. Как выявляется алгоритм функционирования системы?
12. Можно ли успешно управлять «черным ящиком»?

не выдержат и бросятся спасать свои сбережения. Но денег на всех никак не может хватить, таков принцип работы банковской системы. Массовая паника не заставит себя ждать, и слухи сбудутся. Если не будут предприняты решительные действия, то усиливающая обратная связь приведет к самым печальным последствиям.

Аналогичным образом срабатывают прогнозы грядущего дефицита. Услышав, что определенный товар исчезнет из продажи, и поверив в это, люди купят его «про запас» гораздо больше, чем обычно. Так, стараясь защитится от дефицита, мы этот дефицит создаем. Бесперебойное снабжение товарами с точки зрения экономической целесообразности ориентировано на средний уровень потребления. И если спрос принимает ажиотажный характер, то дефицит гарантирован. Для включения уравновешивающей петли приходится на определенный период увеличить товарные запасы до уровня возникшего спроса.

Слухи могут быть абсолютно беспочвенными, пророчество — ложным, но оно сбудется, если люди поверят в него и будут действовать *соответствующим образом*.

В некоторых случаях упреждающая обратная связь может нарушить ожидаемый ход событий. Целеустремленный и самолюбивый человек может отреагировать на предсказание, казалось бы, неизбежной неудачи мобилизацией скрытых ресурсов и опровергнуть неблагоприятный прогноз. Такие случаи, например, нередки в спорте.

Как видим, наши мысли и действия могут помочь нам сделать наше будущее таким, каким мы хотели бы его видеть. Мы действительно способны своими убеждениями формировать свое будущее.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте определение понятия «система».
2. Какие типы систем вам известны?
3. Какими признаками характеризуются сложные системы?
4. Как можно охарактеризовать элемент системы?
5. Что представляют собой подсистема и надсистема?
6. Дайте определение процесса.
7. В чем состоит процесс функционирования системы?
8. Дайте определение структуры системы.
9. Что такое «черный ящик»?
10. В чем состоит закон функционирования системы?
11. Как выявляется алгоритм функционирования системы?
12. Можно ли успешно управлять «черным ящиком»?

ГЛАВА 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

2.1. МЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Системный подход и порождаемое им системное мышление направлены, в первую очередь, на преодоление стереотипов *обыденного мышления*. Дело в том, что любая деятельность человека отталкивается от глубоко укоренившихся в его сознании способов понимания действительности и признания смысла жизненному опыту. Так возникают руководящие идеи и стратегии нашего поведения. Их принято называть *ментальными моделями*, поскольку они существуют в сознании и отображают в нем наше естественное видение мира.

Формирование ментальных моделей является совершенно естественным и неизбежным процессом, поскольку без моделирования в сознании окружающего мира человек не мог бы существовать. Ментальные модели есть у каждого, сознает он это или нет, и каждый истолковывает свой опыт, руководствуясь своими личными ментальными моделями. Приобретая новый опыт, мы трансформируем и развиваем свои ментальные модели, а также создаем новые.

Однако ментальные модели отражают не столько объективную реальность, сколько наши представления о ней, зафиксированные прежним опытом. Наше моделирование реальности обусловлено присущим человеку способом видения и интерпретации того, что мы видим. Приходя в этот мир, мы не располагаем никакими моделями, но у нас есть способность их создавать на основе *индивидуального опыта*. Разные люди, проходя через одни и те же жизненные ситуации, придают полученному жизненному опыту свой собственный смысл.

Кроме личного опыта материал для ментальных моделей черпается из общественных норм поведения, культурных традиций, наконец, из убеждений наших родителей и учителей, но в пору зрелости человек все больше руководствуется собственным опытом. Поэтому не удивительно, что наши ментальные модели оказываются в той или иной степени неадекватными реальности.

Действительно, наше восприятие действует избирательно в зависимости от настроения, интересов, целей. Одни факты и сведения отбираются, другие — отбрасываются как несущественные. Нередко мы «вычеркиваем» то, что противоречит нашим ментальным моделям, стремясь сохранить их в неизменном виде. С другой стороны, мы «додумываем» то, чего на самом деле не было. Особенно часто мы прибегаем к такому *конструированию* в условиях неопределенности, поспешно выбирая знакомый вариант объяснения. Тем не менее в этом тоже есть определенный смысл, поскольку лучше иметь неадекватную модель, чем не иметь никакой.

Еще одна причина несоответствия ментальных моделей реальности состоит в неумышленном *искажении* действительности, когда придаем преувеличенный смысл одним фактам и преуменьшаем роль других. Наконец, самой существенной причиной является стремление к *обобщению*. Обобщение играет ключевую роль в процессе познания, недаром мы говорим, что наука обобщает человеческий опыт, строит теории (модели), обладающие все более высокой степенью общности. Но даже научные модели, как мы знаем, в той или иной степени неточны.

Когда мы говорим «всегда», «все», «каждый», «никто», «никогда», мы обобщаем. Опасность применения обобщения состоит в том, что оно может основываться на нехарактерных случаях, в которых по той или иной причине усматривается типичное явление. В таких случаях ментальная модель заставляет игнорировать действительность, что отнюдь не способствует благоприятному развитию событий.

С позиций системного подхода важно понимать, каким образом наше восприятие образует стабилизирующую обратную связь, которая поддерживает ментальные модели, не позволяя распасться нашей системе убеждений. Но, пожалуй, еще важнее увидеть, в чем они нас ограничивают, закрепощая наше творческое мышление. Мы в состоянии формировать реалистичные и полезные ментальные модели, рассматривая их как систему и *сознательно* принимая решение о том, какими моделями мы будем руководствоваться впредь, вместо нынешних. А это означает, что, переходя целиком на позиции системного подхода, мы выбираем научно обоснованное моделирование мира систем, подсистемами которого являемся мы сами.

2.2. ОТБРАЖЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМ

Одним из фундаментальных понятий теории систем является понятие *изменения*. Оно, в свою очередь, порождает понятия *множества* и *разнообразия*. Описать поведение системы означает описать происходящие с ней изменения. Изменение состояния системы — это множество

переходов из одного состояния в другое. Множество таких переходов при отображении системы будем называть *преобразованием*.

Последовательности состояний, принимаемых системой в параметрическом пространстве (роль которого играет время), соответствует последовательность элементов, порождаемых последовательными степенями преобразования. Такая последовательность состояний (и преобразований) определяет *траекторию* или линию поведения системы.

В случае, когда существует соответствие между реальной (эмпирической) системой и преобразованием, такое преобразование называется *каноническим представлением* системы, а о самой системе говорят, что она *воплощает* преобразование.

Процедуру определения траектории системы по заданным начальному состоянию и преобразованию называют *интегрированием* преобразования, притом что во многих случаях преобразование представляет собой множество дифференциальных уравнений. Понимание поведения системы отображается посредством построения ее динамической модели, находящейся с ней в отношениях *подобия*.

Моделирование — это основная процедура теории систем и системного анализа, имеющая своей целью установление связи эмерджентных свойств системы с ее входами и выходами. Поскольку динамическая система, в зависимости от цели ее исследования, может быть представлена множеством моделей посредством того или иного преобразования, каждая из моделей будет иметь свою семантику (смысл). Поэтому в каждом случае строится семантическая модель системы. Это относится и к случаю построения математической модели, представляющей собой символическое описание преобразования системы — модель.

Поясним понятие модели с помощью преобразования отображения. Пусть A и B — два произвольных множества. Функция f , однозначно ставящая в соответствие каждому элементу $a \in A$ элемент $f(a) \in B$, называется *отображением* множества A в множество B . Это отображение обозначается как $f: A \rightarrow B$. Элемент $f(a) = b$ называют значением элемента a при отображении f или *образом* a ; множество A тогда будем называть *областью определения*, множество B — *областью значений* отображения f . Функцию f принято называть *оператором преобразования* или просто *оператором*.

В случае, если в области значений отображения имеются элементы $b \in B$, не являющиеся образами никаких элементов $a \in A$, то отображение f будет называться отображением «*на*» B . Если же все $b \in B$ есть образы $a \in A$ или $f(a) = B$, то отображение f будет отображением «*в*» B .

Обратная функция $f^{-1}(B)$, т.е. множество элементов из области определения A , образы которых принадлежат области B , назовем про-

образом множества B , и, соответственно, $f^{-1}(b)$ — прообразом элемента b . Обозначим прообраз следующим образом: $f^{-1}(B) = \{a \in A \mid f(a) \in B\}$, где после вертикальной черты принято указывать свойство элементов множества A . Заметим, что в общем случае функция f^{-1} может быть неоднозначной, т.е. не быть отображением B «в» или «на» A .

Отображение f будет *взаимно однозначным*, если каждый элемент множества B является образом не более, чем одного элемента множества A .

Отображение f называется *гомоморфным* (имеет место гомоморфизм множеств A и B) при выполнении условия $(a_1, a_2, \dots, a_k) \rightarrow (f(a_1), f(a_2), \dots, f(a_k))$, где $a_i \in A, f(a_i) \in B$. Гомоморфизм множеств означает однозначное отображение одного множества с заданными на нем отношениями в другое (но не наоборот — с учетом неоднозначности отображения) с сохранением всех отношений. Для конкретных систем это означает сохранение в модели связей между элементами системы.

Частным случаем гомоморфизма множеств является их *изоморфизм*, или взаимно однозначный гомоморфизм, обозначаемый как $(a_1, a_2, \dots, a_k) \leftrightarrow (f(a_1), f(a_2), \dots, f(a_k))$. Именно отношение изоморфизма между рассматриваемыми множествами необходимо для того, чтобы вначале синтезировать модель прототипа, а затем результат исследования модели корректно перенести на прототип.

2.3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ СЕМАНТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ

Теперь мы можем определить модель реальной системы как изоморфизм фиксированного множества ее элементов (предметная область) с исследуемыми отношениями (связями) A в абстрактное множество B , задаваемое кортежем:

$$B = \langle \{M\}, P_1, P_2, \dots, P_n \rangle , \quad (2.1)$$

где $\{M\}$ — носитель модели, т.е. множество элементов модели, отображающих элементы предметной области;

P_1, P_2, \dots, P_n — предикаты, отображающие отношения (связи) между элементами предметной области.

Совокупность предикатов образует *сигнатуру* модели, поскольку позволяет ее идентифицировать, т.е. определить, какой класс систем модель отображает. Содержательной областью предикатов является носитель модели.

Выбор носителя и сигнатуры модели (тип и форма реализации) определяет тот или иной вид моделирования, например статическое или динамическое, мысленное или реальное, языковое или символьическое.

При исследовании систем рассматриваются два аспекта: поведение системы, т.е. зависимость выходов от входов, и ее внутренняя структура, множество состояний, определяющее поведение. Основная задача системного исследования как раз и состоит в том, чтобы по установленному на первом этапе закону функционирования системы выявить реально действующий в ней алгоритм (или механизм) функционирования.

Следовательно, систему следует рассматривать как кортеж:

$$S = \langle S_a, S_b, P_0(S_a, S_b) \rangle, \quad (2.2)$$

где S_a — подмодель, отображающая поведение системы, в ряде случаев она может отображать поведение «черного ящика»;

S_b — подмодель, определяющая структуру системы при ее внутреннем рассмотрении;

$P_0(S_a, S_b)$ — предикат целостности, определяющий назначение системы, семантику подмоделей S_a и S_b и семантику преобразования $S_a \rightarrow S_b$;

$P_0(S_a, S_b) = 1$, если преобразование $S_a \rightarrow S_b$ существует при наличии взаимно однозначного соответствия между элементами носителей моделей S_a и S_b , в противном случае $P_0(S_a, S_b) = 0$.

Требование изоморфизма обусловлено тем, что при системном исследовании изучаются свойства построенной модели, а затем полученные сведения переносятся на моделируемую систему.

Подмодель, отображающая поведение системы, может быть представлена кортежем из пяти объектов:

$$S_a = \langle x, y, z, f, g \rangle, \quad (2.3)$$

где $x = x(t)$ — входной сигнал как конечное множество функций времени

$\langle x_0(t), \dots, x_k(t) \rangle$;

$y = y(t)$ — выходной сигнал как конечное множество функций $\langle y_1(t), \dots, y_n(t) \rangle$;

$z = z(t)$ — переменная состояния — множество функций $\langle z_1(t), \dots, z_m(t) \rangle$, определяющих значения выходных характеристик модели;

f и g — функционалы, задающие текущие значения выходных характеристик и внутреннего состояния.

С помощью функционалов записываются в инвариантной форме (т.е. без аналитического представления конкретного вида функциональной зависимости) так называемые *глобальные уравнения* системы:

$$y(t) = g(z(t), x(t)); \quad (2.4)$$

$$z(t) = f(z(t_0), x(\tau)); \quad \tau \in [t_0, t]. \quad (2.5)$$

Здесь $[t_0, t]$ означает весь интервал времени с момента начала управления.

С введением в описание системы ее глобальных уравнений она уже не рассматривается как «черный ящик». Однако зачастую нахождение формы глобальных уравнений представляет собой весьма трудную, а временами неразрешимую задачу. Поэтому исследование системы как «черного ящика» остается полноценным разделом методологии системного анализа.

Соотношение (2.4) называется *уравнением наблюдения*. Оно отражает тот факт, что множество выходов системы является функцией множества ее состояний и множества входных (управляющих) воздействий. Соотношение (2.5) носит название *уравнение состояния*, оно показывает, что состояние системы в любой момент времени определяется ее начальным состоянием и всей совокупностью входных воздействий к этому моменту.

Для полного задания динамической системы необходимо ввести также три аксиомы.

Аксиома 1. Для системы определено пространство состояний Z , в которых она может находиться, и параметрическое пространство T , в котором задано поведение системы. Роль параметрического пространства обычно играет временной интервал в пределах $(0, \infty)$.

Аксиома 2. Пространство состояний системы Z содержит не менее двух элементов. Таким положением фиксируется очевидное представление о том, что система может находиться в разных состояниях.

Аксиома 3. Система обладает свойством функциональной эмерджентности, что означает принципиальную несводимость целостного свойства системы к сумме свойств ее элементов, а также его невыводимость из них.

Подобное представление показывает, что система может быть представлена множеством моделей, отражающих семантику предметной области. Отсюда вытекает еще одно определение: *система — это совокупность взаимосвязанных элементов, обладающая свойством эмерджентности, а также способ отображения реальных объектов*. В такой интерпретации под сложной системой мы будем понимать материальный объект (систему) с управлением и его отображение в сознании исследователя в виде совокупности моделей, семантика которых определяется задачей исследования.

2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Моделирование материальных систем в сознании человека-исследователя лежит в основе познания им мира естественных систем и создания мира технических и социальных систем различного типа. Под *моделирова-*

лием, как правило, понимается процесс исследования реальной системы, состоящий в построении модели, исследовании ее свойств и перенесении выявленных свойств на моделируемую систему. Наиболее общими функциями моделирования являются описание, объяснение и прогнозирование поведения реальной системы. В этом, собственно говоря, и состоит задача аналитического познания материальных систем.

Однако возможна и противоположная ситуация, когда абстрактный объект (идея) отображается в виде реальной системы, например макета мыслимого технического устройства или физического объекта. Эта ситуация характерна для процедуры *синтеза*.

Понятие модели, так же, как и понятие системы, имеет множество определений. Большинство из них вводит понятие *прототипа*. Мы будем называть моделью объект, находящийся в отношении подобия с прототипом и служащий средством описания, объяснения и прогнозирования поведения прототипа. Другими словами, модель служит образом прототипа, а прототип является прообразом модели.

Формальное определение (2.1) представляет модель в виде изоморфизма A на B , т.е. $f: A \rightarrow B$. Оператор преобразования f в общем виде определяет способ построения требуемой модели.

Принципиально отличие модели от прототипа состоит в том, что она дает упрощенный образ прототипа, отображающий не полную совокупность его свойств, а только тех, которые признаются существенными для конкретной задачи исследования. Очевидно, что по мере углубления процесса изучения или проектирования сложной системы подмножество ее существенных свойств может изменяться и пополняться. Формально это означает, что выбор носителя и сигнатуры модели определяется целью проводимого исследования. В этой связи еще раз отметим, что один и тот же прототип может быть отображен множеством моделей, отличающихся рассматриваемыми аспектами поведения прототипа и точностью его описания.

В зависимости от исследуемого аспекта проблемы различают модели структурные, функциональные, информационные и параметрические.

Структурное моделирование имеет целью отображение элементного состава и взаимосвязей между элементами, т.е. структуру (морфологию) системы в определенном ее состоянии.

Функциональная (поведенческая) модель системы отображает совокупность и последовательность выполняемых ею функций (динамику функционирования). При этом используются понятия закона и алгоритма функционирования.

Информационная модель рассматривает управление в системе как совокупность информационных процессов, т.е. множество процессов преобразования информации (информационных потоков).

Параметрическое моделирование проводится с целью установления оптимальных значений внешних и внутренних характеристик системы, определяющих эффективность ее функционирования.

Подчеркнем, что подобные модели строятся как при анализе сложных систем, так и при их синтезе.

Моделирование реальных и абстрактных систем составляет теоретическую и практическую основу любой интеллектуальной деятельности, которая лежит в основе основных информационных процессов: исследования, обучения и управления. Во всех случаях требования к моделям остаются неизменными, они должны обеспечить описание (что, где, когда?), объяснение (почему?) и предсказание (как?) поведения той или иной системы.

2.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В связи с использованием разнообразных видов моделирования целесообразно провести их систематизацию. Как уже отмечалось, классификация систем может быть проведена по различным признакам (основаниям). Рассмотрим один из вариантов классификации видов моделирования, беря за основу принцип разбиения, т.е. задание классов эквивалентности.

Прежде всего отметим, что разделение видов моделирования на полное и неполное носит умозрительный характер: модель по определению находится в отношении подобия с прототипом. Полное моделирование, строго говоря, можно реализовать только путем синтеза копии прототипа.

Поэтому в зависимости от типа носителя и сигнатуры модели будем различать следующие виды моделирования:

- детерминированное и стохастическое;
- статическое и динамическое;
- дискретное и непрерывное.

Детерминированное моделирование служит средством отображения процессов, в которых предполагается отсутствие случайных воздействий, т.е. такими воздействиями можно пренебречь.

Статическое моделирование отображает неоднозначное поведение системы, т.е. учитывает вероятностные события и процессы.

Статическое моделирование используется для описания состояния системы в фиксированный момент времени, например в ее начальном состоянии.

Динамическое моделирование отображает изменение множества показателей поведения (функционирования) системы в параметрическом пространстве (во времени).

Непрерывное (аналоговое) моделирование привлекается для отображения поведения динамических систем, в которых изменения существенных переменных (входов, выходов и внутренних состояний) можно считать непрерывными.

Дискретное моделирование является средством описания систем, в которых изменения переменных происходят в определенные моменты времени по принципу «от события к событию».

В зависимости от формы реализации носителя и сигнатуры моделирование может быть реальным и мысленным.

Реальное моделирование предполагает возможность проведения исследования (измерения характеристик) на конкретном реальном объекте или в лабораторных условиях при сохранении природы исследуемых явлений. Поэтому принято различать *натурное* и *физическое* моделирование.

Натурное моделирование, в свою очередь, подразделяется на научный эксперимент, производственный эксперимент и комплексные испытания. *Научный эксперимент* характеризуется привлечением разнообразной измерительной аппаратуры, средств обработки получаемой информации, возможностью вмешательства экспериментаторов в протекание процесса. *Производственный эксперимент* основан на обобщении опыта, накапливаемого в ходе основного процесса с введением ряда новых факторов и пробных возмущающих воздействий. *Комплексные испытания* представляют собой специально организованную процедуру, в ходе которой многократно проводимые измерения (на всей системе или на значительной ее части) позволяют оценить обобщенные показатели качества, надежности, устойчивости системы.

Физическое моделирование отличается от натурного тем, что исследование проводится в лабораторных условиях. При этом используются экспериментальные установки, реализующие физическое подобие реальных процессов при изменении в широком диапазоне условий протекания этих процессов.

При всех достоинствах реального моделирования его возможности и, естественно, области применения весьма ограничены. Поэтому неудивительно столь широкое распространение *мысленного* моделирования практически во всех областях человеческой деятельности.

Обладая развитым образным мышлением, человек стремится к построению моделей, обладающих высокой степенью наглядности. Однако по мере усложнения моделей с целью повышения их точности такая наглядность неизбежно теряется, и все большую роль начинает играть абстрактное мышление. Собственно говоря, необходимость абстрагирования от несущественных свойств (характеристик) прототипа с сохранением

отношений подобия заложена в саму постановку задачи моделирования. Поэтому в основе построения моделей практически во всех случаях лежат гипотезы о закономерностях протекания процессов в реальном объекте, не противоречащие установленным причинно-следственным (каузальным) связям между его входами и выходами.

Относительно высокая степень наглядности при мысленном моделировании сохраняется в случае использования *аналогового моделирования*, в частности *макетирования*. Такие методы пригодны для построения моделей материальных объектов искусственного происхождения, например технических устройств. В основном же для синтеза моделей, обладающих высокой степенью общности, с необходимостью применяется *символическое и математическое моделирование*. Нередким является и комбинированное использование этих видов моделирования.

Символическое моделирование состоит в замене реального объекта искусственным логическим объектом, отображающим его существенные свойства с помощью определенной системы знаков и символов. В основе *лингвистического* (языкового) моделирования лежит *тезаурус*, образуемый из набора понятий предметной области. Термин тезаурус (от греческого Θηράυρος — сокровищница, богатство) в наиболее общем смысле означает совокупность научных знаний о явлениях и законах окружающего мира и духовной деятельности людей, накопленную всем человеческим обществом.

В лингвистике этот термин используется в более узком смысле, а именно для характеристики многоуровневой структуры конкретного языка. Примем следующее определение: *тезаурус — множество смысло выраждающих элементов языка с заданными смысловыми оппоненциями*. При таком определении структуру языка можно представить в виде уровней (страт) множеств (слов, словосочетаний, предложений, абзацев и т.п.), элементы каждого из которых формируются из элементов предшествующих структурных уровней. Отметим, что понятие тезауруса находит широкое применение при создании искусственных языков, например языков моделирования, автоматизации проектирования, информационно-поисковых языков и др.

Одна из важных особенностей тезауруса как словаря состоит в том, что он, в отличие от обычного словаря, практически очищен от неоднозначности и каждому его элементу соответствует только одно понятие.

Введение условных обозначений различных понятий с помощью знаков и определенных операций между этими знаками позволяет реализовать *семиотическое* (знаковое) моделирование, отображая набор понятий с помощью комбинации знаков. Привлечение операций

объединения, пересечения и дополнения теории множеств позволяет дать описание реального объекта (прототипа) в символической форме.

Семиотика как наука о знаках разивает методологию пояснения результатов, полученных ранее в геометрии, алгебре и других разделах математики, а также в гуманитарных науках. В настоящее время развитие семиотических представлений идет по пути привлечения понятий математической лингвистики (тезаурус, грамматика, семантика и др.).

Требование однозначности, снятия неопределенности при моделировании систем любой природы и происхождения определило широкое применение *математического моделирования*, в ходе которого исследуемой системе ставится в соответствие математическая модель.

2.6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Математическое моделирование представляет собой процесс, в ходе которого реальной системе приводится в соответствие абстрактная система, называемая математической моделью. Это означает проведение формализации поведения исследуемой системы, результатом которого и является математическая модель, описывающая реальную систему с определенной степенью приближения.

При математическом моделировании используются различные формы представления или записи модели: инвариантная, аналитическая, алгоритмическая, графическая и некоторые другие.

Инвариантная форма представляет собой запись соотношений между параметрами исследуемой системы с помощью традиционной математической символики безотносительно к способу решения соответствующего уравнения. Речь идет о записи уравнения в неявном виде, при котором указывается факт наличия зависимости, но не конкретный ее характер. Типичными примерами такой формы записи являются кортеж вида (2.3) и глобальные уравнения системы (2.4) и (2.5).

Аналитическая форма представления математической модели содержит явные выражения выходных параметров как функций переменных входных параметров и параметров состояния. При аналитическом моделировании во главу угла ставится функционирование системы, причем глобальные уравнения системы, формализующие закон (алгоритм) ее функционирования, записываются в виде конкретных аналитических соотношений. Это могут быть алгебраические, дифференциальные, интегральные, конечноразностные и другие уравнения, а также определенные логические условия.

Исследование аналитической модели, в зависимости от сложности решения полученных уравнений, проводится несколькими методами.

Аналитический метод предусматривает получение явной зависимости искомых характеристик от начальных условий, параметров и переменных состояния системы и окружающей среды. *Численный метод* предполагает получение числовых результатов для конкретных исходных данных в случае, когда не представляется возможным решение уравнения в общем виде. К качественному методу прибегают в случаях, когда, не имея решения в общем виде, можно оценить определенные свойства предполагаемого решения, например его устойчивость.

Широкое распространение в настоящее время получили компьютерные методы исследования математических моделей функционирования сложных систем. Для проведения компьютерного моделирования необходимо построение соответствующего алгоритма. *Алгоритмическая форма* представляет собой запись соотношений математической модели и выбранного численного метода решения в форме алгоритма.

Важный класс алгоритмических моделей составляют *имитационные модели*, используемые для так называемого имитационного моделирования конкретных физических или информационных процессов в системах при различных внутренних и внешних воздействиях. При имитационном моделировании воспроизводится механизм функционирования системы как последовательность элементарных явлений с сохранением последовательности их протекания во времени. Это позволяет получать по исходным данным сведения о состоянии протекающих процессов в определенные моменты времени, что дает возможность оценивать динамику изменения характеристик системы.

Достоинство имитационного моделирования состоит в том, что по сравнению с аналитическим моделированием оно позволяет решать более широкий круг задач. Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать влияние случайных воздействий, наличие нелинейных характеристик элементов, их дискретную структуру и других факторов, затрудняющих аналитическое исследование.

Основными направлениями имитационного моделирования являются метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) и метод статистического моделирования.

Метод Монте-Карло представляет собой численный метод, удобный для моделирования случайных величин, вероятностные значения которых соответствуют решениям аналитических соотношений. В его основе — многократное воспроизведение процессов, являющихся реализацией случайных величин, и последующая обработка результатов методами математической статистики. Метод статистического моделирования состоит в машинной имитации процессов функционирования систем, подверженных случайным воздействиям.

Имитационное моделирование широко применяется для оценивания различных вариантов структуры систем, влияния изменения их параметров, эффективности возможных алгоритмов функционирования.

Достоинства аналитического и имитационного моделирования объединяют методологию *комбинированного* (аналитико-имитационного) моделирования. Для построения комбинированной модели производится декомпозиция процесса функционирования системы на отдельные составляющие (подпроцессы). Далее выявляются подпроцессы, для которых возможно применение аналитических моделей. Для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой «симбиоз» позволяет существенно расширить круг доступных для моделирования систем. Он применим к таким системам, для которых неприемлемы методы аналитического и имитационного моделирования в отдельности.

2.7. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Математическое моделирование реальных систем требует не только отработанной техники вычислений, но во многом определяется опытом, интуицией и другими интеллектуальными качествами исследователя. Не существует формализованной инструкции по проведению моделирования той или иной системы, каждая задача является оригинальной. Однако опыт математического моделирования в системном анализе позволил сформулировать некоторые основополагающие принципы и подходы к построению моделей. Каждый из них отвечает соображениям здравого смысла и выглядит достаточно очевидным. В то же время совокупность этих принципов далеко не тривиальна и составляет строгую методологию, пренебрежение которой, как правило, чревато ошибками и неудачами.

Речь идет о тех общих требованиях, которым должна удовлетворять продуктивная математическая модель. Сформулируем эти требования.

1. *Принцип адекватности* требует соответствия модели реальной системе по ее структурной организации и совокупности существенных свойств. При наличии сомнений относительно правильности отображения системы принятой моделью ценность последней остается сомнительной.

2. *Принцип соответствия модели цели исследования* развивает требования принципа адекватности и предусматривает необходимость построения для каждой конкретной задачи своей модели, отражающей именно те характеристики системы, которые наиболее важны для этой задачи. Нецелесообразно пытаться создать универсальную мо-

дель, нацеленную на широкий круг разнообразных задач, поскольку ее вынужденное усложнение сделает ее практически непригодной.

3. *Принцип абстрагирования от второстепенных деталей* означает, что модель должна быть всегда проще прототипа, носить приближенный характер, в чем, собственно, и состоит смысл моделирования. При моделировании сложных систем этот принцип рекомендует упрощать их описание, подчеркивая, даже утрируя основные и игнорируя менее существенные свойства.

4. *Принцип компромисса между точностью и сложностью* ориентирует исследователя на построение в меру простой модели, допускающей нахождение решения без необходимости преодолевать серьезные математические затруднения. С другой стороны, для того, чтобы отобразить все существенные свойства, модель необходимо в достаточной степени детализировать. Естественное желание получить простую и одновременно точную модель неосуществимо, поскольку в силу векторной связи улучшение одной характеристики модели неизбежно приводит к ухудшению другой. Подбор наилучшего компромисса оказывается, как правило, весьма трудоемким, поскольку связан с необходимостью варьирования различными свойствами модели. Ниже мы рассмотрим выработанные практикой подходы к достижению такого компромисса.

5. *Принцип многовариантности реализации элементов модели* указывает направление регулирования соотношения точность/сложность посредством декомпозиции модели на отдельные подмодели, для каждой из которых рассматриваются различные варианты моделирования (например, аналитическое моделирование для одних подмоделей и имитационное — для других).

6. *Принцип блочного строения модели* подчеркивает эффективность декомпозиции моделей и акцентирует внимание на целесообразности минимизации связей между блоками (подмоделями), что открывает возможность использования накопленного опыта и удачных решений.

Вернемся к принципу компромисса между точностью и сложностью и рассмотрим некоторые практические рекомендации по уменьшению сложности моделей:

- а) сокращение числа переменных параметров за счет исключения переменных, признаваемых несущественными, либо за счет их агрегирования (объединения);
- б) изменение природы переменных, в частности рассмотрение переменных параметров как постоянных, дискретных характеристик — как непрерывных, стохастических — как детерминированных и т.д.;

- в) изменение функциональной зависимости между переменными, например замена нелинейной зависимости линейной, дискретной функции распределения вероятностей — непрерывной, неизвестного закона распределения вероятностей — нормальным законом и др.;
- г) варьирование ограничениями, т. е. исключение части из них, добавление новых, модификация; при этом можно получить взишенный компромисс между оптимистичным и пессимистичным решениями.

При разработке моделей неизбежно конкурируют две тенденции: стремление к полноте и точности описания и стремление к получению желаемых результатов наиболее простыми средствами. Оптимизация модели достигается на пути построения серии моделей — от простых к все более сложным.

2.8. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Как мы убедились, существующий инструментарий построения моделей систем весьма разнообразен. Если же речь вести о классификации самих моделей, то оказывается, что круг принципиально различных типов моделей всего колossalного разнообразия реальных систем крайне ограничен. В зависимости от полноты информации, которой располагает системный аналитик, приступая к моделированию, можно выделить три типа моделей:

- модель «черного ящика»;
- модель состава системы;
- структурная модель.

Такие модели могут в равной степени отображать как фиксированное состояние системы, так и характер взаимодействия исследуемой системы с окружающей средой.

Модель «черного ящика» представляет собой простейшее отображение любой реальной системы, в котором полностью отсутствует информация (сведения) о ее внутренней структуре, а заданы (известны) только входные и выходные связи системы со средой. Нередко даже границы между системой и средой не описываются, а только подразумеваются. Несмотря на внешнюю простоту, такая модель часто оказывается весьма полезной, а иногда и единственно возможной.

Так, например, при исследовании последствий антропогенного воздействия на природу, влияния медикаментов на организм, анализе процессов в мировой экономической системе и т.д. отсутствует возмож-

ность проследить за процессами, протекающими в системе. Поэтому для описания системы и ее поведения остается единственная возможность зафиксировать ее взаимодействия со средой по входам и выходам.

Тем не менее построение модели «черного ящика» не является триангульной задачей, поскольку каждая реальная система взаимодействует с окружающей средой неограниченным числом способов. Задача состоит в том, чтобы из всего этого многообразия входов и выходов отобрать для включения в модель только существенные входы и выходы и, соответственно, пренебречь несущественными. Ясно, что критерием отбора является целевое предназначение модели, поскольку одной системе, в принципе, может быть поставлено в соответствие неограниченное число моделей.

На этом этапе нередки серьезные ошибки, связанные с исключением из рассмотрения факторов, казавшихся несущественными, что оборачивается неадекватностью модели задаче исследования. С другой стороны, включение в модель несущественных факторов делает ее громоздкой и требующей больших затрат времени.

Грамотный отбор существенных характеристик модели позволяет оптимизировать модель по соотношению точность — сложность.

Динамическая модель черного ящика предполагает разделение множества X входных воздействий на две составляющие: управляемые входы U и неуправляемые входы V . Тогда наша динамическая модель может быть выражена совокупностью двух процессов:

$$Xt = \{u(t), v(t)\}, u(t) \in U, v(t) \in V;$$

$$Yt = \{y(t)\}, y(t) \in Y.$$

Очевидно, что $y(t)$ есть результат некоторого преобразования Ψ процесса $x(t)$, т.е. $y(t) = \Psi(x(t))$, однако модель черного ящика предполагает, что это преобразование неизвестно.

Среди моделей данного типа наиболее простыми являются модели безынерционных систем, т.е. таких динамических систем, которые мгновенно преобразуют вход в выход. Однако для большинства реальных систем необходимо конечное время, чтобы входной сигнал прошел по всему контуру обратной связи. Время, необходимое для того, чтобы сигнал обратной связи прошел по всем звеньям системы и вернулся на ее вход, называется памятью системы.

Модель состава системы можно считать результатом превращения «черного ящика» в «прозрачный ящик».

При рассмотрении системы в рамках модели «черного ящика» ее состав и внутренняя структура, будучи неизвестными, не рассматриваются. Поэтому ее целостность и обособленность выступают как внешние свойства. Однако очевидно, что «внутренность ящика» неоднородна, и для более полного понимания поведения системы необходимо различать ее составные части. Компоненты, которые будут рассматриваться как неделимые, как уже отмечалось, называем элементами, а компоненты, состоящие более чем из одного элемента — подсистемами. При построении модели состава системы рассматривают только множество элементов и подсистем исследуемой системы, абстрагируясь от связей между ними. Это обусловлено отсутствием достаточно полных сведений о системе на этом этапе ее исследования.

Следует отметить, что построение модели состава системы, несмотря на кажущуюся простоту, не является однозначно решаемой задачей. Разные ЛПР (эксперты), как правило, определят состав системы по-разному. Это обстоятельство обусловлено тремя основными причинами.

Во-первых, по-разному можно определить само *понятие элементарности*. То, что с одной точки зрения нецелесообразно подвергать дальнейшей декомпозиции, с другой — может рассматриваться как очевидная подсистема.

Во-вторых, как и все модели, модель состава системы является целевой. Поэтому, в зависимости от задачи исследования и от индивидуальных особенностей ЛПР, могут быть признаны существенными разные свойства и компоненты системы. Так, модель состава любой организации будет выглядеть совершенно по-разному глазами ее руководителя, кадрового работника или охранника.

В-третьих, границы между системой и окружающей средой, равно как и границы между отдельными подсистемами, как правило, носят условный характер и определяются целями моделирования. Поэтому модели состава системы могут существенно различаться в части того, что в них является элементом, а что — границей, выделяющей систему из окружающей среды.

Динамические модели состава системы имеют целью отображение двух видов их возможного поведения: функционирования и развития. Под *функционированием* понимают процессы, протекающие при стабильной реализации системой определенного (заданного) алгоритма (механизма) функционирования. Под *развитием* подразумевается изменение структуры и поведения систем, вызванное внешними и внутренними обстоятельствами.

Динамическая модель состава развивающейся системы отображает упорядоченное во времени множество этапов ее развития или состоя-

ний. Под состоянием системы будем понимать такую совокупность ее параметров, которая определяет характер ее последующих изменений.

Развитие систем принято отображать графически как их абстрактное перемещение в пространстве состояний или фазовом пространстве.

Тогда то или иное состояние системы в определенный момент времени описывается вектором, а изменения в системе отображаются некоторой кривой — траекторией развития. Каждая точка этой траектории соответствует состоянию системы в определенный момент времени, и развитие системы моделируется движением точки по траектории.

Следовательно, динамическая модель состава системы представляет собой упорядоченную во времени последовательность ее состояний, последнее из которых соответствует цели моделирования.

Структурная модель представляет собой дальнейшее развитие модели состава в части выявления существенных связей (отношений) между ее компонентами. Собственно говоря, сложность системы в первую очередь определяется количеством и разнообразием отношений между ее элементами. Новые связи возникают вследствие как роста системы, так и ее развития. Появление в системе новых элементов приводит к возникновению новых связей, количество которых может расти экспоненциально.

Множественность и разнообразие (неоднородность) связей, существующих в сложных реальных системах, обусловливают физическую невозможность их полного учета при моделировании. Поэтому при построении модели производится отбор только существенных с точки зрения цели моделирования элементов и связей между ними. Следовательно, мы можем сформулировать следующее определение:

Совокупность необходимых и достаточных для достижения цели исследования отношений между элементами исследуемой системы составляет ее структурную модель.

Речь, таким образом, идет о том, что структурная модель эмпирической системы должна содержать конечное количество связей между элементами, иначе она будет непригодной для исследования поведения системы.

Переходя к рассмотрению динамических структурных моделей, следует отметить, что они призваны увязывать в единое целое множество управляемых и неуправляемых входов в систему X , ее промежуточных внутренних состояний Z и выходов Y . В зависимости от формы отображения состояний системы структурная модель может быть либо сетевой, либо аналитической.

Построение динамической структурной модели сетевого типа состоит в формализованном описании траектории ее поведения посредством задания состояний системы и управляющих воздействий, переводящих

систему в каждом цикле управления из текущего состояния в требуемое. В итоге система переводится из начального состояния в конечное, представляющее собой цель ее функционирования или развития.

В силу наличия множества альтернативных траекторий развития системы выбор таковой определяется выбором критерия (минимум затрат, максимум эффекта, минимум времени), диктуемого поставленной целью.

Таким образом, независимо от типа сетевых моделей, они описывают определенную совокупность логически увязанных операций, проведение которых направлено на синтез некоторой системы или перевод ее в новое состояние, соответствующее новой цели.

Аналитическая динамическая модель строится в случае, когда множество промежуточных состояний системы задается одной функцией непрерывной переменной. Эта функция должна быть увязана со входом и выходом системы соответствующими отображениями:

$$X \xrightarrow{\zeta} Z \xrightarrow{\eta} Y .$$

Аналитически этому соответствует два соотношения:

$$y(t) = \eta(Z_t), t \in [0, T];$$

$$Z_t = \zeta(t, X_0), t \in [0, T].$$

Выбирая конкретные множества X , Y и Z , а также форму отображений ζ и η , можно строить как непрерывные, так и дискретные модели. Отметим, что если множества X , Y и Z дискретной модели имеют конечное число элементов, то такую систему принято называть конечным автоматом.

Отметим также, что в классе моделей динамических систем различают «мягкие» и «жесткие» модели, которые применяются при исследовании конкретных прикладных проблем.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. С какой целью проводится моделирование систем?
2. Как определить понятие модели?
3. Какое отношение связывает модель и моделируемую систему?
4. Какие типы моделей вам известны?
5. В чем состоит различие между непрерывным и дискретным моделированием?

6. Перечислите основные принципы построения математических моделей.
7. В чем состоит отличие инвариантной формы записи математической модели от аналитической формы записи?
8. Охарактеризуйте статические и динамические модели.
9. В чем состоит имитационное моделирование?
10. Чем отличается натурное моделирование от наглядного?
11. Перечислите этапы построения математических моделей.
12. Объясните смысл принципов построения математических моделей.
13. Как представить систему семантической моделью?
14. Каков смысл глобальных уравнений системы?
15. Какими аксиомами необходимо дополнить семантическую модель системы?
16. Какие отношения связывают модель с ее прототипом?
17. Почему модель должна находиться с прототипом в отношении подобия?

ГЛАВА 3

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СИСТЕМ

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИИ

Понятие информации является одним из фундаментальных в современной науке вообще и базовым для теории информации и информатики. Оно отражает уникальный феномен, связанный с отображением в человеческом сознании имманентной активности материальных систем, их способности к самым разнообразным изменениям под воздействием разнообразных управляющих факторов. В силу высокой степени общности и, строго говоря, неполной изученности этого феномена существует и используется множество определений понятия информации, отражающих разнообразные ее аспекты.

Одно из распространенных определений гласит: *информация — любой вид сведений о предметах, фактах, понятиях предметной области, неизвестных до их получения и являющихся предметом хранения, обработки и передачи*. Очевидна неоднозначность подобного (как, впрочем, и многих других) определения, состоящая в том, что сведения, неизвестные одному индивиду, для другого являются тривиальными. Следовательно, то, что является информацией для одного индивида, для другого таковой не является. Этим примером сложность интерпретации и дефиниции понятия информации не ограничивается.

Математическая формализация понятия информации, введенная Л. Хартли и К. Шенноном, относится к числу крупнейших достижений науки XX века. В основу этой формализации положены простые и достаточно наглядные соображения, абстрагированные от общих понятий и изложенные на универсальном языке науки с учетом целенаправленного характера деятельности человека. Общее определение, трансформирующее слово «информация» в научный термин, сфор-

мулировано так: *информация есть устраниенная неопределенность для достижения цели*.

Такое определение отражает смысл исторически сложившегося обобщения сведений, фиксируемых в памяти человека, что исключает повторение множества случайных проб и ошибок, ускоряя и облегчая достижение цели. Можно утверждать, что дефиниция информации как устранившей неопределенности автоматически и исчерпывающим образом обобщает и формализует многочисленные общеденные и частные ее определения. Теория информации возникла для объяснения процессов обмена сообщениями в ходе целенаправленной деятельности человека. Во всех ее задачах рассматриваются понятия передатчика (источника), приемника (получателя), сигнала, сообщения, событий и их вероятностей.

Поэтому, говоря о передаче и получении информации (т.е. об обмене информацией), мы, строго говоря, имеем в виду обмен *сообщениями*. Сообщения же, в принципе, могут нести информацию, информационный шум и, наконец, дезинформацию. При таком подходе можно утверждать, что информацией является только та часть сообщения, которая расширяет тезаурус получателя сообщения. Поэтому получаемая информация является функцией не только сообщения, но и тезауруса получателя (или степени согласованности тезаурусов передатчика и получателя сообщения).

Любое сообщение передается с помощью материального носителя, называемого сигналом. При этом предполагается наличие «источника сообщения», «получателя (приемника) сообщения» и «канала связи». Каналом связи принято называть материальную среду, способную проводить электромагнитные, акустические и другие материальные сигналы, несущие сообщения.

В общем случае в качестве сигнала используется изменяющийся во времени физический процесс. Любой процесс описывается переменными характеристиками (параметрами). Характеристика, изменение которой по определенному закону служит для представления сигнала, называется параметром сигнала. Так, например, при передаче сигнала с помощью электромагнитного излучения в качестве параметров сигнала могут выступать частота, амплитуда и фаза волнового процесса.

В случае, если параметр сигнала принимает с течением времени конечное число значений, которые могут быть пронумерованы, сигнал является дискретным. Соответственно и сообщение, передаваемое таким сигналом, называется *дискретным сообщением*. Если же параметр сигнала представляет собой непрерывную функцию времени, то источник вырабатывает *непрерывное сообщение*.

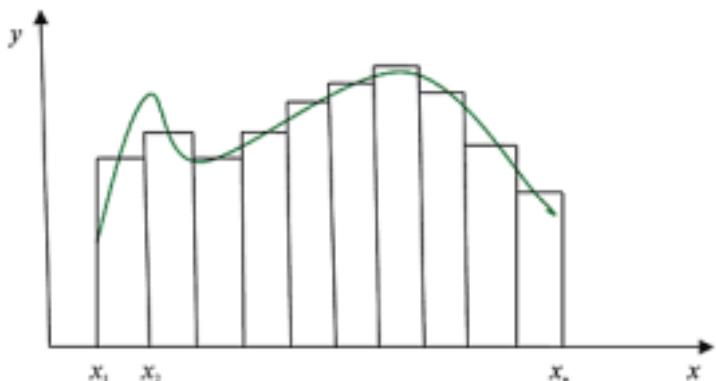


Рис. 3.1. Дискретизация непрерывного сигнала

Непрерывное сообщение может быть подвергнуто дискретизации, т.е. преобразовано в дискретное сообщение. Для этого область определения параметра сигнала (функции непрерывной переменной) разбивается на отрезки равной длины. На каждом из этих отрезков значение функции принимается постоянным и равным, как правило, среднему ее значению на этом отрезке (построение ступенчатой функции). Далее эти средние значения проецируются на ось ординат, являющуюся областью значений функции. В результате получается последовательность значений функции, которая и служит дискретным представлением непрерывной функции. Точность такого представления можно неограниченно улучшать посредством сокращения длин отрезков оси абсцисс (рис. 3.1).

Рассмотренная возможность принципиально важна с точки зрения обеспечения информационных технологий, поскольку представление информации в компьютере носит дискретный характер. Следовательно, дискретизация непрерывных входных сигналов позволяет перевести их в пригодную для компьютерной обработки форму.

3.2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕРЫ ИНФОРМАЦИИ

В определении понятия «количество информации» существует два основных подхода. В середине XX века один из основоположников кибернетики Клод Шеннон, развивая идеи Норберта Винера, предложил вероятностный подход к определению количества информации. Практически в это же время исследования по созданию электронных вычислительных машин привели к формированию объемного подхода.

1. Вероятностный подход

Для начальной иллюстрации вероятностного подхода рассмотрим пример с бросанием игральной кости с N гранями (как правило, $N = 6$). Результатом опыта является выпадение грани с одним из N знаков с априорной вероятностью, равной $1/N$.

Введем в рассмотрение меру неопределенности исхода опыта — энтропию и обозначим ее символом H . Неопределенность, естественно, тем выше, чем больше возможных вариантов исхода опыта. Очевидно, что величины N и H связаны некоторой функциональной зависимостью:

$$H = f(N), \quad (3.1)$$

причем функция f является неотрицательной и возрастающей по мере увеличения количества возможных исходов.

Проследим за результатом однократного бросания кости:

- (1) перед бросанием кости исход опыта неизвестен, априорную энтропию (степень неопределенности) обозначим H_1 ;
- (2) кость брошена — информация об исходе опыта получена, обозначим количество этой информации через I ;
- (3) остаточную неопределенность (энтропию) опыта (после его проведения) обозначим через H_2 .

Количество информации, полученное в результате проведения опыта, определим как разность между априорной и апостериорной неопределенностью:

$$I = H_1 - H_2 \quad (3.2)$$

Очевидно, что при получении конкретного результата имевшаяся до опыта неопределенность оказывается полностью снятой, т.е. $H_2 = 0$, и количество полученной информации совпадает с априорной энтропией.

Теперь следует определить вид функции f . Если варьируется количество вариантов исхода опыта N и число бросаний кости M , то общее количество возможных исходов будет равно

$$X = NM. \quad (3.3)$$

Следовательно, вероятность верного предсказания исходов опыта с увеличением числа бросаний кости уменьшается по степенному закону. Например, при двух бросаниях шестигранной кости $X = 6^2 = 36$, и вероятность угадать оба исхода равна $1/36$. Серия опытов с M бросаниями игральной кости состоит из M независимых равновероятных событий. Энтропия (неопределенность прогноза) исхода такой серии в M раз больше, чем энтропия единичного опыта. Отметим, что в этом состоит принцип *аддитивности* (суммируемости) энтропии. Этот принцип

состоит в том, что энтропия сложной системы (в том числе дискретного сообщения определенной длительности) равна сумме энтропий ее подсистем.

Как видим, энтропию можно рассматривать как меру неопределенности источника сообщений. При вероятностном подходе ожидаемое состояние источника сообщения характеризуется неопределенностью, которая снимается (полностью или частично) после получения сообщения. Поэтому получаемая информация на один символ, переданный источником, количественно определяет степень уменьшения неопределенности.

Для достаточно простого случая выбора из N дискретных равновероятных событий проведенные рассуждения приводят к выводу меры Хартли:

$$H = \log_2 N. \quad (3.4)$$

В принципе выбор основания логарифма связан с понятием алфавита, выбранного для представления информации. Формула (3.4) записана для двоичного алфавита. Для перехода от одного алфавита к другому перед логарифмом вводится безразмерный множитель, чтобы само количество информации оставалось неизменным.

Естественно возникает вопрос — что же следует принимать за единицу измерения введенной величины? Из формулы Хартли с очевидностью следует, что $H=1$ при $N=2$. Тогда за единицу информации принимается количество информации, которую несет исход опыта по выбору одного из двух независимых равновероятных событий. Пример — бросание монеты, при котором возможны всего два исхода. Такая единица количества информации и составляет один бит.

В более сложном и практически важном случае не равновероятных исходов (событий), например передачи сообщений с помощью символов (букв) алфавита, количество информации, равное количеству снятой энтропии, вычисляется по широко известной формуле Шеннона:

$$H = \sum P_i \log_2 P_i, \quad (3.5)$$

где P_i — вероятность i -го события, а суммирование проводится по i от единицы до N .

Очевидно, что в случае равновероятных и независимых событий исходная неопределенность оказывается максимальной и тем большей, чем больше число этих событий. Именно этим свойством и обладает энтропия. Ясно также, что энтропия равна нулю, если с единичной вероятностью происходит одно и то же событие (источник генерирует

единственный символ). Следовательно, $0 \leq H \leq H_{\max}$, т.е. значение энтропии находится в интервале от 0 до H_{\max} .

Нетрудно заметить, что в случае равенства всех P_i формула Шеннона автоматически переходит в формулу Хартли. При этом значение H , вычисленное по формуле Хартли, дает максимальное количество информации, приходящейся на один дискретный символ сообщения. Речь в этом случае идет о передаче сообщения, не содержащего избыточность, т.е. априорно известные сведения. Что же касается ситуации с передачей символов алфавита, то здесь получателю сообщения априори известно, с какой частотой и в каком более вероятном порядке встречаются в осмысленном тексте те или иные буквы. В этом случае передача оказывается избыточной и на одну букву приходится меньшее количество информации.

Так, количество информации, получаемой с появлением каждого очередного символа (буквы) сообщения на русском языке, по формуле Хартли составляет примерно 5 бит. В этом случае $N = 34$, т.е. 33 буквы алфавита и знак «пробел». В то же время с учетом вероятностной частоты употребления различных букв расчет по формуле Шеннона дает значение $H = 4,72$ бит. Как видим, в случае равновероятных дискретных событий исходная энтропия имеет максимальное значение и ее снятие дает максимальное количество информации на один знак.

Вернемся к формуле Хартли. Как уже отмечалось, выбор в ней основания логарифма, равного двум, определяет единицу количества информации, соответствующую случайному выбору одного из двух альтернативных исходов. Такая единица соответствует двоичной системе счисления и называется **бит**.

2. Объемный подход

Как известно, современные компьютеры используют двоичную систему счисления. Это обусловлено предельной простотой представления знаков 0 и 1 в технических устройствах парой противоположных значений тех или иных физических параметров. В принципе за единицу информации можно было бы выбрать ее количество, необходимое и достаточное для различия, например, десяти равновероятных событий. Это была бы уже не бинарная, а десятичная единица информации. В компьютере **бит** (иоль либо единица, третьего не дано), т.е. двоичная цифра, является минимально возможной единицей информации. Поэтому, в отличие от вероятностного подхода, нецелого количества битов быть не может. Заметим, что наименование «*bit*» происходит от сокращения английского словосочетания *binary unit*.

Объем (общее количество) информации, записанной двоичными цифрами в памяти компьютера или на внешнем носителе, определяется

путем простого подсчета количества двоичных символов, потребовавшихся для такой записи. При этом каждый новый символ в последовательности символов увеличивает объем информационного объекта (массива). *Информационным объектом* здесь и далее будем называть совокупность сведений о реальных предметах, явлениях или абстрактных понятиях, содержащихся в записанном либо переданном сообщении.

Для удобства при объемном подходе введены более крупные, чем бит, единицы информации. Так, двоичное число из восьми знаков содержит один *байт* информации, 1024 байта образуют килобайт (кбайт), 1024 килобайта — мегабайт (Мбайт), а 1024 мегабайта — гигабайт (Гбайт).

Совершенно очевидно, что объемный подход полностью абстрагируется от смысла (семантики) информационного объекта, а также не учитывает многих других его существенных свойств. Вероятностный (кибернетический) подход оказался, как будет показано ниже, более универсальным.

3.3. КАЧЕСТВЕННЫЕ МЕРЫ И СВОЙСТВА ИНФОРМАЦИИ

Сложность феномена информации и незавершенность его исследования обусловлены многообразием свойств объектов материального мира и тех сведений, которые циркулируют в современном человеческом обществе. При передаче информации в виде сообщений необходимо учитывать такие их свойства, как *преобразуемость, кодируемость, передаваемость, воспроизводимость, стираемость* и т.п. При анализе содержания и полезности получаемых сообщений на первый план выдвигаются такие их свойства, как *смысл, ценность, достоверность, важность, своевременность, актуальность, достаточность, доступность, точность* и т.д.

Наиболее фундаментальными свойствами собственно информации, как показал анализ сведений, относящихся к самым разным областям знания и человеческой деятельности, являются:

- смысл (семантика),
- ценность (полезность).

Остальные характеристики сообщений и той информации, которую из них получает тот или иной индивид, можно отнести к атрибутивным свойствам, порождающим в совокупности смысл и ценность сообщений.

Поэтому закономерным развитием теории информации, основы которой были заложены К. Шенном, стала разработка семантического (смыслоового) и прагматического (аксиологического) подходов к определению качественных характеристик информационных объектов.

1. Семантический подход

В основу теории информации положен предложенный К. Шенноном метод исчисления количества новой (непредсказуемой) и избыточной (предсказуемой) информации, содержащейся в сообщениях, передаваемых по техническим каналам связи. Вопреки мнению самого К. Шеннона, поначалу предостерегавшего против распространения его метода за пределы прикладных задач теории связи, этот метод оказался настолько универсальным, что его применение вышло далеко за эти пределы.

Как уже отмечалось, для исчисления количества информации, содержащейся в дискретных сообщениях, К. Шеннон предложил использовать вероятностную функцию *энтропии*, заимствованную из статистической термодинамики. Сам К. Шеннон и многие его последователи были склонны рассматривать такое заимствование всего лишь как удобный формальный прием.

Однако оказалось, что существует весьма глубокая взаимосвязь между информацией и физической (термодинамической) энтропией. Ключом к новому пониманию феномена информации послужила установленная Л. Бриллюэном содержательная связь между информационной и физической энтропией. Предложенный Л. Бриллюэном *негентропийный принцип* теории информации (информации есть отрицательная энтропия) позволил дать новую научную интерпретацию информации как меры *структурной упорядоченности систем произвольной природы*. Стало возможным ввести меру для измерения смысла информации:

$$I = K \ln (P_0 / P_1) = K \ln P_0 - \ln P_1 \quad (3.6)$$

где P_0 — вероятность достижения цели до получения сообщения, P_1 — вероятность достижения цели после получения сообщения и использования его по назначению, K — константа.

В статистической физике энтропия выступает в качестве меры достижения макросистемой состояния термодинамического равновесия, при котором характеристики молекул вещества максимально (с точностью до флуктуаций) приближаются к *равновероятным*, а сама энтропия стремится к максимальному значению.

Однако мы видим, что с помощью той же самой вероятностной функции энтропии можно исследовать такие упорядоченные структуры, как письменные тексты. Количество информации, вычисляемое по формуле Хартли, соответствует снятию неопределенности H при получении сообщения об одной из букв алфавита в предположении

о равенстве вероятностей появления любой из них. В этом случае текст будет наиболее хаотичным и информационная энтропия имеет максимальную величину

$$H_{\max} = \log N. \quad (3.7)$$

В реальных текстах появлению разных букв соответствуют разные вероятности, и реальная энтропия оказывается меньше. Разность между значениями максимальной и реальной энтропии H_p определяет количество предсказуемой (избыточной) информации In :

$$In = H_{\max} - H_p. \quad (3.8)$$

Избыточность осмыслинного текста обусловлена действием грамматических и фонетических правил (синтаксис и фонетика), которые предполагаются известными получателю сообщения. Этими правилами задается присущая тексту структурная упорядоченность, поэтому количество избыточной информации, вычисляемое по формуле (3.8), одновременно определяет количество информации, сохраняемой в упорядоченных структурах осмыслинного текста (как, впрочем, и в других структурированных системах):

$$\Delta Is = H_{\max} - H_p. \quad (3.9)$$

В практических задачах техники связи учет реальных значений вероятностей появления букв и их сочетаний при передаче письменных текстов позволяет уменьшить избыточность передаваемых сообщений. С другой стороны, с увеличением избыточности растет степень упорядоченности (предсказуемости) текста. В предельном случае полностью детерминированной передачи символов текста она выражается в повторение одних и тех же букв.

Нетрудно убедиться, что как в случае предельно хаотического текста ($H_p = H_{\max}$), так и в случае его предельной упорядоченности ($H_p = 0$) смысл сообщения утрачивается. Следовательно, для придания сообщению смысла необходимо обеспечить, с одной стороны, разнообразие символов, с другой — ограничение этого разнообразия определенными правилами (отбор на множество альтернатив).

Поэтому в классической (синтаксической) теории информации вводится принцип, согласно которому весь набор возможных сообщений «книга сообщений» задан (ограничен) и их смысл известен как для источника, так и для получателя сообщений. Роль такой «книги» в задачах секретной связи общезвестна, однако для нешифрованного обмена сообщениями принципиально ничего не меняется. Сообще-

ние, содержащее не знакомые для его получателя термины (понятия) не устраняет неопределенности.

Концепция «книги сообщений» в ходе своего развития привела к понятию *тезауруса*, которое легло в основу семантической теории информации. Тезаурус определяет степень полноты систематизированного набора понятий из предметной области информационного обмена. В практическом смысле тезаурус есть словарь, отражающий связи между понятиями определенного языка, предназначенный для поиска слов по их смыслу.

Необходимо отметить, что в рамках семантического подхода понятие энтропии сохраняет свою роль меры неопределенности, причем на более высоком уровне. При таком подходе *информация оказывается функцией сообщения и тезауруса получателя сообщения*.

Действительно, зачастую незнание даже одного термина оставляет полученное сообщение практически неопределенным для его получателя. Так, например, утверждение типа «футбольные команды высшей лиги не транзитивны» для лица, знакомого с термином «транзитивность», снимает неопределенность полностью. Если же этот термин получателю сообщения (собеседнику) неизвестен, то для него неопределенность снимается только относительно предметной области, и требуется дополнительное разъяснение (сообщение). Заметим, что читатель, желающий снять для себя неопределенность немедленно, может обратиться к разделу «Аксиомы теории полезности».

При вероятностном и объемном подходах предполагается, что количество информации линейно возрастает с увеличением длины сообщения (количества двоичных единиц). На самом же деле мы нередко получаем противоречивые, а иногда и взаимоисключающие сообщения. Оказалось, что энтропия может служить как минимум качественной мерой неопределенности таких сообщений.

Более того, изменение количества энтропии отражает развитие процесса научного познания. Устранение априорной неопределенности в процессе познания порождает информацию в форме знаний. При этом познающим субъектом осуществляется ограничение разнообразия (вариантов описания систем) по определенным правилам, выработанным научной методологией. Информация об объектах материального мира есть неопределенность, устранимая фактом существования того или иного объекта и проявляемая в наблюдаемой (и измеряемой) совокупности его свойств.

Но это не все. Наши научные знания, формализованные в виде определенных моделей, представляют собой цепь последовательных приближений. На определенных этапах познания происходит спон-

такое нарастание неопределенности, обусловленное обнаружением противоречий в рамках одной теории, между различными теориями, наконец, в масштабах парадигмы. Таким образом, в ходе познания неопределенность периодически существенно возрастает, т.е. наблюдается скачок энтропии в сторону ее увеличения. Единственным способом снятия (точнее, временного уменьшения) энтропии является генерация как можно более полного множества альтернативных гипотез (создание разнообразия) и планомерное сокращение этого разнообразия до единственной (оптимальной) гипотезы, способной на данном этапе познания снять противоречие.

В последующих разделах будут рассмотрены более подробно основные процессы преобразования сообщений и содержащейся в них информации. Такие процессы принято называть *информационными процессами*, и понятие энтропии является базовым при их описании и объяснении.

2. Прагматический подход

Для целенаправленных систем существенную важность составляет вопрос о том, насколько использование получаемых сообщений может способствовать достижению поставленной цели. *Ценность* информации (сообщений), наряду с ее количеством и смыслом, является одной из наиболее общих ее характеристик. Она интегрирует такие атрибутивные характеристики сообщений, как их существенность, актуальность, своевременность, доступность, достоверность, полнота, достаточность, точность и другие.

Рассмотрим в качестве примера роль такой характеристики, как своевременность. Сообщение, в котором содержится прогноз стихийного бедствия, обладает огромной неоспоримой ценностью, если оно получено своевременно, и никакой ценностью — после того как это бедствие состоялось.

Мера ценности сообщений (информации), предложенная и введенная А. А. Харкевичем, определена как изменение вероятности достижения цели при получении и использовании некоторого нового (дополнительного) сообщения:

$$I_u = \log P_1 - \log P_0 = \log (\log P_1 / P_0). \quad (3.10)$$

Здесь P_0 — начальная (до использования сообщения по назначению) вероятность достижения цели, P_1 — конечная (после использования сообщения) вероятность достижения цели.

Физический смысл логарифмической единицы ценности информации состоит в том, что информация ценностью в P единиц повышает вероятность достижения цели в $\log P$ раз.

При этом возникает как минимум три возможности.

1. Использование полученного сообщения по назначению не изменяет вероятности достижения цели ($P_1 = P_0$). Это означает, что ценность полученного сообщения равна нулю ($I_x = 0$). Считается, что такое сообщение несет *информационный шум*. Информационный шум, как правило, несет неактуальные, неточные и несвоевременные сообщения. Кроме того, информационный шум несет сообщения, семантика которых оказалась недоступной для получателя (недекодируемые сообщения).

2. Использование полученного сообщения по назначению изменяет ситуацию в худшую сторону, т.е. вероятность достижения цели уменьшилась ($P_1 < P_0$). Такое сообщение имеет отрицательную ценность ($I_x < 0$), оно несет *дезинформацию*. Источниками дезинформации являются в основном недостоверные сообщения, причем эта недостоверность нередко вносится умышленно для достижения определенных целей.

3. В результате использования сообщения вероятность достижения цели увеличилась (ситуация изменилась в положительную сторону), т.е. $P_1 > P_0$ и, следовательно, $I_x > 0$. В этом случае считается, что сообщение содержало *ценную (полезную) информацию*.

Подчеркнем, что ценность информации может быть измерена только после того, как сообщение получено, определен (с той или иной степенью соответствия) его смысл, принято и реализовано решение о его использовании по назначению и, наконец, установлен (измерен) результат его использования.

3.4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Информационным процессом принято называть любое преобразование (изменение) информационного объекта. В качестве рабочего определения примем следующее: *информационный процесс есть процесс преобразования сообщений, а также содержащейся в них и извлекаемой из них информации*.

Выделим основные виды информационных процессов. Классификация информационных процессов на основе принципа разбиения, как правило, нецелесообразна, поскольку они тесно связаны между собой. Поэтому, используя принцип покрытия, распределим множество информационных процессов на три подмножества:

- процессы обмена *сообщениями* — подмножество функций $\{f_o\}$;
- процессы *рутинного преобразования сообщений*, не затрагивающие их смысла (регистрация, хранение, поиск, выборка, копирование, тиражирование и т.п.) — подмножество $\{f_p\}$;

- процессы преобразования смысла сообщений, т.е. содержащейся в них информации — подмножество функций семантического преобразования $\{f_s\}$.

Указанные функции в разных соотношениях и в разной последовательности выполняются при осуществлении всех основных видов интеллектуальной деятельности, к которой в первую очередь относятся:

- научные исследования и инженерная деятельность;
- управление сложными системами;
- обучение.

Формализуем это положение:

$$\{f_n\} = \{f_o\} \cup \{f_p\} \cup \{f_e\}. \quad (3.11)$$

Здесь $\{f_i\}$ обозначает множество информационных процессов. Как отмечалось выше, в соответствии с принципом покрытия пересечение любой пары приведенных подмножеств не есть пустое множество.

Совершенно очевидно, что функции обмена сообщениями и их рутинного преобразования являются вспомогательными, а основной, безусловно, является функция семантического преобразования информации. Именно она обеспечивает порождение новой информации — решений по выдвижению научных гипотез, выбору управляющих воздействий и методов подачи учебного материала.

Преобразования, связанные с информационным обменом и рутинной обработкой сообщений, получили наименование *информационных задач*. Для их автоматизации разрабатываются и используются базы данных, информационно-справочные и информационно-поисковые системы.

Преобразования содержания информации на основе расчетов, исследования математических моделей и логических процедур, относящиеся к прерогативе ЛПР, принято называть *расчетно-аналитическими задачами*.

Еще одна группа преобразований содержания информации основана на использовании *эвристических процедур*, базирующихся на интуиции и опыте ЛПР (эксперта). Такие процедуры привлекаются для принятия решений в условиях высокой неопределенности и (или) дефицита времени, которым располагает ЛПР на принятие решения.

В сущности, речь идет о естественном разделении информационных объектов по способу снятия неопределенности на три группы.

К первой группе относятся ранее накопленные сведения, содержащие постоянную информацию, неопределенность которой обусловлена неполнотой или недостоверностью соответствующих сообщений. Не-

определенность такого рода снимается за счет выполнения функций обмена сообщениями $\{f_o\}$ и их рутинной обработки $\{f_p\}$.

Вторая группа включает информационные объекты, неопределенность которых снимается на основе выполнения функций принятия решений, т.е. преобразования их содержания посредством расчетных и логических процедур — соответственно подмножества $\{f_{pc}\}$ и $\{f_s\}$.

В третью группу принято выделять те информационные объекты, высокая неопределенность которых снимается на основе эвристических процедур или сокращенно эвристик $\{f_e\}$ — интуитивно выбираемых ЛПР волевых решений, не подкрепленных расчетными и логическими процедурами. В эвристических процедурах центр тяжести переносится на интуитивный выбор (подкрепленный опытом), выводы по аналогии, нечеткую логику, коллективную генерацию решений.

Очевидно, что совместно вторая и третья группы объединяют множество функций семантического преобразования информации, играющей среди информационных процессов ведущую роль. Формализуем это утверждение:

$$\{f_c\} = \{f_{pc}\} \cup \{f_s\} \cup \{f_e\}. \quad (3.12)$$

Применительно к сложным системам, как правило, для принятия решений приходится использовать сочетание всех трех типов процедур семантического преобразования информации. Качество решения будет существенно зависеть от вклада каждого из типов процедур. Действительно, неопределенность решений, снимаемая за счет решения информационных, логических и расчетных задач, может быть уменьшена до приемлемого минимума, что обеспечивает принятие *обоснованного решения*.

При снятии неопределенности (уменьшения априорной энтропии) на основе использования эвристик сохраняется остаточная неопределенность принимаемого решения $H_{ост}$. Решения такого рода принято называть *эвристическими или экспертными решениями*. Очевидно, что большинство решений, принимаемых в практике человеческой жизнедеятельности множеством индивидуальных ЛПР, относится именно к числу эвристических решений. На осознании этого факта сложилось такое направление системного анализа (исследования), как *теория полезности*. Структурно теория полезности представляет раздел теории принятия решений, возникшей на пути формализации и алгоритмизации уникального и далеко еще не полностью познанного феномена мышления.

3.5. СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Современное общество характеризуется высочайшей интенсивностью процессов обмена сообщениями. Только в России аудитория интернет-пользователей сегодня составляет около 90 млн человек. Прирост интернет-аудитории происходит за счет все более активного использования мобильных устройств.

В корпоративной среде набирает обороты новая инфраструктурная модель — корпоративная мобильность (Enterprise Mobility). Она дает возможность сотрудникам предприятий получить повсеместный и безопасный доступ к корпоративным информационным ресурсам и Интернету с мобильных устройств. Ключевой услугой при этом остается обмен сообщениями разных типов: SMS, MMS, E-mail, IM. Сервис сообщений востребован, о чем свидетельствует положительная динамика доходов и трафика во всем мире.

Однако сегодня все более очевидной становится тенденция к росту объема циркулирующих в обществе недостоверных сообщений. К тому же многие сообщения оказываются неактуальными и (или) несвоевременными для большинства их потенциальных потребителей.

В этой связи целесообразным является проведение системного анализа информационных (телекоммуникационных) процессов с точки зрения лица, принимающего решение (ЛПР), стремящегося использовать актуальные и своевременные сообщение для принятия решения в условиях неполной определенности.

Будем, придерживаясь прагматического подхода теории информации, рассматривать информацию как меру снятия неопределенности для достижения цели. Такое определение позволяет абстрагироваться от статистического подхода к оцениванию количества информации, концентрируя внимание на выявлении семантики сведений, составляющих сообщение, а также установления ценности этих сведений с точки зрения принятия решения относительно их использования по назначению.

Очевидно, что в общем случае разные индивиды, потенциально выступающие в роли ЛПР, по-разному декодируют и интерпретируют одно и то же сообщение, что приводит к принятию различных решений относительно целесообразности использования по назначению сведений, которые это сообщение содержит.

В принципе, практически любое сообщение конечного объема, переданное на естественном или формализованном языке и принятое без искажений в канале связи, содержит некоторую *остаточную неопределенность*. Иными словами, принятое сообщение в общем случае содержит в определенных соотношениях:

- информацию (достоверные сведения);
- информационный шум (неактуальные, несвоевременные, не декодируемые и тривиальные сведения);
- дезинформацию (сознательно и (или) неумышленно внесенные недостоверные сведения).

Рассмотрим цикл процесса управления, в котором ЛПР получает исходящее из объекта управления (ОУ) сообщение о его состоянии, принимает на его основе решение и направляет к объекту управления сообщение, несущее управляющее воздействие (командное сообщение).

Формально исходящее сообщение представим в виде:

$$S_{\text{исх}} = K_a \cup K_w \cup K_d \quad (3.13)$$

где $S_{\text{исх}}$ — полный состав исходящего сообщения, K_a — информационный компонент, K_w — шумовой компонент, K_d — дезинформационный компонент.

В процессе декодирования и интерпретации принятого сообщения в него вносится со стороны ЛПР дополнительная неопределенность, обусловленная:

- неадекватным декодированием содержания сообщения;
- ошибочной или неточной интерпретацией (искажением) смысла декодируемого сообщения. Тогда состав принятого сообщения:

$$S_{\text{пр}} = K_a^* \cup K_w^* \cup K_d^*, \quad (3.14)$$

где $S_{\text{пр}}$ — полный состав принятого сообщения в результате его декодирования и интерпретации, K_a^* — адекватно зафиксированный ЛПР информационный компонент, K_w^* — результирующий шумовой компонент, K_d^* — результирующий дезинформационный компонент.

В общем случае результирующий шумовой компонент имеет вид:

$$K_w^* = K_w \cup K_{\text{адек}} \cup K_{\text{ошиб}}, \quad (3.15)$$

где $K_{\text{адек}}$ и $K_{\text{ошиб}}$ — шумовые компоненты, внесенные ЛПР вследствие неадекватного декодирования сообщения и неточной интерпретации его семантики соответственно.

В свою очередь результирующий дезинформационный компонент

$$K_d^* = K_d \cup K_{\text{адек}} \cup K_{\text{ошиб}}, \quad (3.16)$$

где $K_{\text{адек}}$ и $K_{\text{ошиб}}$ — дезинформационные компоненты, внесенные ЛПР приемника вследствие ошибочного декодирования сообщения и искажающей интерпретации его семантики соответственно.

Тогда принятое ЛПР сообщение после его декодирования и интерпретации имеет следующий состав:

$$S_{np} = K_u^* \cup (K_w \cup K_{\text{шум}} \cup K_{\text{анн}}) \cup (K_d \cup K_{\text{дек}} \cup K_{\text{дакн}}). \quad (3.17)$$

Очевидно, что в общем случае $K_u \geq K_u^*$, т.е. в силу возрастания шумовой и дезинформационной составляющих ЛПР в лучшем случае может лишь не ухудшить условия адекватного принятия решения.

В реальной практике возможна ситуация, когда ЛПР с квалификацией эксперта может выявить паразитные компоненты и не только не принимать их во внимание, но и дополнить информационный компонент сообщения собственными знаниями. Однако знания эксперта есть не что иное, как *априорная информация*, независимая от сообщения. Само же сообщение, как нетрудно видеть, в таком случае тезаурус ЛПР нисколько не расширяет.

Представляется целесообразным оперировать понятием *оптимальной интерпретации семантики сообщения*, поскольку цель ЛПР состоит в извлечении из него исключительно достоверных сведений (информации), в то время как наличие в сообщении шума и недостоверных сведений (дезинформации) играет роль ограничений для достижения этой цели. Тем самым ставится задача оценивания совокупности характеристик сообщения, определяющих обобщенный показатель его качества как отношение доли (объема) его информационного компонента к общему составу сообщения.

Совершенно очевидно, что управлеченческое решение представляет собой информационный объект, который в большинстве случаев синтезируется (формулируется) в виде определенного сообщения, характеризуемого (обладающего) вполне определенной семантикой.

В случаях, когда речь идет об управлении в организационных и, тем более, в иерархических системах, вряд ли удастся обеспечить другую возможность доведения управлеченческого решения до объекта управления (ЛПР нижестоящего уровня иерархии) кроме как путем передачи по тому или иному каналу связи соответствующего сообщения (командной информации).

3.6. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Принятие решения представляет собой состоявшийся выбор на множестве альтернатив (множестве возможных действий) в конкретной ситуации. Напомним, что в теории систем под ситуацией понимается состояние исследуемой системы и окружающей среды (надсистемы),

сложившееся к определенному моменту времени в результате внешних воздействий.

Необходимость выбора возникает в проблемной ситуации, т.е. при наличии противоречия между состояниями системы и среды. Поскольку в рамках системного подхода любой объект, явление или процесс рассматривается как сложная система, движущаяся к некоторой заранее определенной или объективно существующей цели, то речь идет о выборе на каждом шаге этого движения воздействий, определяющих дальнейшую траекторию системы.

Таким образом, выбор определяет действие на систему, которое придает целенаправленность динамике ее развития. Весьма существенно, что возврат к ситуации, предшествовавшей выбору, в реальных условиях, как правило, оказывается невозможным (выход из точки бифуркации необратим). Это обстоятельство определяет исключительную важность выбора «правильного», т.е. *наилучшего* в данной ситуации решения.

Так в чем же состоит секрет правильного выбора, как алгоритмически описать процесс его нахождения? Как нельзя, кстати, в качестве ответа здесь уместен известный архаизм «Сие тайна великая есть!».

Современный подход практики принятия (выбора) решений основан на гармоничном сочетании способности человека к решению неформализованных задач и возможностей математических методов и инструментальных средств поддержки принятия решений (СППР).

Рассмотрим модель общей задачи принятия решений, реализующей функцию семантического преобразования информации в терминах теории принятия решений. Выбор, как операция на множестве альтернатив, возможен при условии наличия того или иного способа сравнения альтернатив, позволяющего выявить наиболее предпочтительную альтернативу. А для этого необходимо иметь соответствующий *критерий*. Следует отметить, что сложность моделирования задач принятия решений обусловлена их большим разнообразием.

К тому же вариативность задачи принятия решения определяется возможностью осуществления как индивидуального, так и группового выбора, различной степенью согласованности решений при групповом выборе, наконец, распределением ответственности за принятое решение.

К основным формальным понятиям теории принятия решений относятся:

- X — универсальное множество всех возможных альтернатив, на котором может быть произведен выбор;
- Y — множество альтернатив, предъявляемое для выбора (так называемое предъявление);

- Z — множество выбранных альтернатив, в частности одна альтернатива;
- Φ — правило порождения альтернатив
- Ψ — принцип выбора — правило, согласно которому производится выбор наилучшей альтернативы.

В зависимости от степени формализации этих понятий различается три типа задач принятия решений (см. табл. 3.1)

Таблица 3.1

Типы задач принятия решений

Универсальное множество альтернатив	Принцип выбора	Тип задачи принятия решения
Однозначно определено	Строго формализован	Оптимальный выбор
Однозначно определено	Не формализован	Рациональный выбор
Может дополняться	Не формализован	Эвристический выбор

1. *Задача оптимального выбора* может быть решена при условии, что множество альтернатив X однозначно определено и принцип выбора строго формализован, т.е. ситуация является детерминированной. Это позволяет применять для решения аналитические методы или методы исследования операций. Получаемые в этом случае решения являются объективно наилучшими для заданных условий, поэтому их выбор не зависит от предпочтений или предубеждений ЛПР.

Следует, однако, иметь в виду, что при изменении условий, способном повлиять на вид аналитической модели, решение становится неоптимальным. Поэтому далеко не все реальные задачи выбора удается привести к данному виду из-за невозможности полного учета динамики всех существенных факторов. Область применения методов оптимизации в основном ограничена решением задач управления техническими системами.

2. *Задача рационального выбора* возникает в случае, когда множество альтернатив X однозначно определено, но принцип выбора Ψ не поддается строгой формализации, что нередко имеет место в реальной практике. В этом случае выбор зависит от того, какими критериями будет пользоваться ЛПР. В частности, если имеется возможность определить или хотя бы оценить вероятность того, что выбранная альтернатива окажется наилучшей, то объективно мыслящее ЛПР имеет возможность принять разумное, т.е. рациональное решение. Если распределение вероятностей неизвестно, то ЛПР, руководствуясь своей системой предпочтений, будет стремиться выбрать наиболее полезное решение.

3. Общая задача принятия решения характерна для случаев, когда имеется необходимость разрешения сложных проблем в изменяющихся условиях. Множество альтернатив X в таких случаях может пополняться и видоизменяться, а принцип выбора Ψ не может быть formalized. При этом под общей задачей принятия решения (ОЗПР) понимается такая проблемная ситуация, когда необходимо вначале сформировать множество альтернатив, предъявляемых для выбора, затем выделить из него некоторое подмножество лучших альтернатив (так называемое множество Парето), из которого и будет выбрана альтернатива, которую ЛПР оценил как наилучшую. Для сравнительного оценивания качества альтернатив ЛПР должен определить принцип или решающее правило выбора.

3.7. УСЛОВИЯ СИТУАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В практике принятия решений приходится иметь дело со стохастическими процессами двух типов: когда известен закон распределения вероятностей (будем называть его стохастическим процессом 1 типа) и когда закон распределения вероятностей ЛПР не известен либо отсутствует, т.е. события равновероятны (стохастический процесс 2 типа).

В случае, когда имеет место стохастический процесс 2 типа, процедура принятия решения зависит от того, существует ли в принципе неизвестный ЛПР закон распределения вероятностей. Если закон распределения все-таки существует, то неопределенность может существенно уменьшить эксперта — опытный, высококвалифицированный специалист в соответствующей предметной области. Зная неизвестный ЛПР закон распределения вероятностей, он сможет предложить рациональное решение на основе вероятностной модели. Отметим, что отсутствие закона распределения на практике соответствует равномерному распределению вероятностей, которое, как правило, имеет искусственную природу, а реальные процессы в большинстве случаев характеризуются нормальным распределением.

Связем различные виды задач принятия решений с условиями, в которых производится выбор решения.

Таблица 3.2

Зависимость типов решений от условий их принятия

Условия	Определенности	Риска	Неопределенности
Процесс	Детерминированный	Статистический 1 типа	Статистический 2 типа
Модель	Аналитическая	Вероятностная	Неформализуемая
Процедуры	Расчетные	Логические	Эвристические
Решение	Оптимальное	Рациональное	Экспертное

Формальную модель общей задачи принятия решения принято представлять в виде кортежа:

$$\text{ОЗПР}: < T, I_{\text{ст}}, I_{\text{ макс}}, I_{\text{ выб}}, \Phi, \Psi >, \quad (3.18)$$

где T — цель принятия решения, например выбор альтернативы или упорядочение (ранжирование) альтернатив;

$I_{\text{ст}}$ — исходные данные для порождения альтернатив;

$I_{\text{ макс}}$ — множество порожденных альтернатив, предъявляемое для выбора;

$I_{\text{ выб}}$ — выбранная альтернатива;

Φ — принцип (правило) порождения альтернатив;

Ψ — принцип (правило) выбора наилучшей альтернативы.

Исходные данные для порождения альтернатив, а также множество порожденных альтернатив в общем случае могут содержать детерминированные, вероятностные и неопределенные сведения.

Правила порождения и выбора альтернатив могут быть представлены в форме аналитических выражений, логических и эвристических решающих правил, основываться на скалярных, векторных и комбинированных критериях.

Поскольку ОЗПР относится к наиболее слабоструктурированным задачам, для их решения создаются методы логико-лингвистического моделирования в рамках новой, развивающейся научной дисциплины — инженерии знаний.

Согласно действующей теории принятия решений люди являются так называемыми *рациональными оптимизаторами*. Это означает, что при решении проблемы выбора рассматриваются все возможные варианты, соответствующие им вероятности, ожидаемая полезность и отбирается вариант с максимальной ожидаемой полезностью. В реальности, однако, к рассмотрению принимаются далеко не все возможные варианты решений. Более того, даже при наличии полной информации для принятия решения, как правило, точно рассчитать вероятности вариантов оказывается невозможным.

Необходимо признавать, что многие решения принимаются интуитивно, т.е. на уровне подсознания. Дело в том, что ежедневно каждый из нас сталкивается с необходимостью выбора несколько тысяч раз. В основном это касается повседневных мелочей, когда мы даже не фиксируем факт принятия решения, однако и при выборе важных решений интуитивные, эвристические процедуры играют далеко не последнюю роль, особенно когда время на принятие решения ограничено. То, что мы называем интуицией, относится к скрытым (латентным) структурам сознания, которые могут не осознаваться. Выявлением таких скрытых знаний занимается *психосемантика*.

Эвристические процедуры невозможно обосновать логически или измерить количественно, они не поддаются формализации. Тем не менее анализ показывает, что они опираются на определенные эвристические правила, позволяющие принимать многие решения быстро и с минимальными мыслительными усилиями. Так, эвристический *принцип разумной достаточности* побуждает остановиться на первом из вариантов, удовлетворяющих или превосходящих ожидания, или, иными словами, отвечающих критерию пригодности. В свою очередь, *принцип опознавательной эвристики* подсказывает нам выбрать знакомое, типовое решение при недостатке информации.

Здесь уместно обратиться к проблеме преемственности научных теорий (методологический принцип соответствия Н. Бора). Согласно научной методологии в тех случаях, когда принятая теория оказывается не в состоянии объяснить то или иное новое открытие, возникает проблема выбора продуктивной гипотезы, способной лежать в основу новой теории. Исторический опыт показывает, что проверенные, знакомые подходы здесь оказываются неприемлемыми, т.е. опознавательная эвристика оказывается непригодной. Значит, необходимо «сгенерировать» нестандартную, инновационную идею, и на ее поиск уходят порою многие годы.

Тем не менее принимается первая же гипотеза, удовлетворяющая ожидание устранения противоречия, и только с осознанием очередного противоречия, выявленного очередным открытием, проблема нахождения удовлетворительной теории снова встает со всей остротой.

Так, например, волновая теория света, основанная на концепции продольных волн в упругой среде (Х. Гюйгенс, 1690), дала объяснение явлением дифракции и интерференции, с которыми не смогла «справиться» прежняя — корпускулярная теория. Тем не менее она оказалась неадекватной природе, нуждаясь в так называемом светоносном мировом эфире, от которого наука в дальнейшем отказалась.

Однако только во второй половине 19 века был найден подход к построению теории поперечных электромагнитных волн (Дж. К. Максвелл, 1869), давшей исчерпывающее объяснение всех макроскопических световых явлений. Но и она оказалась не в состоянии объяснить фотозелектрический эффект (Г. Герц, 1887), выходящий за пределы области ее применимости. Что же касается объяснения квантовой природы фотозефекта, адекватная гипотеза была найдена только через тринацать лет (М. Планк, 1900), а теория фотозелектрического эффекта построена и того позднее (А. Эйнштейн, 1905). Что же касается концепции корпускулярно-волнового дуализма материи, то она сложилась уже к концу 20-х годов 20 века.

Как видим на этом примере, в ходе научного поиска альтернативные гипотезы рассматриваются и отбраковываются по мере их возникновения и решение о принятии гипотезы во многих случаях принимается на основе принципа разумной достаточности. Другими словами, из множества принятых к рассмотрению гипотез выбирается первая, не противоречащая известным опытным данным.

Мы вернемся к положениям теории принятия решений при обсуждении проблемы выбора в системном анализе.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Как связаны между собой понятия «сигнал», «сообщение» и «информация»?
2. Дайте определение понятия «энтропия».
3. Какой смысл имеет энтропия в термодинамике?
4. Назовите основные свойства сообщений.
5. Что означает термин «семантика»?
6. Как определяется ценность информации?
7. Какие сообщения несут информационный шум?
8. Какие сообщения несут дезинформацию?
9. На каком принципе основано измерение количества информации?
10. В чем состоит смысл мер Хартли и Шеннона?
11. Дайте определение информационного процесса.
12. Какой процесс называется детерминированным?
13. Какие преобразования называются рутинными?
14. В чем состоят функции обмена сообщениями?
15. Перечислите основные функции семантического преобразования информации.
16. Какие процессы называются стохастическими?
17. Какие процедуры называются эвристическими?
18. Как формализуется общая задача принятия решения?
19. В каком случае экспертное решение эффективнее случайного выбора?
20. Назовите классы задач принятия решений.

ГЛАВА 4

СИСТЕМЫ С УПРАВЛЕНИЕМ

4.1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ С УПРАВЛЕНИЕМ

Под управлением в наиболее общем виде будем понимать процесс обеспечения целенаправленного *поведения* реальной системы последовательностью управляющих информационных воздействий, производимых человеком или устройством.

Нередко в литературе друг другу противопоставляются системы с управлением и без управления. При этом имеется в виду, что искусственные системы отличаются от природных систем наличием цели функционирования (назначением) и осуществлением управления. Однако, по нашему мнению, при более общем взгляде на проблему следует принимать во внимание существование в природе (по крайней мере, в живой природе) эволюционной цели (адаптация с целью выживания, сохранение и усложнение структуры, т.е. самоорганизация) и управления поведением как средства достижения этой цели.

Сошлемся в частности на название основополагающей работы Н. Винера «Управление и связь в живом организме и машине». Связи в природных системах обеспечиваются четырьмя известными фундаментальными взаимодействиями (гравитационным, электромагнитным, сильным и слабым), и пример Солнечной системы демонстрирует управление упорядоченным поведением ее подсистем посредством гравитационного взаимодействия.

Современная практика работы со сложными системами идет по пути разработки автоматизированных *информационных систем*, являющихся эффективным инструментом повышения обоснованности и оперативности управленческих решений. Под информационной системой будем понимать систему сбора, обработки и передачи информации в целях управления. В терминах теории систем информационную систему можно определить как совокупность элементов вывода, хранения, обработки, поиска, вывода и распространения информации, связанных между собой и составляющих определенное целостное единство.

К основным задачам управления относятся целеполагание, стабилизация, выполнение программы, слежение, оптимизация и адаптация.

Задача целеполагания состоит в определении требуемого поведения или состояния системы.

Задача стабилизации сводится к удержанию системы в требуемом состоянии в условиях возмущающих воздействий.

Задача выполнения программы заключается в последовательном переводе системы в требуемые состояния в условиях, когда значения управляемых величин изменяются по детерминированным законам.

Задача слежения представляет собой удержание системы на заданной траектории (обеспечение требуемого поведения системы) в условиях, когда изменение управляемых параметров носит случайный характер.

Задача оптимизации направлена на перевод системы в состояние с экстремальными значениями характеристик (удержание ее в этом состоянии) при заданных условиях и действующих ограничениях.

Задача адаптации состоит в приспособлении системы к изменяющимся условиям окружающей среды (обстановки) путем адекватного изменения своей структуры и поведения.

Как следует из этих определений, все задачи управления предполагают функционирование реальных систем в реальных условиях внешней среды, накладывающей на требуемое поведение системы те или иные ограничения. Поэтому для эффективного управления необходимо располагать как можно более полной информацией о поведении внешней среды, порождающей, в том числе, стохастические неуправляемые воздействия.

Структура любой системы с управлением включает три обязательные подсистемы (рис. 4.1): управляющую систему (УС), объект управления (ОУ) и систему связи (СС). Управляющая система вместе с системой связи образует систему управления (СУ). Система связи включает канал прямой связи, по которому на входы объекта управления поступает командная информация (управляющие воздействия), и канал обратной связи, по которому на входы управляющей системы поступает информация (сообщения) о состоянии объекта управления в виде его выходных сигналов. Наличие замкнутой петли обратной связи является обязательным.

Кроме того, объект управления взаимодействует с окружающей средой, которая создает различного вида помехи и ограничения и сама испытывает воздействие объекта управления. В общем случае в управляющую систему поступает только часть информации о состоянии объекта управления и воздействиях на него окружающей среды.

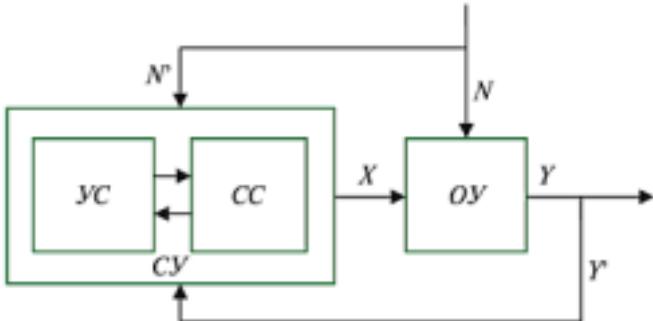


Рис. 4.1. Структура системы с управлением

Пусть $X=\{x\}$ — множество управляющих сигналов, $Y=\{y\}$ — множество выходных сигналов ОУ, $N=\{n\}$ — множество неуправляемых воздействий внешней среды на ОУ, $Y'=\{y'\}$ — подмножество сигналов о состоянии ОУ, поступающее в УС, $N'=\{n'\}$ — подмножество сигналов о воздействиях внешней среды, поступающее в УС.

Очевидно, что множество $Y=\{y\}$ непосредственно связано с множеством $Z=\{z\}$ внутренних состояний ОУ. При этом нет никаких гарантий, что эта связь носит однозначный характер. Действительно, рассмотрение ОУ в качестве «черного ящика» говорит о том, что один выходной сигнал может отражать разные его внутренние состояния с учетом состояний обстановки. Так, например, если автомобиль «ведет», скажем, влево на сухом асфальте и на льду, то водителю требуется выполнить совершенно разные управляющие воздействия в зависимости от состояния обстановки. С другой стороны, разные выходные сигналы могут отражать одно и то же внутреннее состояние управляемой системы.

Управляющая система создается для реализации задач целеполагания, стабилизации, слежения, выполнения программы, оптимизации и адаптации путем воздействия на объект управления и (или) изменения результатов воздействия внешней среды в каждом цикле управления. Объект управления создается для использования по назначению, т.е. выполнения определенной функции с определенными целями.

Что касается системы связи, то ее роль состоит в обеспечении контура обратной связи, суть которой — получение УС информации о состоянии ОУ и его изменение в соответствии с целями управления. Здесь необходимо особо подчеркнуть следующее обстоятельство. На вход УС по контуру обратной связи поступают выходные сигналы ОУ. На основании этих сигналов ЛПР УС необходимо сделать вывод относительно соответствующих им внутренних состояний ОУ. В этом состоит обратная

задача управления: определение внутреннего состояния ОУ, породившего наблюдаемый выходной сигнал.

4.2. АКСИОМЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

При всем разнообразии задач управления для их успешной реализации необходимо выполнение ряда естественных условий, которые сформулированы в виде аксиом.

Аксиома 1. Наличие цели управления. Под целью управления понимается тот набор характеристик ОУ, который определяет его требуемое состояние к моменту окончания процесса управления. Цель управления формулируется в результате выполнения процедур целеполагания, относящихся к наиболее сложным и ответственным функциям УС. В случае неопределенной цели управление не имеет смысла, поскольку будет представлять собой случайное блуждание в пространстве состояний ОУ. Считается, что чем точнее и определеннее поставлена цель управления, тем более эффективным будет сам процесс управления.

Аксиома 2. Наличие наблюдаемости объекта управления. В теории управления принято следующее положение: ОУ считается наблюдаемым в состоянии $z(t)$ на множестве моментов времени $T = \{t\}$ при входных воздействиях $X = \{x(t)\}$, если уравнение наблюдения динамической системы (2.4), записанное в виде

$$y^*(t) = g[x(t), z^*(t), t], \quad (4.1)$$

где $y^*(t)$ — определенная реализация выходного сигнала ОУ, доступная для регистрации).

имеет единственное решение

$$z^*(t) = z(t) \in Z. \quad (4.2)$$

При выполнении этого условия для всех $z(t) \in Z$ объект управления считается полностью наблюдаемым. Такая формулировка означает, что определение любого из возможных состояний ОУ возможно только в том случае, если при известных значениях входных переменных $x(t)$ по результатам измерения выходных переменных $y^*(t)$ может быть получена однозначная оценка любой переменной внутреннего состояния $z(t)$.

Такая задача, называемая *задачей наблюдения*, реализуется за счет выполнения функции контроля текущего состояния ОУ по контуру обратной связи. Отметим, что в общем случае входные сигналы (переменные) ОУ содержат как управляемые (командные) сигналы, так и неуправляемые воздействия внешней среды.

Аксиома 3. Наличие управляемости ОУ, т.е. его способности передавать в пространстве состояний Z под управляющим воздействием со стороны УС из любого текущего состояния в требуемое состояние. Речь идет не только об изменении параметров функционирования ОУ, но также и об изменении его структуры, алгоритма и закона функционирования и других свойств. Если ОУ может оказаться в состоянии, из которого УС не сможет его вывести, не располагая необходимым управляющим воздействием, то принято говорить о потере управляемости.

Аксиома 4. Наличие у ЛПР УС свободы выбора управляющих воздействий (решений) на определенном множестве допустимых альтернатив. Ограничение множества управляющих воздействий ведет к снижению эффективности управления, поскольку возрастает вероятность, что оптимальные воздействия окажутся за пределами области допустимых решений.

Если указанное множество ограничено одной альтернативой, то управление не требуется. Если принимаемые решения не влияют на состояние ОУ, то управление отсутствует.

Аксиома 5. Наличие ресурсов управления, обеспечивающих реализацию принятых решений. Речь идет о самых разнообразных ресурсах — материальных, финансовых, кадровых (трудовых), а также интеллектуальных, информационных, вычислительных и других. В частности, известно понятие административных ресурсов. Особый вид ресурсов составляет время, отводимое на достижение цели управления. Недостаток ресурсов или их нерациональное использование, как правило, оборачиваются невыполнением поставленных задач. Статистика, в частности, свидетельствует: около двух третей инвестиционных проектов не укладываются либо в отведенное время, либо в бюджет, либо ни в то, ни в другое. Без ресурсов управление невозможно.

Отметим, что эта аксиома смыкается с аксиомой свободы выбора, ибо отсутствие ресурсов равносильно отсутствию свободы выбора. Поэтому неудивительно, что в человеческом обществе доступные ресурсы определяют выбор рода деятельности.

Аксиома 6. Наличие критерия эффективности управления. Наиболее общим (и естественным) критерием эффективности управления (определенной качеством принимаемых решений) является степень достижения цели функционирования системы. В случае, когда цель относится к числу качественных целей, т.е. существует только две альтернативы (либо цель достигнута, либо не достигнута), естественный критерий — это сам факт достижения цели.

4.3. ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

К числу систем с управлением или целенаправленных систем будем относить биологические, технические, организационные, социальные и экономические системы. Особое внимание будем уделять рассмотрению организационно-технических систем, представляющих собой совокупность техники и людей, объединенных для достижения определенных целей. Важнейшим элементом организационно-технических систем управления является *лицо, принимающее решение (ЛПР)* — человек или группа людей, имеющих полномочия для окончательного выбора управляющего воздействия из множества возможных, или иными словами для принятия решения на множестве альтернатив.

Лицо, принимающее решение выполняет функцию преобразования содержания информации о состоянии ОУ и окружающей среды в управляющую информацию, т.е. порождения в каждом цикле управления новой информации на основе решения логических задач, выполнения расчетных и эвристических процедур. Эта группа функций, безусловно, является главной в управлении, она связана с расходованием интеллектуальных ресурсов и времени. Поэтому автоматизация функций ЛПР представляет наибольшую сложность и имеет первоочередную важность.

Множество функций управления связано с преобразованием информации и, как уже отмечалось, естественным образом делится на три подмножества:

- функции преобразования содержания информации или принятия решений $\{f_c\}$;
- функции обмена информацией $\{f_o\}$;
- рутинные функции обработки информации $\{f_p\}$.

Функции принятия решений $\{f_c\}$ состоят в последовательном преобразовании содержания информации о текущей ситуации (состоянии ОУ и окружающей среды) в информацию о требуемой ситуации, созданную путем выбора на множестве альтернатив. Такое преобразование часто называют *семантическим*.

Подмножество функций $\{f_o\}$ связано с регулярным обменом информацией между УС и ОУ по каналу обратной связи, в частности, с доведением принятых решений и получением сведений о состоянии системы и окружающей обстановки.

Группа функций $\{f_p\}$ включает учет (регистрацию), хранение, тиражирование, поиск, каталогизацию информации (сообщений). Она связана исключительно с преобразованием формы ее представления, но не содержания.

Циклом управления будем называть совокупность функций управления, выполняемых при каждом изменении ситуации (состояния ОУ и внешней среды) т.е. от одного управляющего воздействия до другого. Последовательно выполняя один цикл управления за другим, УС приближает ОУ к поставленной цели.

Совершенствование систем с управлением требует сокращение времени на принятие решения, т.е. сокращение длительности цикла управления и повышение качества принимаемых управляющих решений, т.е. их соответствие состоянию ОУ. Эти требования носят *противоречивый* характер, поскольку сокращение времени на принятие решения ограничивает количество принимаемой во внимание информации и, следовательно, увеличивает вероятность принятия неоптимального решения. Разрешение этого противоречия возможно только путем существенного повышения производительности УС в части передачи и переработки информации.

С возрастанием сложности современных систем с управлением количество информации, подлежащей переработке, растет нелинейно, притом, что скорость обработки информации человеком весьма ограничена. Стало очевидным, что увеличение численности персонала с целью повышения эффективности управления полностью себя исчерпало. Для координации работы необходим специальный аппарат, возникают потоки информации внутри аппарата, на их обслуживание требуются дополнительные исполнители. В результате оперативность управления не только не возрастает, но зачастую падает.

Такие приемы, как применение новых методов решения управленческих задач, изменение структуры систем управления, перераспределение функций управления, механизация управленческого труда также показали ограниченность своих возможностей. Дело в том, что они, в основном, позволяют повысить эффективность выполнения функций обмена информацией и ее рутинной обработки. Безусловно, сокращение времени на сбор, поиск, прием и передачу информации, преобразования ее формы, защиту от помех и других воздействий способствует *повышению оперативности управления*.

Однако основным в задачах управления остается *повышение степени научной обоснованности принимаемых решений*. Именно необходимость повышения производительности выполнения творческих процедур с настоящейностью требует их автоматизации. Применение математического аппарата в ходе анализа и прогнозирования развития ситуации для принятия решения во многих задачах позволяет находить оптимальные или, по крайней мере, рациональные решения, но требует значительных интеллектуальных и временных затрат. Поэтому *снижение трудозатрат*

ЛПР на выполнение трудоемких расчетных процедур позволяет сосредоточить внимание на творческих процессах управления и обеспечить тем самым своевременность принятия решений.

Следовательно, насущная необходимость автоматизации управления на базе современных информационных систем, обусловленная стремительным усложнением систем с управлением, носит объективный характер. Однако, являясь, пожалуй, наиболее востребованным, этот путь связан с преодолением значительных трудностей. Базируясь на системной методологии, он требует отказа от общепринятых стандартов мышления и существенного повышения уровня образования общества.

4.4. ПРИНЦИП НЕОБХОДИМОГО РАЗНООБРАЗИЯ

Принцип необходимого разнообразия (или коротко — принцип Эшби) сформулирован одним из пионеров кибернетики Уильямом Россом Эшби. Этот принцип составляет одно из основополагающих положений теории систем. Он применим к весьма широкому кругу информационных процессов, протекающих в иерархических системах. Широкую известность принцип Эшби получил благодаря образной формуле: «Только разнообразие может уничтожить разнообразие».

Действие принципа Эшби распространяется на все информационные процессы исследования, инженерной деятельности, обучения и, конечно же — на процессы управления. Речь идет обо всех процессах функционирования систем с контуром обратной связи, по которому идет обмен сообщениями, и далее — их интерпретация и выбор целенаправленных воздействий на нижестоящую подсистему.

Рассмотрим смысл принципа необходимого разнообразия применительно к управлению. Сформулированные положения естественным образом могут быть распространены на другие информационные процессы.

Из аксиом теории управления следует, что процесс управления заключается в ограничении разнообразия состояний управляемой системы посредством ее перевода в требуемое состояние в каждом цикле управления. Иными словами, при выборе управляющего воздействия из множества возможных альтернатив снимается априорная неопределенность относительно результата выбора. Это означает, что при идеальном управлении в УС неопределенности относительно состояний ОУ быть не должно, и ОУ должен находиться в определенном (требуемом) состоянии с вероятностью, равной единице.

Поскольку в качестве меры неопределенности выступает энтропия, то снятие неопределенности относительно очередного состояния ОУ

соответствует равенство нулю энтропии относительно его состояний, т.е. $H(Y)=0$.

Если ОУ характеризуется для простоты одним показателем u , принимающим значения $y_1, y_2, \dots, y_p, \dots, y_n$, то принятое в УС сообщение о том, в каком именно состоянии z находится ОУ, согласно формуле Шеннона (3.5), содержит количество информации, равное снятой (устраненной) энтропии (для ЛПР УС):

$$H(Y) = -\sum P(y_i) \log_2 P(y_i) \quad (4.3)$$

Энтропия $H(Y)$ является в данном случае мерой *априорной* неопределенности для ЛПР УС относительно состояния ОУ. Чем больше количество возможных состояний ОУ и чем меньше различие вероятностей их реализации, тем она больше. В случае, когда для ОУ возможно *п* равновероятных состояний $P(y)=1/p$, т.е. энтропия принимает максимальное значение $H(Y_{\max}) = \log_2 p$.

После получения от ОУ сообщения о его реальном состоянии (по контуру обратной связи) неопределенность относительно его состояния в УС уменьшается, и количество информации, полученное УС определяется как разность:

$$I(Y) = H(Y) - H(Y/X), \quad (4.4)$$

где $H(Y/X)$ — *апостериорная* (остаточная) энтропия состояния УС после поступления на ее вход сообщения (управляющего воздействия) с выхода ОУ.

В случае, когда поступившее сообщение полностью характеризует состояние ОУ, то вся априорная неопределенность снимается, т.е. $H(Y/X) = 0$. При этом сообщение приносит количество информации, равное $H(Y)$, т.е. снятой энтропии.

В практике управления поступление в ОУ информации о состоянии ОУ обеспечивается посредством функции *контроля*. В реальных технических системах эта функция выполняется с помощью разнообразного контрольно-измерительного оборудования, размещенного в ОУ. Далее необходимое изменение состояния ОУ производится либо человеком (оператором), либо в автоматическом режиме.

Представьте себя за рулем автомобиля в движении. Информацию, необходимую для управления им, вы получаете благодаря постоянному контролю состояния и самого автомобиля, и обстановки (окружающей среды). Каждый поворот руля, каждое торможение или ускорение — результат вашего выбора на множестве альтернативных решений. Сколько

подобных решений принимает каждый из нас ежедневно и ежечасно? Статистика отвечает: до десяти тысяч ежедневно!

В организационных и организационно-технических системах функция контроля состояния ОУ организуется с помощью подсистемы связи и реализуется посредством обмена сообщениями между ЛПР УС и подчиненным ЛПР ОУ, который обеспечивает подготовку и передачу сообщения с установленной периодичностью, либо по запросу ЛПР УС. Тот, в свою очередь, принимает решение о переводе ОУ в требуемое состояние и доводит его до ЛПР ОУ. Ясно, что если ОУ согласно полученному сообщению находится в требуемом состоянии, то принимается решение не оказывать на него никаких управляемых воздействий. Например, при выполнении задачи стабилизации ОУ может определенное время находиться в требуемом (неизменном) состоянии, и переводить его в другое состояние бессмысленно.

Привлечем задачу стабилизации при случайных изменениях состояния обстановки для выявления пределов управления. Пусть имеется система с управлением, которая описывается некоторым множеством возможных состояний ОУ: $Y = \{y_i\}, i=1, 2, \dots, n$, а также множеством возможных управляемых воздействий со стороны УС: $X = \{x_j\}, j=1, 2, \dots, m$. Считаем, что аксиома наблюдаемости выполняется, т.е. по выходному сигналу $y_i \in Y$ можно однозначно определять внутреннее состояние ОУ $z_i \in Z$. Рассмотрим три формально возможных ситуации:

1. Отсутствие управления (нет обратной связи или отсутствуют ресурсы управления).
2. Управление в идеальных условиях (имеется полная информация о системе и обстановке).
3. Реальное управление (неполная информация о системе и обстановке).

Вариант 1. *Отсутствие управления*. В этом случае ОУ может принимать любое из возможных для него состояний, неизвестных для ЛПР УС. Если для простоты считать все эти состояния равновероятными, то такому положению дел соответствует максимальное значение энтропии $H(Y)$:

$$H(Y) = - \sum P(y_i) \log_2 P(y_i) = H(Y)_{\max} . \quad (4.5)$$

Вариант 2. *Управление в идеальных условиях*. При идеальном управлении ОУ в каждом цикле управления будет переводиться в требуемое состояние с вероятностью, равной единице. Это означает, что имеется полная определенность относительно состояния ОУ для ЛПР УС, и соответствующая энтропия $H(Y/X)$ равна нулю.

Действительно, пусть для определенного ОУ при воздействии x_i вероятность первого состояния $P(y_1) = 1$, а вероятности остальных состояний

$$\sum P(y_i) = 0.$$

Тогда

$$H(Y/X) = -\left\{P(y_1)\log_2 P(y_1) + \sum P(y_i)\log_2 P(y_i)\right\} = \\ = -\left\{1 \cdot \log_2 1 + 0 \cdot \sum \log_2 P(y_i)\right\} = 0. \quad (4.6)$$

Вариант 3. Реальное управление. При управлении в реальных условиях ЛПР УС не обладает полной информацией о состоянии ОУ и обстановки. В результате управляемые воздействия оказываются не полностью адекватными состоянием ОУ. Поэтому энтропия $H(Y/X)$ (неопределенность относительно реального состояния ОУ) может изменяться в пределах:

$$0 < H(Y/X) < H(Y_{max}). \quad (4.7)$$

Эффективность управления (определенная качеством принимаемых решений) зависит от того, насколько уменьшается неопределенность после получения от ОУ сообщения о его состоянии. Разность между исходной (априорной) и остаточной (апостериорной) энтропией будет составлять полученную УС информацию, используемую для выработки очередного управляемого воздействия:

$$I(X/Y) = H(Y_{max}) - H(Y/X). \quad (4.8)$$

Отметим, что $I(X/Y)$ часто называют *взаимной информацией*, поскольку считается, что УС получает ровно такое количество информации, какое было заложено в сообщение, переданное из ОУ. Соответственно, с другой стороны, количество взаимной информации $I(X/Y)$ в сообщении, несущем управляемое воздействие будет равно:

$$I(X/Y) = H(X) - H(X/Y), \quad (4.9)$$

где $H(X)$ — энтропия, отражающая неопределенность относительно содержания сжатого в ОУ сообщения, несущего управляющее воздействие; $H(X/Y)$ — энтропия, характеризующая остаточную неопределенность для ОУ после получения этого сообщения от УС.

Ясно, что $H(X/Y)$ тем больше, чем большей свободой выбора управляемых воздействий располагает ОУ.

Объединив выражения (4.8) и (4.9), получаем окончательно:

$$H(Y/X) = H(Y)_{\max} + H(X/Y) - H(X). \quad (4.10)$$

Это выражение отражает смысл принципа необходимого разнообразия, определяя предельные возможности управления. Из него следует, что для повышения качества выбираемых решений, т.е. повышения эффективности управления (уменьшения $H(Y/X)$) можно использовать три подхода:

1. Сокращение $H(Y)_{\max}$ — количества возможных состояний (разнообразия) объекта управления.
2. Уменьшение $H(X/Y)$ — степени несоответствия управляемых воздействий реальным состояниям ОУ, что может быть достигнуто получением более точной информации о состоянии ОУ и обстановки.
3. Увеличение $H(X)$ — разнообразия воздействий (свободы выбора) управляющей системы, которое должно быть, по крайней мере, не меньше разнообразия состояний ОУ.

Иными словами, следует стремиться к тому, чтобы на каждое возможное состояние объекта управления управляющая система располагала адекватным управляемым воздействием, и чтобы в каждом цикле управления обеспечивался выбор именно этого воздействия.

Отсюда следует более полная формулировка принципа Эшби: «*Разнообразие воздействий управляющей системы должно быть, как минимум, не меньше разнообразия состояний объекта управления*».

Отметим, что для формального представления принципа Эшби нередко используются понятия безусловной и условной энтропии. Безусловная энтропия определяется как вся потенциальная информация, т.е. мера априорной неопределенности. Условная энтропия — это мера остаточной (апостериорной) неопределенности после получения сообщения. Разность между условной и безусловной энтропией составляет количество полученной информации.

Иногда можно встретить утверждение о том, что энтропию объекта управления можно понизить до желаемого уровня только увеличивая энтропию управляющей системы. Однако такая интерпретация принципа Эшби, может приводить к неоднозначным истолкованиям и, в то же время, не учитывает специфики сложных социально-экономических систем, важнейшим элементом которых является человек. К тому же односторонне воспринимаемое понятие «уничтожение разнообразия» может служить дополнительным источником неопределенности.

Применительно к анализу сложных систем, признаком которых является наличие неоднородных (векторных) связей, понятие разнообразия тесно связывается с понятиями информации и энтропии. Это выглядит совершенно оправданно, однако, по нашему мнению, для исключения возможности возникновения противоречий следует непременно учитывать тонкую грань, различающую информационную и термодинамическую (физическую) энтропию.

Введение в рамках статистической физики понятия энтропии как меры вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния системы позволило дать наиболее общую формулировку второго начала термодинамики.

Из термодинамики (статистической физики) известно, что чем большим числом микросостояний может быть реализовано определенное макросостояние, тем в большей степени неупорядочена система, и энтропия выступает в качестве меры этой неупорядоченности. Возрастание энтропии в изолированной системе обусловлено, в конечном счете, равной вероятностью множества ее микросостояний, приводящих такую систему в наиболее вероятное макросостояние (состояние термодинамического равновесия).

Таким образом, здесь энтропия выступает в качестве меры разнообразия возможных микросостояний, уводящего систему от детерминированного (упорядоченного) состояния. При этом, как известно, закон возрастания энтропии, выполняется с точностью до флуктуаций, ограничивающих разнообразие микросостояний гауссовым распределением вероятностей, уводящим систему от предельной неопределенности.

Вернемся к выражению (4.10) и рассмотрим вытекающие из него три рекомендации применительно к техническим и организационным системам.

1. Уменьшение *разнообразия состояний объекта управления*, в принципе, означает его упрощение, что эквивалентно увеличению его физической энтропии. Действительно, сталкиваясь с задачей управления сложной системой, мы нередко ограничиваемся использованием только известной нам части возможных управляющих воздействий. В то же время информационная энтропия, отражающая неопределенность ожидаемого сообщения о состоянии объекта управления для управляющей системы, в этом случае уменьшается. Иными словами, энтропия системы — *объекта* и системы — *процесса управления* изменяются в противоположных направлениях.

Очевидно, что в эпоху стремительного усложнения технических и информационных систем такой путь повышения эффективности их управления не выглядит оправданным.

Однако для сложных организационных систем ситуация выглядит иначе. Как известно, в процессе своей деятельности многие сложные организационные системы проявляют тенденцию к дальнейшему усложнению, «обрастая» все новыми структурными единицами. При этом их эффективность, как правило, снижается в силу несоответствия целей структурных подразделений целям организации. Возникает задача упрощения громоздкой структуры, ее оптимизации, нашедшая свое выражение в разработке методологии реинжиниринга бизнес-процессов.

2. Уменьшение степени несоответствия получаемых сообщений реальному состоянию объекта управления. Обычно эта рекомендация направлена на техническое обеспечение искаженной взаимной передачи сообщений, в первую очередь от ОУ к УС. Действительно, несоответствие между предполагаемым и реальным состоянием ОУ будет автоматически приводить к выработке в УС неадекватных управляющих воздействий. Разумеется, также, что отсутствие помех в канале обратной связи способствует корректной интерпретации принятого ОУ сигнала, несущего сообщение об управляемом воздействии.

Однако в организационных системах кроме того существенную роль играет человеческий фактор. Нередки случаи сознательной дезинформации ЛПР управляющей системы со стороны ЛПР объекта управления, что не только чревато снижением эффективности функционирования систем, но и может приводить к катастрофическим последствиям. Достаточно вспомнить случай с круизным лайнером Costa Concordia.

Очевидно, что указанные особенности обеспечения эффективности управления сложными социально-экономическими системами целесообразно учитывать при решении конкретных проблем государства и общества.

3. Увеличение разнообразия управляющих воздействий как минимум до уровня разнообразия возможных состояний объекта управления. Прежде всего, отметим, что не следует понимать это утверждение так, что задача состоит в увеличении энтропии управляющей системы. Неопределенность для объекта управления относительно ожидаемого сообщения, конкретизирующего смысл управляющего воздействия, не связана с необходимостью принятия решения. Речь идет о выполнении рутинных информационных процессов — отработке управляющих воздействий.

Что же касается разнообразия управляющих воздействий, то оно составляет не что иное, как ресурс управления УС, гарантирующий ей более широкую свободу выбора.

Отметим также, что организационные системы, как правило, обладают способностью к самоорганизации, т.е. к изменению (в том числе,

сложнению) своей структуры и поведения. Это обстоятельство ставит вопрос о соотношении разнообразий в том смысле, что разнообразие управляющих воздействий должно априори существенно превосходить разнообразие состояний объекта управления. Речь идет о целесообразности наличия различных воздействий для оптимального вывода ОУ из разных состояний, в частности, экстремальных, но отображаемых одинаковыми выходными сигналами.

Кроме того, ЛПР УС может прогнозировать появление у объекта управления конкретных эмерджентных свойств и соответствующим образом расширять свой ресурс управления (увеличивать свободу выбора). В еще большей степени это относится к случаю привлечения принципа Эшби для оценивания эффективности процессов обучения и исследований.

4.5. ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

4.5.1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

Понятие «структура» происходит от латинского *structure*, что означает строение, порядок. Одно из определений теории систем характеризует структуру системы как *упорядоченное множество связей (отношений) между ее элементами*. Понятие «связи» относится как к строению, так и к функционированию системы, т.е. характеризует и статические и динамические свойства.

При исследовании систем используются два определяющих понятия: формальная структура и материальная структура. Под *формальной структурой* в общем случае понимают совокупность элементов и их взаимосвязей, обеспечивающих достижение системой поставленной цели. Речь, таким образом, идет о том общем, что объединяет системы одного определенного типа. Что же касается материальной структуры, то она представляет собой конкретный способ реализации формальной структуры с вполне определенными типами элементов, их параметров и организацией.

Изложенное положение позволяет сформулировать два принципа:

- достижение фиксированной цели обеспечивается, как правило, одной и только одной формальной структурой;
- одна формальная структура может быть реализована множеством альтернативных материальных структур.

Проектирование организационных систем управления базируется на *принципе необходимой иерархии*, согласно которому с возрастанием

неопределенности в ситуациях принятия решений требуется все более высокая иерархия управления. Источниками неопределенности в сложных организационных системах, наряду с их очевидной сложностью и непредсказуемостью условий окружающей среды, выступает человеческий фактор, который проявляется в следующих особенностях:

- выработка формальными структурами и неформальными группами собственных целей, не соответствующих глобальным целям организации;
- проявление противоречий между интересами различных функциональных подсистем, основного и административно-управленческого персонала;
- передача на верхние уровни иерархии недостоверных сведений о реальном состоянии подсистем управления;
- выбор неоптимальных решений в нестандартных ситуациях и в условиях дефицита времени.

Именно поэтому в подобных системах существенно возрастает роль таких функций управления как организация и координация, мотивация и стимулирование.

В ходе исследования (анализа) организационных (организационно-технических) систем, в первую очередь, ищутся ответы на следующие вопросы:

- в полной ли мере существующая структура соответствует основным целям и функциям системы;
- достаточно ли произвести реорганизацию существующей структуры или целесообразно синтезировать (спроектировать) принципиально иную структуру;
- каким образом следует распределить новые и перераспределить ранее имевшиеся функции между подсистемами и элементами.

Ответы на эти вопросы в значительной степени зависит от типов структуры отдельных подсистем управления иерархических систем. К типовым принято относить следующие виды структур: линейные, кольцевые, звездные, сотовые, многосвязные. Они различаются по количеству внутренних связей, скорости обмена сообщениями, надежности (живучести), стоимости, что, естественно необходимо учитывать при синтезе систем.

4.5.2. ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ

Понятие организационной структуры системы управления является в теории управления одним из базовых. Под организационной структурой понимается совокупность подсистем, объединенных иерархическими

взаимосвязями, обеспечивающими распределение функций управления между ЛПР и подчиненными управленцами для достижения целей системы.

Конкретную организационную структуру определяют следующие характеристики:

- количество уровней иерархии;
- количество звеньев управления;
- степень централизации (децентрализации) управления.

Уровень иерархии составляет группу подсистем (звеньев), руководители (ЛПР) которых имеют одинаковые полномочия. Связи между уровнями иерархии носят вертикальный характер и отражают отношения подчинения нижестоящих уровней вышестоящим.

Звено (отдел) иерархии представляет собой обособленный самостоятельный орган управления, выполняющий отдельные частные функции управления. Связи между звеньями одного уровня иерархии являются горизонтальными и выражают отношения взаимодействия, заложенные функцией координации.

Степень централизации (децентрализации) управления отражает принятые в системе распределение функций управления между уровнями иерархии. Система управления является централизованной в том случае, когда все основные решения принимаются на верхнем уровне иерархии. Наоборот, система считается децентрализованной, если решения принимаются на всех уровнях иерархии и не корректируются центральным (высшим) органом управления. Очевидно, что при выполнении функций оперативного управления, когда имеют место незначительные изменения обстановки, децентрализованная структура управления обеспечивает высокую оперативность доведения решений и получения сообщений о состоянии объекта управления.

Для подавляющего большинства реальных систем характерно сочетание централизованного и децентрализованного управления, при котором функции принятия решений распределены между уровнями управления в зависимости от степени их ответственности. На высших уровнях управления решаются стратегические задачи, на средних уровнях — тактические задачи, на нижних уровнях — задачи оперативного управления.

Децентрализация управления обеспечивается путем *делегирования полномочий* — передачи определенных функций и прав принятия и доведения решений нижестоящим уровням управления. При этом подчиненные ЛПР действуют от имени своего руководителя, однако ответственность перед вышестоящим органом управления в полной мере несет руководитель, делегировавший свои полномочия.

Следует подчеркнуть, что количество уровней иерархии в организационных структурах в значительной степени определяется *нормой управляемости*, т.е. количеством непосредственных подчиненных, которыми может эффективно управлять один руководитель. Из практики управления следует, что норма управляемости составляет не более двенадцати подчиненных на одного руководителя.

4.5.3. КЛАССЫ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Как известно, для любой классификации, ее результат определяется выбором признака (критерия) классификации. Это в полной мере относится и к формированию классов (видов) организационных структур.

По принципу своего действия организационные структуры подразделяются на два типа: механистические и органические. Для *механистической структуры* характерны жесткие иерархические связи, строгое разделение функций и регламентация должностных обязанностей, а также высокая степень формализации процедур обмена информацией.

Принцип действия *органической структуры* заимствован у таких систем естественного происхождения, как живые организмы. Для органической структуры характерно малое число уровней управления, неполное разделение функций, децентрализация процедур принятия решений. В отличие от механистических структур, для органических типичным является активное взаимодействие ЛПР разных уровней иерархии, как по вертикали, так и по горизонтали, неформальный обмен информацией, адаптация функциональных обязанностей исполнителей к специфике решаемых задач.

В свою очередь, механистические и органические структуры могут быть реализованы в различных базовых вариантах. Так, к механистическому типу относятся следующие организационные структуры:

- функциональная;
- линейная;
- линейно-штабная;
- дивизиональная.

Наиболее распространенной является *функциональная структура*. Ее принято считать классической, поскольку она реализует принцип структурирования, основанный на формировании звеньев иерархии, соответствующих основным функциям управления (учет, контроль, анализ, оперативное управление, планирование и прогнозирование).

При очевидных достоинствах (возможность координации по уровням иерархии, исключение дублирования функций) функциональная структура порождает характерные для себя недостатки. Для нее типичным

явиается возникновение противоречий в виде конфликта интересов между звеньями (отделами), высокая продолжительность циклов управления, слабая заинтересованность исполнителей в достижении глобальных целей организации.

Наиболее последовательно принцип функционального управления реализует линейная организационная структура. Все ее элементы связаны вертикальной линией подчинения: каждый уровень управления напрямую подчиняется вышестоящему уровню.

Линейно-штабная структура представляет собой определенное сочетание функциональной и линейной структур, при котором у ЛПР высшего уровня иерархии имеется одна или несколько групп подчиненных управлениев, ориентированных на постановку и достижение стратегических или тактических целей. Примерами таких стратегических штабов могут служить советы директоров корпораций, научные советы в высших учебных заведениях. Для подготовки решений тактического уровня при ЛПР формируются группы советников, консультантов или референтов.

Следует также отметить еще один существенный и неустранимый недостаток многоступенчатых систем иерархического управления. Дело в том, что поведение руководителя определенного уровня управляется его непосредственным руководителем, а тот, в свою очередь, руководствуется желанием выполнять приказы своего непосредственного начальника. Так продолжается вплоть до генерального руководителя, который, в отличие от всех подчиненных ему руководителей, принимает решения, обусловленные не желанием выполнить приказ начальства, а пониманием интересов дела. Поэтому он выполняет функцию источника уравновешивающей обратной связи, регулируя в ту или иную сторону параметры, характеризующие функционирование системы.

Как показывает моделирование, а также реальная практика управления, многоступенчатое принятие решений при отсутствии заинтересованности промежуточных ЛПР, в принципе, таит опасность неустойчивого управления. Об этом, в частности, свидетельствует практика многоуровневого управления в бывшем СССР, приведшая в конечном итоге к полной разрухе.

Принцип организации *дивизиональной структуры* отражает желание высшего менеджмента организационных систем освободиться от недостатков, характерных для функциональных структур, которые проявляются при расширении спектра услуг и росте организации. Разделение системы управления в структурах такого типа, как правило, производится по трем признакам:

- по группам услуг (продуктов);
- по категориям потребителей;
- по географическим регионам.

В образуемые по этому принципу структуры делегируется большинство полномочий центра, благодаря чему они функционируют как практически самостоятельные организации.

Достоинства дивизиональных структур проявляются, прежде всего, в повышении оперативности принятия и доведения управленческих решений, что, естественно, способствует общему повышению эффективности.

К органическому типу можно отнести следующие организационные структуры:

- проектные (программно-целевые),
- матричные.

Проектная структура создается для решения конкретной задачи (выполнения проекта). В ее состав подбираются высококвалифицированные специалисты различных предметных областей, способные в таком составе решить сложную задачу, требующую творческого подхода и инновационных решений.

Основное достоинство таких структур обусловлено низким уровнем формализации взаимодействия их участников, отсутствием строгой иерархии. Как следствие, такие структуры отличаются хорошей адаптацией к изменяющимся условиям внешней среды и обладают высокой потенциальной эффективностью.

Матричная организационная структура возникла как результат развития концепции проектной структуры. Особенностью таких структур является наличие двойного подчинения сотрудников: руководителю отдела, при котором эта структура создана, и руководителю проекта. Вообще, двойное подчинение является примером *напалогического управления*, так же, как и межранговое управление (минуя непосредственное руководство). Однако при четком разделении функций и достаточной координации действий (во избежание получения противоречивых указаний) матричная структура способна в полной мере проявить свою потенциальную эффективность.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. В чем состоит процесс управления?
2. Какие задачи реализует управляющая система?
3. Какие вам известны аксиомы управления?
4. Перечислите основные задачи управления.
5. Назовите основные функции управления.
6. Какова роль обратной связи в управлении?

7. Сформулируйте принцип необходимого разнообразия Эшби.
8. Какие существуют пути повышения эффективности управления?
9. Как оценить степень помехозащищенности контура обратной связи на языке энтропии?
10. В чем конкретно проявляется специфика управления организационно-техническими системами?
11. В чем состоит естественный критерий эффективности управления?
12. Как определяется качество решений, принимаемых ЛПР?
13. Какие типовые структуры систем вам известны?
14. В чем различие между формальной и материальной структурами?
15. Что такое организационная структура системы управления?
16. В чем состоит принцип необходимой иерархии?
17. Какие вы знаете типы организационных структур?
18. Что такое делегирование полномочий?
19. Каковы признаки централизованного управления?
20. Приведите примеры патологического управления.

ЧАСТЬ II

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

ГЛАВА 5

ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

5.1. ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Системный анализ представляет собой совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений при разрешении самых разнообразных проблем современной реальности. Общим признаком всех проблем, для решения которых привлекается методология системного анализа, независимо от области, где они возникают, является именно их сложность. Сложность проблемы обусловлена необходимостью выбора решения на множестве альтернатив в условиях неопределенности (недостатка информации). По своей сути проблема отражает существование того или иного противоречия между имеющимися и желаемым состояниями, а разрешение противоречия означает снятие неопределенности.

Общеизвестно, что средством разрешения противоречий в методологии науки является выдвижение гипотез (пробных моделей), их логическая и эмпирическая проверка. История науки зафиксировала множество ситуаций, когда гипотезы, позволившие успешно разрешить крупные проблемы естествознания, удавалось найти через годы и десятилетия после их возникновения. Достаточно вспомнить, например,

построение релятивистской механики и теории фотозефекта. В первом случае от появления противоречия между теоретическими положениями электродинамики Максвелла и эмпирической базой механики Галилея — Ньютона до его разрешения прошло более 30 лет, во втором — потребовалось около 20 лет, чтобы найти объяснение природы фотозефекта на базе квантовой гипотезы.

Эти примеры убедительно показывают, что зачастую гипотеза, оказавшаяся продуктивной, по тем или иным причинам изначально не фигурирует среди рассматриваемых вариантов (альтернатив). В системном анализе подобные обстоятельства учитываются специально разработанными алгоритмами генерации исходного множества альтернатив и «отбраковки» из него бесперспективных альтернатив.

Тем не менее, нельзя говорить о существовании универсальной методики системного анализа в силу разнообразия сложных систем и возможных альтернативных моделей для их отображения. Поэтому системный анализ представляет собой систему логически связанных теоретических и эмпирических положений, почерпнутых из естественных наук, математики и опыта разработки сложных технических систем. Однако далеко не последнюю роль при проведении системного анализа играет интуиция и опыт исследователя.

Недаром считается, что системный анализ, особенно в части математического моделирования, является собой своеобразное искусство. Накопленный опыт построения удачных моделей сложных систем позволил сформулировать принципы системного анализа — положения общего характера, задающие направление системного исследования и требования, которым должна отвечать правильно построенная модель. Другими словами, для всего разнообразия методик системного анализа основой является соблюдение этих принципов.

Общепринятых названий и формулировок принципов системного анализа пока нет, поэтому различные авторы излагают их по-разному, однако при этом разные формулировки касаются одних и тех же понятий.

Рассмотрим последовательно эти принципы.

1. *Принцип конечной цели* определяет приоритет конечной цели анализа и синтеза сложных систем. Согласно этому принципу в первую очередь необходимо четко сформулировать цель исследования. Расплывчатость цели, как правило, влечет за собой неверные выводы. Уяснение назначения системы, ее функций позволяет выделить ее существенные характеристики, показатели и критерии качества и эффективности.

Далее, при синтезе систем любые вносимые изменения следует оценивать относительно того, насколько они способствуют достижению ко-

ничной цели. При этом необходимо учитывать, что достижение конечной цели системы должно в полной мере отвечать цели «старшей» системы, компонентом которой является исследуемая (синтезируемая) система.

2. *Принцип подчиненности* (измерения) утверждает, что о качестве системы и эффективности ее функционирования следует судить с точки зрения целей и задач системы более высокого уровня.

3. *Принцип эквилипальности* задает устойчивость системы по отношению к начальным и граничным условиям. Согласно этому принципу система при различных начальных условиях должна достигнуть заданного конечного состояния различными путями независимо от времени.

4. *Принцип единства* требует одновременного рассмотрения системы как целого и как совокупности взаимодействующих элементов, сочетания процедур анализа системы и синтеза ее целостной модели.

5. *Принцип эмерджентности* (целостности) подчеркивает несводимость свойств системы к сумме свойств ее элементов и невыvodимость свойств целого из свойств его составных элементов.

6. *Принцип связности* ориентирует на рассмотрение любой части системы совместно с ее окружением с выявлением связей (отношений) между элементами и взаимодействия с внешней средой.

7. *Принцип функциональности* указывает на необходимость совместного рассмотрения структуры системы и ее функции с обязательным приоритетом функции над структурой. Это, в частности, означает, что, придавая системе новые функции, полезно пересмотреть ее структуру, по сути, синтезировать новую систему, поскольку попытки навязать новые функции старой схеме, как правило, оказываются неэффективными.

8. *Принцип неопределенности* концентрирует внимание на необходимость учета случайных явлений в открытых динамических системах. Неопределенность в предвидении внешних воздействий и флуктуаций в самой системе можно минимизировать, определяя вероятностные значения выходных характеристик (если известен закон распределения вероятностей случайных воздействий), либо ориентироваться на равновероятные события.

9. *Принцип развития* (эволюции) закладывает в рассмотрение учет адаптации, самоорганизации, изменения структуры и расширения функций системы. Синтезируемая система должна располагать возможностью развития, наращивания, усовершенствования, совместимости с новыми подсистемами. Кроме того, этот принцип ориентирует на изучение предыстории развития системы (генетический анализ) и появляющихся тенденций.

Перечисленные принципы, а также некоторые другие, играющие, на наш взгляд, вспомогательную роль, обладают, конечно же, весьма высоким уровнем общности. Поэтому при практическом применении необходимо их конкретизировать применительно к задачам исследования. При этом некоторые принципы могут оказаться несущественными. Тем не менее, опираясь на всю совокупность принципов системного анализа, особенно на начальной стадии исследования, можно избежать многих заблуждений и ошибочных решений.

5.2. СТРУКТУРА СИСТЕМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Исторически исследование сложных систем ассоциировалось с проведением их разложения на элементы с тем, чтобы установить действующий в них закон функционирования (поведения). Поэтому утвердился термин «системный анализ», интегрирующий процедуры, как *анализа*, так и *синтеза* структуры систем. В дальнейшем у многих авторов добавилась еще предшествующая анализу процедура декомпозиции, т.е. расчленения системы на элементы. С другой стороны, ряд авторов включает декомпозицию в состав анализа. Подобные различия, как уже отмечалось, достаточно характерны для относительного нового и активно развивающегося междисциплинарного направления исследований современной науки.

Мы полагаем целесообразным использовать понятие (и термин) «системное исследование», включающее следующую последовательность выполняемых процедур:

- декомпозиция,
- анализ,
- синтез,
- агрегирование.

При этом задачей декомпозиции является определение элементного состава, структуры и *закона функционирования (поведения)* исследуемой системы, задачей анализа — выявление реально действующего в системе *механизма (алгоритма) функционирования*, единственным образом выполняющего установленный в ходе декомпозиции закон функционирования. Как правило, выполнение процедур декомпозиции и анализа позволяет выявить имеющееся (возникшее) в системе противоречие, составляющее практическую проблему.

В качестве средства решения проблемы (разрешения противоречия) выступают процедуры синтеза и агрегирования. Задача синтеза состоит в выборе оптимального (наилучшего при существующих условиях

и ограничениях) механизма функционирования (для технических систем) или алгоритма функционирования (для организационных либо организационно-технических систем). Завершает системное исследование процедура агрегирования, задача которого сводится к формированию конкретной структуры синтезируемой (новой) системы, обладающей новыми эмерджентными свойствами и свободной от ранее выявленной проблемы.

Результат объединения компонентов в единое целое принято называть агрегатом. С точки зрения системного анализа агрегат — это система, обладающая внешней и внутренней целостностью. Ключевой задачей агрегирования является формирование действующей структуры системы. Таким образом, с синтезом связано понятие *формальной структуры*, а с агрегированием — понятие *материальной структуры*.

В общем случае под формальной структурой понимается совокупность функциональных элементов и их отношений, необходимых и достаточных для достижения системой целевого эффекта. Материальная же структура является носителем конкретных типов элементов (с определенными значениями параметров) и способов их взаимодействия. Еще раз отметим, что некоторой фиксированной цели соответствует, как правило, одна и только одна формальная структура, в то время, как одной формальной структуре может соответствовать множество материальных структур.

Поэтому при проведении системного исследования аналитикам приходится отвечать на следующие вопросы:

- соответствуют ли действующий в системе алгоритм (механизм) функционирования и существующая структура основным целям системы;
- требуется ли реорганизовать существующую структуру, не изменяя алгоритм функционирования либо необходимо синтезировать и агрегировать принципиально новую систему;
- какой выбрать новый алгоритм функционирования для синтезируемой системы, и каким образом перераспределить функции системы по элементам агрегируемой структуры.

Напомним, что при этом предполагается выполнение принципа функциональности, согласно которому в случае придания системе новых функций целесообразно кардинально пересмотреть ее структуру, а не пытаться «втиснуть» новый алгоритм функционирования в старую схему.

Структура системного исследования, отражающая общий подход к решению проблем представлена на рис. 5.1. Очевидно, что системное исследование, как алгоритмизированная совокупность процедур, носит характер циклического процесса.



Рис. 5.1. Функциональная структура системного исследования

Основные задачи системного исследования могут быть детализированы в виде последовательности функций, выполняемых на каждом этапе.

На этапе *декомпозиции* для формирования общего представления системы выполняются:

1. Определение общей цели исследования и ее декомпозиция в виде дерева целей, а также уточнение основной функции системы путем ограничения ее траектории в пространстве состояний и в параметрическом пространстве.
2. Выделение системы из окружающей среды (разделение пространства состояний на систему и надсистему) по признакам вклада системы в достижение целей надсистемы.
3. Описание воздействующих факторов, т.е. управляемых и неуправляемых воздействий, изменяющих состояние системы.
4. Описание тенденций развития проблемной ситуации и источников неопределенности — как в самой системе, так и в окружающей среде.

5. Описание системы как «черного ящика», с установлением закона ее функционирования в виде зависимости выходных сигналов от управляемых и неуправляемых воздействий и времени.

6. Функциональная, компонентная (по виду элементов) и структурная (по виду отношений между элементами) декомпозиция системы.

Последняя шестая функция по существу составляет переходный процесс между декомпозицией и анализом. Проблема осуществления декомпозиции состоит, как уже отмечалось, в том, что в сложных системах в принципе отсутствует однозначное соответствие между законами функционирования подсистем и реализующими их алгоритмами (механизмами). Поэтому в практике системных исследований система отображается в виде иерархической структуры с ограниченной глубиной декомпозиции.

Если при декомпозиции выясняется, что модель элемента начинает описывать внутренний алгоритм его функционирования вместо закона его поведения как «черного ящика», то это означает выход за пределы цели декомпозиции и, следовательно, сигнализирует о необходимости прекращения декомпозиции.

Уточним основные стратегии декомпозиции.

При функциональной декомпозиции основанием для разбиения системы на функциональные подсистемы является общность функций, выполняемых группами элементов. При этом ищется ответ на вопрос — что делает система, независимо от того, как она это делает.

Структурная декомпозиция в качестве признака выделения подсистем рассматривает наличие сильной связи между элементами по определенному типу отношений между ними (информационные, иерархические, логические и другие связи).

Декомпозиция по жизненному циклу проводится в случаях, когда на разных этапах цикла существования системы изменяются законы функционирования ее подсистем.

Декомпозиция по физическому процессу основана на выделении подсистем по конкретному способу выполнения механизмов функционирования и направлена на обеспечение проведения в дальнейшем параметрического анализа системы.

Перейдем к этапу *анализа*, обеспечивающего формирование детального отображения системы. На этом этапе осуществляются следующие процедуры:

1. Структурный (морфологический) анализ существующей системы. Он включает уточнение состава компонентов (элементов и подсистем), выявление и анализ взаимосвязей компонентов, анализ целостности системы, разделение управляемых и неуправляемых характеристик.

2. Функциональный анализ, в ходе которого уточняется закон функционирования системы, определяется степень взаимного действия (или взаимного противодействия) подсистем, задается пространство состояний системы и параметрическое пространство, в котором происходит смена ее состояний, отбираются наиболее достоверная гипотеза (гипотезы) относительно алгоритма или механизма функционирования системы.

3. Информационный анализ, целью которого является установление действующего в системе алгоритма управления процессом функционирования. Он включает анализ организации процессов принятия и доведения управленческих решений, контроля и учета состояний системы, установление причин несоответствия реальных состояний системы требуемым состояниям, анализ процессов планирования, прогнозирования и координации действий функциональных подсистем в соответствии с основными целями системы.

4. Генетический анализ, направленный на исследование предыстории системы, причин появления проблемной ситуации, существующих тенденций развития ситуации, построение краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов.

5. Анализ аналогов, в ходе которого проводится сравнительное оценивание известных и предполагаемых способов реализации требуемого закона функционирования, т.е. альтернативных алгоритмов (механизмов) функционирования.

6. Анализ эффективности системы по показателям результативности, оперативности и ресурсоемкости, предполагающий выбор шкал измерения показателей, обоснование и формирование критерии эффективности, непосредственное оценивание и анализ полученных оценок.

7. Параметрический анализ — формирование количественных требований к системе, создаваемой с целью снятия проблемной ситуации.

Далее следует этап *синтеза* системы, решающей проблему. На этом этапе осуществляются:

1. Разработка модели требуемой системы, включающая построение концептуальной модели, выбор математического аппарата, моделирование, оценивание модели по критериям адекватности, простоты, оптимизации соотношения сложность/точность и т.д.

2. Синтез альтернативных формальных структур, обеспечивающих снятие проблемы на качественном уровне оценивания.

3. Сравнительное оценивание альтернативных вариантов синтезируемой физической структуры, в том числе обоснование схемы

и процедуры оценивания, формирование обобщенных показателей качества и эффективности, собственно оценивание, обработка и анализ результатов оценивания, выбор оптимального варианта.

Наконец, этап *агрегирования* обеспечивает синтез параметров системы, снимающей проблему. Речь идет о реализации конкретной физической структуры, выполняющей требуемый закон функционирования с заданными значениями существенных параметров.

5.3. ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ

Предметом системного анализа являются сложные целенаправленные системы. Поэтому первоочередное значение в системном анализе имеет определение совокупности целей системы, формирование на этой основе множества частных задач, направленных на достижение цели, а также оценивание степени достижения промежуточных целей (подцелей).

Определим основные понятия, используемые при реализации целевого подхода.

Цель — желаемый результат (исход) функционирования или развития системы, достижимый в пределах определенного промежутка времени. Цель рассматривается как более общая категория по сравнению с задачей, поскольку предполагается, что цель может быть достигнута в результате решения задач, упорядоченных по отношению к цели.

Направление развития — последовательность выполняемых и задаваемых целей, представляющих все более совершенными.

Идеал — наиболее совершенный результат развития, достижимый асимптотически и в общем случае зависящий от времени.

Создание целенаправленной системы с необходимостью требует определить направление (концепцию) ее развития, т.е. осуществить целеполагание. Все искусственные системы (как материальные, так и абстрактные) создаются для достижения определенных целей. В зависимости от назначения и степени познания исследуемой системы в понятие «цель» вкладывается различный смысл — от идеальных устремлений до директивного задания конкретных значений параметров, которые требуется достичь за установленный интервал времени при ограниченных ресурсах.

Системы, для которых цель изначально или по мере ее уточнения может быть задана набором параметров, принято называть *целеориентированными*. Если же параметризовать желаемое будущее невозможно, т.е. цель системы не поддается строгому описанию, то тенденции ее развития связывают с категорией *ценности*. Системы такого рода относятся к цен-

построено-ориентированным. В отличие от целеориентированных систем в них существенным является сам процесс движения, оцениваемый, как правило, по неколичественным критериям.

Примером таких систем могут служить творческие коллективы, занимающиеся фундаментальными научными исследованиями или работающими в различных областях искусства.

Итак, формирование цели зависит от глубины познания системы, и по мере продвижения к цели представление о ней может неоднократно уточняться и конкретизироваться. Цель можно считать моделью будущего, которая в ходе развития становится все более точной, а значит, и более детализированной.

Реализация развития систем обеспечивается посредством соответствующего управления, которое представляет собой определенное принуждение, призванное корректировать их возможное естественное развитие, определяемое начальными условиями и процессами взаимодействия с окружающей средой.

Процесс целеполагания состоит в формулировании требований, которым должно соответствовать окончание управляемого периода в виде конкретных значений параметров состояния. Каждый такой параметр, естественно, имеет свою область определения, которая представляет собой некоторый диапазон значений на соответствующей координате фазового пространства. Поэтому цель, включающая несколько совместно задаваемых требований, в многомерном фазовом пространстве выглядит как пересечение областей (поверхностей), каждая из которых содержит множество параметров состояния, удовлетворяющих выполнению одного требования.

Очевидно, однако, что формирование такой цели, соответствующей многим требованиям к конечному состоянию системы, связано с возникновением существенных трудностей. Выдвижение значительного количества требований чревато тем, что в фазовом пространстве они не будут иметь не только области, но и точки пересечения, т.е. окажутся несовместимыми.

Следовательно, число конструктивных требований, интегрирующих цель системы, не должно превышать число параметров ее состояния (степеней свободы).

Для фиксации цели как конечного состояния системы весьма информативным является понятие «область достижимости», под которым понимается множество предельных (оптимальных) значений задаваемых и контролируемых параметров. Иными словами, область достижимости включает множество состояний системы, достигаемое при наилучшем управлении. Здесь просматривается очевидная аналогия с обеспечением

выполнения критерия превосходства при оценивании качества систем (см. параграф 7.2).

Определение области достижимости представляет собой одну из сложнейших процедур системного анализа. Для ее успешного проведения необходимо построить множество траекторий развития существенных параметров системы на интервале времени от начала управления до его завершения при условии оптимального управления.

Достаточно сложным является также процедура установления *факта достижения цели*. В реальных условиях, как правило, имеет место отклонение от точного выполнения заданных требований к конечному состоянию системы. Вследствие неадекватной идентификации текущих состояний системы и несоответствия им управляющих воздействий траектория развития системы может не попасть в целевую область. В таком случае систему следует нацелить на выполнение другой задачи, поскольку независимо от последующих управляющих воздействий система будет отдаляться от первоначальной цели.

Особенно важно это в ситуациях, когда достижение конечной (глобальной) цели обеспечивается выполнением ряда последовательных задач. Дело в том, что после выполнения каждой из них требуется определенная структурная или организационная перестройка системы, действуются новые ресурсы. Несвоевременная перестройка системы приводит к потере темпа развития, нерациональному расходу ресурсов, а в худшем случае может привести к распаду системы.

Это обстоятельство следует неизменно принимать во внимание во всех областях деятельности, где существует иерархическая преемственность в разрешении сложных структурированных проблем.

5.4. СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЦЕЛИ

Сложность решения проблемы целеполагания в значительной степени обусловлена тем, что она слабо поддается строгой формализации.

В принципе любая цель представляет собой совокупность целей более низкого уровня иерархии (подцелей), задач управления и конкретных действий по их выполнению, т.е. общая цель достигается в результате осуществления ряда частных целей и решения частных задач. Следовательно, задача формулирования глобальной цели для сложных систем сводится к ее декомпозиции и структурированию. Поэтому широкое распространение в практике системного анализа получило представление глобальной цели системы древовидной структурой. Процедура построения соответствующего дерева целей является ключевой при осуществлении целеполагания.

Дерево целей является наглядной графической моделью иерархической взаимосвязи целей системы и отдельных ее подсистем и элементов. Каждая промежуточная вершина дерева целей может рассматриваться как цель для нижестоящих вершин и как средство достижения цели вершины вышестоящего уровня.

Следует подчеркнуть, что выполнение промежуточных целей отнюдь не обеспечивает автоматического выполнения глобальной цели. Дело в том, что цель системы, подобно самой системе обладает свойством эмерджентности, т.е. не сводится к простой сумме промежуточных подцелей.

При формировании дерева целей важная роль, как правило, отводится эвристическим методам, экспертным оценкам, что обусловлено высокой степенью неопределенности на этапе целеполагания. Именно это обстоятельство не позволяет строить достаточно строгие математические модели целевого состояния системы. Вместе с тем, опыт использования метода дерева целей при построении систем организационного управления позволил сформулировать следующие общие принципы (правила) реализации процедур целеполагания.

1. Никакая цель высшего уровня иерархии не достигается непосредственно, а лишь посредством достижения подцелей. При этом необходимо иметь в виду, что каждая из подсистем может иметь собственные цели, не направленные на достижение глобальной цели.

2. Средствами достижения глобальной цели являются ее подцели, и метод дерева целей реализуется наиболее эффективно при условии, что каждая подсистема стремится достичь своей цели, имея в виду глобальную цель всей системы.

3. Цели верхнего уровня иерархии формулируются неизбежным образом в достаточно общем виде, в агрегированных, абстрагированных понятиях и детализируются по мере продвижения на нижние уровни целевой иерархии.

4. В системе имеют место, как взаимосвязь, так и состязательность подцелей. Взаимосвязь (взаимное содействие) подцелей выражается в том, что реализация одной подцели способствует достижению другой. Состязательность (конкуренция) проявляется в том, что нередко приходится поступиться степенью достижения или очередностью одной подцели ради реализации другой.

Цели организационных систем различаются по своей функциональной направленности, временному интервалу, месту в иерархии целей. Классификация целей по их функциональной направленности определяет выбор средств и характер действий, которые будут производиться управляющим органом системы для достижения цели. Существенно различаются три основные категории целей.

1. Цели *обеспечения функционирования*, определяемые как вид деятельности, которую требуется поддерживать на протяжении длительного времени.

2. Цели *совершенствования*, связанные с достижением желаемых количественных изменений определенных характеристик системы (организации).

3. Цели *развития (эволюции)* ориентированные на качественные изменения структуры и поведения системы в изменяющихся условиях окружающей среды и предполагающие адаптацию, самообучение, использование внешних ресурсов.

При классификации целей по временному интервалу обычно выделяют краткосрочные (текущие), среднесрочные (тактические) и долгосрочные (стратегические) цели.

По месту в иерархической системе целей различают такие разновидности целей, как конечные, промежуточные, глобальные (основные, генеральные), частные и дополнительные.

Конечной принято считать такую цель, которую невозможно достичь за планируемый период времени, но возможно и необходимо достичь в будущем.

Все цели, последовательное выполнение которых обеспечивает достижение конечной цели, считаются *промежуточными*. Следует отметить, что промежуточная цель для более краткого периода может рассматриваться как конечная, тем более, когда этот период разбит на меньшие отрезки, для которых определены свои промежуточные цели.

В случае, когда среди совокупности целей одна из них доминирует над другими по своему значению, ее называют основной, а остальные — дополнительными.

В сложных организационных системах высокого уровня нередко возникает необходимость достижения нескольких целей, совокупность которых составляет комплексную (общую) цель системы. Если эти цели независимы и равнозначны, то такая система является *многоцелевой*, и ее эффективное управление представляет собой сложнейшую задачу теории и практики.

Информация, необходимая для достижения многоуровневых целей нуждается в сложной обработке, требующей соответствующей технологии. Среди процедур, составляющих такую технологию, выделим следующие действия.

1. Разложение глобальной цели по уровням дерева целей.

2. Установление взаимосвязи и возможного дублирования целей.

3. Оценивание относительной важности целей, в том числе, для устранения конкуренции между ними.

4. Выявление взаимосвязи целей с вариантами планируемых действий и ограничениями по ресурсам и времени.
5. Расчет полных затрат на достижение целей.
6. Прогнозирование появления новых целей в ходе достижения поставленных.
7. Имитационное моделирование процессов достижения целей.

На всех уровнях дерева целей с обстоятельностью, определяемой значимостью уровня, формулируются задачи, требующие решения. При этом на каждом уровне иерархии фиксируются лишь те проблемы, которые требуют принятия решения только ЛПР этого уровня. Поэтому дерево целей в немалой степени способствует решению *проблемы координации*, весьма характерной для организационных систем. Речь идет о необходимости обеспечения согласованной деятельности специализированных (функциональных) подсистем иерархической системы, направленной на достижение основной цели системы.

Многоступенчатая иерархия сложных организационных систем время от времени порождает *конфликтные ситуации*. Причина конфликта может быть вызвана тем, что подсистемы одного уровня не располагают информацией о решениях, принимаемых в каждой из них. Кроме того, различные подсистемы могут выдвигать собственные цели, отнюдь не содействующие достижению основной цели системы.

Поэтому задача координации и состоит в том, чтобы принудить нижестоящие подсистемы сосредоточить усилия на достижении эффективного взаимодействия. Иными словами, любая конфликтная ситуация, чреватая противодействием подсистем, не должна препятствовать достижению глобальной цели системы, т.е. возможна лишь в пределах малых отклонений вектора цели отдельных подсистем от вектора глобальной цели.

5.5. ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ

Проблемную ситуацию мы определили, как противоречие между состоянием системы и обстановки, т.е. внешней для нее среды. При разрешении проблемной ситуации объект исследования рассматривается как сложная система, находящаяся в движении к определенной цели (объективно существующей или заданной ЛПР). На каждом шаге этого целенаправленного движения возникает необходимость выбора на определенном множестве альтернатив действий, определяющих дальнейшую траекторию движения системы. Речь, таким образом, идет о поиске управленческого решения (управляемого воздействия), принимаемого в конкретной точке траектории.

Введем определение: *выбор — это решение, придающее целенаправленность динамике исследуемой системы*.

Важность функции выбора связана с тем обстоятельством, что из множества возможных решений (и действий по их реализации) следует выбрать одно, которое принято называть *правильным*. В действительности во многих случаях в разной степени приемлемыми могут быть несколько решений, удерживающих систему на траектории. Однако правильным будет только одно — оптимальное решение. Ошибка в выборе решения имеет, как правило, самые серьезные последствия, поскольку вернуть динамическую систему в состояние, предшествующее выбору, удается крайне редко.

Способность принимать правильные решения — ценнейшее и достаточно редкое качество, присущее далеко не всем индивидуумам. Поэтому понимание механизма правильного выбора, его алгоритмического описания (формализации) составляет одну из важнейших задач системного анализа.

Накопленный опыт моделирования процессов принятия решений позволил сформулировать следующие положения, характеризующие современное состояние вопроса:

- * полная формализация процесса поиска оптимального решения возможна только для хорошо структурированных задач;
- * для решения слабо структурированных задач полностью формализованных алгоритмов к настоящему времени не найдено;
- * на практике высококвалифицированные специалисты, как правило, делают удачный выбор, что наводит на мысль о неявном существовании соответствующих алгоритмов.

Современная практика выбора решений основана на сочетании способностей человека к решению неформализованных задач с возможностями математических методов и инструментальных средств поддержки принятия решений.

Вернемся к определению понятия «выбор». Из него следует, что выбор представляет собой операцию, проводимую над множеством альтернатив, в результате которой выделяется одна альтернатива или подмножество альтернатив, т.е. допустимых действий, подлежащих реализации. Такая операция возможна, если имеется способ *сравнения альтернатив* между собой. Любой такой способ предполагает наличие *критерия предпочтения*.

Подчеркнем, что при таком подходе считаются успешно выполненными два необходимых и весьма важных этапа операции выбора;

- * определена цель или область целей, для достижения которых производится выбор;
- * сформировано полное множество альтернатив, на котором будет происходить выбор.

Это упрощение позволяет считать, что имеются критерии оценивания и сравнения альтернатив. Однако даже в такой упрощенной постановке задача выбора остается нетривиальной и допускает различные варианты математической постановки задачи. Это обусловлено тем, что каждая составляющая операции выбора может быть реализована по-разному.

В частности:

- множество альтернатив может быть конечным, счетным или континуальным;
- оценивание альтернатив может проводиться по одному или многим критериям, которые, в свою очередь, могут иметь как количественный, так и качественный характер;
- режим выбора может быть однократным (необратимым) либо возвратным (наличие возможности обучения на опыте);
- последствия выбора могут быть известными, либо в той или иной степени неопределенными;
- выбор может быть, как индивидуальным, так и групповым;
- степень согласованности решений при групповом выборе может варьироваться от полного совпадения предпочтений до их полного несовпадения.

Разнообразие возможных сочетаний вариантов приводит к постановке различных по сложности задач. Наиболее широко используется постановка задачи однокритериального выбора. Ее суть состоит в том, что каждая альтернатива оценивается определенным числовым значением, и сравнение альтернатив сводится к сравнению соответствующих числовых значений.

5.6. МЕТОДЫ КАЧЕСТВЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ СИСТЕМ

В практике системного анализа при решении слабоструктурированных задач широкое распространение получили качественные методы оценивания систем. В их основе лежит использование эвристических процедур для решения задачи выбора и возникающих при этом частных (промежуточных) задач. К таковым относятся задачи: парного сравнения, множественного сравнения, классификации, ранжирования и численного оценивания.

Задача парного (множественного) сравнения состоит в выявлении более предпочтительной системы из двух (многих) систем. Задача ранжирования заключается в упорядочении некоторого множества систем по возрастанию (убыванию) оценок по некоторой характеристики. Задача классификации — в отнесении конкретной системы к одному

из заданных классов (подмножеств). Задача численного оценивания — в присваивании системам (альтернативам) числовых значений на *шкале интервалов*.

Перечисленные задачи нередко решаются непосредственно лицом, принимающим решение. Однако во многих случаях требуется привлечение экспертов, т.е. наиболее квалифицированных специалистов в исследуемой предметной области.

Надо сказать, что качественные методы решения перечисленных задач достаточно разнообразны, хотя их сущность составляет выполнение эвристических процедур. К основным методам качественного оценивания альтернатив относят:

- метод «мозгового штурма» или коллективной генерации идей;
- метод сценариев;
- морфологические методы;
- типа дерева целей;
- экспертное оценивание;
- метод Дельфи.

Для всех этих методов характерно разграничение двух основных процедур, а именно, генерации (порождения) исходного множества альтернатив и выбора наиболее предпочтительной альтернативы.

Концепция «мозгового штурма» получила развитие как метод мышления, направленный на коллективную генерацию новых идей и достижение согласия группы специалистов на основе интуитивных предложений. Методы этого типа известны также под названиями «коллективная генерация идей», «мозговая атака», «конференция идей».

При проведении «мозгового штурма» устанавливаются строгие правила, направленные на генерацию как можно более представительного генерального множества альтернатив:

- желательно устное высказывание как можно большего количества идей;
- приветствуются любые идеи, в том числе, сомнительные и даже абсурдные (с позиций пресловутого «здравого смысла»);
- запрещается любая критика выдвинутых идей;
- особо ценных считаются идеи, развивающие и обобщающие ранее высказанные.

Обсуждение, оценивание и выбор альтернатив производятся позднее более узким кругом лиц, принимающих решение.

Метод сценариев предполагает более основательную подготовку инновационных предложений в виде текста, содержащего анализ проблемы и предложения по ее решению. Такой сценарий содержит не только концептуальные рассуждения, детализирующие основные структурные

и функциональные аспекты проблемы, но и технико-экономический анализ предлагаемого решения.

На практике метод сценариев используется при разработке прогнозов в ряде отраслей промышленности. Сценарий в этом случае играет роль предварительного документа, на основе которого проводится углубленная работа по прогнозированию и разработке вариантов проекта.

Морфологические методы предполагают нахождение всех возможных вариантов решения проблемы путем комбинирования в различных сочетаниях тех параметров, от которых может зависеть это решение. Известны три метода морфологического исследования, отражающие принципы современной научной методологии и теории принятия решений:

1. Метод систематического покрытия поля основан на идеи выделения в пределах исследуемой предметной области, так называемых *оторных областей знания* и последующего заполнения этой области с использованием специально сформулированных принципов мышления.

2. Метод отрицания и конструирования исходит из методологического принципа фальсификации (опровергаемости) научных теорий и рекомендует отрицать устоявшиеся положения и стандартные решения, заменяя их противоположными в качестве исходных положений для последующего анализа и развития.

3. *Метод морфологического ящика* представляет собой общую методику морфологического подхода. Его идея состоит в определении всех мыслимых характеристик, от которых тем или иным образом зависит решение проблемы и формирование из них множества строк *матрицы* (морфологического ящика). Далее рассматриваются и анализируются все возможные комбинации параметров по одному из каждой строки. Полученные варианты оцениваются и сравниваются с целью выбора наилучшего решения.

Отметим, что идея морфологического подхода, разработанного известным швейцарским астрономом Ф. Цвикки, положена в основу разработки специальных языков проектирования, таких как язык ситуационного управления, языки структурно-лингвистического моделирования и некоторые другие.

Методы типа дерева целей получили распространение в связи с решением проблемы принятия решений в промышленности. Под деревом целей подразумевается иерархическая структура, сформированная путем декомпозиции общей цели на определенную глубину с выделением нескольких уровней подцелей и функций. Одной из разновидностей такого подхода является метод PATTERN (от английского Planning Assistance Through Technical Evaluation of Relevance Numbers, что означает «помощь

планированию через относительные показатели технической оценки»). Этот метод направлен на повышение эффективности прогнозирования в области долгосрочной научно-технической политики крупных промышленных корпораций.

Самостоятельную область качественных методов оценивания составляют методы группового выбора и экспертного оценивания.

5.7. МЕТОДЫ ГРУППОВОГО ВЫБОРА

В жизнедеятельности человеческого общества единоличное принятие решений в управлении системами составляет не единственный способ выбора. Как правило, при решении наиболее сложных проблем используются *методы экспертного оценивания*. Основополагающая идея такого подхода состоит в использовании знаний, опыта и интуиции людей для поиска пригодных альтернатив решения неформализованных и слабоструктурированных задач. В большинстве случаев такой *экспертный потенциал* профессионалов используется на двух уровнях: при проведении собственно экспертизы группой *экспертов* и при обработке ее результатов группой *аналитиков*.

Все множество проблем, решаемых методами экспертного оценивания, делятся на два класса. К первому из них относятся те проблемы, в отношении которых имеется определенная априорная информация. Соответствующие этому классу проблем способы опроса экспертов и обработки результатов экспертизы исходят из принципа «хорошего измерителя». Это означает, что знания эксперта считаются источником достоверной информации, а групповое мнение коллегии экспертов близко к истинному (оптимальному) решению.

Второй класс составляют проблемы, в отношении которых нет уверенности в достоверности выдвигаемых гипотез. В этом случае приходится надеяться на *опыт* и *интуицию* экспертов, а также на особо тщательное и осторожное проведение процедуры обработки результатов экспертизы.

При реализации экспертных методов принято считать, что при выполнении определенных условий мнение группы экспертов надежнее мнения отдельного эксперта. Однако для этого необходимо должным образом проводить формирование состава экспертных групп, чему в практике экспертного оценивания уделяется значительное внимание.

Экспертные оценки могут отражать как субъективные мнения отдельных экспертов, так и коллективно-субъективные черты, присущие коллегии экспертов. Первые устраняются в процессе обработки результатов экспертизы, однако способы исключения вторых неизвестны. Поэтому

особое внимание при проведении экспертизы уделяется обеспечению условий ее проведения.

Прежде всего, необходимо четко смоделировать и разграничить последовательные этапы проведения экспертизы: установление цели → разработка процедуры → формирование коллегии экспертов → анкетирование экспертов → анализ и обработка результатов анкетирования.

В процессе установления цели лицом, принимающим решение (заказчиком экспертизы) должно быть выработано однозначное понимание того, кем и для каких целей будут использованы результаты экспертизы. Далее, эксперты должны быть полностью освобождены от ответственности за последствия использования результатов. Это необходимо для исключения психологических ограничений на действия экспертов при оценивании альтернатив. Впрочем, само собой разумеется, что ЛПР, в интересах которого проводится экспертиза, должен взять всю ответственность на себя, а не перекладывать ее на других.

Особой тщательности заслуживает процедура формировании коллегии экспертов, т.е. подбор кандидатур. Прежде всего, следует убедиться, что у потенциальных экспертов отсутствует личная заинтересованность в тех или иных результатах экспертного оценивания.

Далее, следует принимать во внимание то обстоятельство, что оценки экспертов, составляющих коллегию, могут зависеть от их взаимоотношений. Кроме того, оценки эксперта могут не совпадать в зависимости от того, известны или неизвестны они другим экспертам. К тому же не следует забывать, что сложившиеся межличностные и служебные взаимоотношения между экспертами могут и стимулировать, и сковывать их деятельность.

Существенное влияние на работу экспертов оказывают их личностные качества. Так, конформизм толкает эксперта к следованию за мнением большинства, неуверенность в себе заставляет принять позицию наиболее авторитетного участника обсуждения. Желание быть оригинальным оборачивается выдвижением вычурных предложений, амбициозность не позволяет отказаться от публично высказанного мнения.

Естественно, немалую роль играют профессиональные качества экспертов, такие как уровень образования, научной квалификации, опыт, адекватная самооценка и другие.

С учетом изложенных обстоятельств, при формировании экспертных групп оказывается целесообразным включать в них разноплановых индивидов с тем, чтобы обеспечить широкий спектр оценок и, следовательно, представительное множество допустимых альтернатив.

При анализе и обработке материалов коллективной экспертизы применяются методы *теории ранговой корреляции*. Для оценки степе-

ни согласованности рядов предпочтительности, построенных двумя произвольно выделенными экспертами, служит коэффициент парной ранговой корреляции, принимающий значения от -1 до $+1$ ($-1 \leq \lambda \leq +1$). При полной согласованности мнений двух экспертов $\lambda = +1$. Значение $\lambda = -1$ соответствует двум взаимно противоположным результатам ранжирования.

Для количественного оценивания степени согласованности мнений нескольких экспертов используется коэффициент конкордации W (ассоциация — Площадь Конкорда в Париже, или площадь Согласия). Коэффициент конкордации позволяет определить, насколько совпадают ряды предпочтений, построенные каждым экспертом. Его значения лежат в пределах $0 \leq W \leq 1$, при этом $W=1$ соответствует полному совпадению всех ранжировок, а $W=0$ — полной их противоположности.

Незначительная величина коэффициента конкордации может быть обусловлена либо действительным отсутствием общности мнений в действующей коллегии экспертов, либо внутри нее сложились группировки с высокой согласованностью мнений, но обобщенные мнения таких группировок противоположны.

Выбор тех или иных процедур экспертного оценивания зависит от задачи оценивания. В случаях, когда имеет смысл ограничиться сугубо качественным оцениванием систем по определенным признакам, используются методы ранжирования, парного или множественного сравнения. Если же априорная информация достаточна для получения численных оценок, то целесообразно использовать метод непосредственного численного оценивания или более тонкие процедуры, получившие развитие в практике системного анализа.

При рассмотрении этих методов исходят из наличия конечного числа оцениваемых или измеряемых альтернатив $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ и определены один или несколько признаков сравнения альтернатив. Поэтому различные методы сравнения будут различаться только процедурой сравнения, включающей построением отношений между элементами эмпирической системы, выбор преобразования ϕ и типа измерительной шкалы.

5.8. МЕТОД И ПРОЦЕДУРЫ РАНЖИРОВАНИЯ

Ранжирование представляет собой процедуру упорядочения альтернатив, выполняемую экспертом. Эксперт, руководствуясь одним или несколькими критериями сравнения, выстраивает альтернативы в порядке их предпочтительности. В зависимости от типа отношений между альтернативами возникают различные варианты ранжировок.

В случае, если в рассматриваемом множестве не имеется эквивалентных альтернатив, между ними существуют *отношения строгого порядка*. Это означает, что по результатам сравнения выстраивается упорядоченная последовательность $a_1 > a_2 > \dots > a_N$, в которой альтернатива с первым номером определена как наиболее предпочтительная среди всех предъявленных альтернатив. Соответственно альтернатива со вторым номером менее предпочтительна, чем первая альтернатива, но предпочтительнее всех остальных альтернатив и т.д.

Построенная система альтернатив при условии их сравнимости образует *полный строгий порядок*, которому ставится в соответствие числовая система, элементами которой являются действительные числа, связанные между собой отношением неравенства. Тогда упорядоченному множеству альтернатив соответствует упорядоченное множество чисел $x_1 > x_2 > \dots > x_N$, где $x_i = \phi(a_i)$.

В практике ранжирования используется также и обратная последовательность $x_1 < x_2 < \dots < x_N$, в которой наиболее предпочтительной альтернативе приписывается наибольшее число.

Нетрудно убедиться, что ранжирование альтернатив представляет собой измерение степени их предпочтительности для эксперта в порядковой (ранговой) шкале, допускающей монотонно возрастающие преобразования.

При выполнении процедуры ранжирования, как правило, применяется представление последовательности альтернатив в виде последовательности натуральных чисел: $x_1 = \phi(a_1) = 1$; $x_2 = \phi(a_2) = 2$; $x_N = \phi(a_N) = N$. Такие числа называются *рангами*, и обозначаются символами r_1, r_2, \dots, r_N . Следует иметь в виду, что ранги-числа определяют исключительно порядок расположения альтернатив, но не позволяют судить, на сколько шкальных единиц или во сколько раз одна альтернатива предпочтительнее другой.

Следует отметить, что в ряде случаев оказывается невозможным использовать строгие численные отношения, такие как «больше», «меньше» или «равно». Тогда вводятся отношения типа «более предпочтительно», «менее предпочтительно», «равноценко» или «безразлично», и устанавливаются отношения нестрогого линейного порядка.

При этом для эквивалентных объектов назначаются одинаковые, так называемые *связанные ранги*, равные среднеарифметическому значению двух или большего количества последовательных номеров. Так, например, если эквивалентны вторая и третья альтернативы, то их связанный ранг составляет 2,5. Это удобно для последующей обработки экспертных оценок, поскольку сумма рангов N альтернатив равна сумме натуральных чисел от единицы до N .

При проведении группового ранжирования каждый эксперт присваивает каждой альтернативе определенный ранг. Далее формируется матрица рангов, которую удобно представить в виде табл. 5.1.

Таблица 5.1

Матрица рангов

Альтернатива	\mathbb{E}_1	\mathbb{E}_2	...	\mathbb{E}_k
a_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1k}
a_2	r_{21}	r_{22}	...	r_{2k}
...
a_N	r_{N1}	r_{N2}	...	r_{Nk}

Аналогичная таблица строится и в случае индивидуальной экспертизы, проводимой по нескольким критериям сравнения. При этом оценки одного эксперта группируются по соответствующим критериям (показателям сравнения).

Ранжирование, как метод экспертного оценивания, отличается относительной простотой проведения процедуры, однако у него имеется существенное ограничение. Дело в том, что при относительно большом количестве предъявленных для ранжирования объектов (более 10–12) эксперты испытывают затруднения с построением ранжировок для всей совокупности взаимосвязанных альтернатив. Следовательно, во избежание ошибок следует ограничивать количество объектов, подлежащих ранжированию.

5.9. ПАРНЫЕ И МНОЖЕСТВЕННЫЕ СРАВНЕНИЯ

Метод парного сравнения состоит в установлении предпочтений при сравнении всех возможных пар из множества предъявленных альтернатив. При сравнении каждой пары требуется установить либо отношение строгого порядка, либо отношение эквивалентности, т.е. парное сравнение, так же, как и ранжирование представляет собой измерение в порядковой (ранговой) шкале.

Проводя сравнение пары объектов, эксперт упорядочивает ее, определяя отношения либо $a_i > a_j$, (a_i предпочтительнее a_j), либо $a_i > a_j$, (a_j предпочтительнее a_i), либо $a_i = a_j$ (a_i и a_j эквивалентны). В числовых представлениях ранговой шкалы эти отношения отображаются следующим образом: если $a_i > a_j$, то $\phi(a_i) > \phi(a_j)$; если предпочтение в паре

обратное, то используется обратный знак неравенства, т.е. $\phi(a_i) > \phi(a_j)$; для эквивалентных альтернатив считается, что $\phi(a_i) = \phi(a_j)$.

Результаты сравнения всех возможных пар отображаются с помощью матрицы. Для элементов матрицы используются следующие числовые представления:

$$x_{ij} = 2, \text{ если } \phi(a_i) > \phi(a_j);$$

$$x_{ij} = 1, \text{ если } \phi(a_i) = \phi(a_j);$$

$$x_{ij} = 0, \text{ если } \phi(a_i) < \phi(a_j).$$

Для примера рассмотрим случай парного сравнения пяти пар объектов, результаты которого представлены в виде:

$$a_1 > a_2; a_1 > a_3; a_1 > a_4; a_1 < a_5; a_2 > a_3; a_2 \approx a_4; a_2 < a_5; a_3 > a_4; a_3 > a_5; a_4 < a_5.$$

Матрица, отображающая результаты парного сравнения с использованием приведенных числовых представлений, показана в виде табл. 5.2.

Таблица 5.2

Представление результатов парного сравнения

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
a_1	1	2	2	2	0
a_2	0	1	2	1	0
a_3	0	0	1	2	0
a_4	0	1	0	1	0
a_5	2	2	2	2	1

Как видим, на диагонали матрицы расположены единицы, поскольку каждый объект эквивалентен самому себе. В каждой паре более предпочтительная альтернатива оценивается цифрой 2 (победа), а менее предпочтительная — цифрой 0 (поражение). Нетрудно установить, что именно так отображаются результаты круговых турниров в командных видах спорта. Отметим, правда, что в футболе за победу начисляется три очка, а в баскетболе — одно очко (ничьи не предусмотрены правилами этой игры).

Наряду с приведенным выше числовым представлением в практике парных сравнений используется адекватное ему представление, при

котором более предпочтительная альтернатива получает оценку +1, менее предпочтительная — оценку -1, а две эквивалентные альтернативы — оценку 0.

В случае, когда парное сравнение проводится по нескольким показателям сравнения, либо группой экспертов, то для каждого показателя или эксперта составляется отдельная таблица.

Очевидно, однако, что парное сравнение не позволяет получить полного упорядочения систем, поэтому его можно рассматривать как предварительный этап, предшествующий *ранжированию*.

Множественные сравнения отличаются от парных тем, что экспертам последовательно предъявляются для сравнения группы из трех, четырех, пяти и так далее объектов. Такой прием позволяет с одной стороны ограничить количество предъявляемых альтернатив по сравнению с ранжированием, с другой — предоставить эксперту относительно большое число объектов, не превышающее, однако, их приемлемого для эксперта объема.

Результат множественных сравнений может быть отображен в шкалу интервалов методом *непосредственного оценивания*. В этом случае эксперт должен поставить в соответствие каждому объекту точку на определенном отрезке числовой оси. При этом эквивалентным объектам приписываются одинаковые числа. Если в качестве начала отсчета выбирается нулевая точка на отрезке $[0, 1]$, то измерение проводится в шкале отношений. Для использования сильных шкал эксперту необходимо располагать достаточно полной информацией о свойствах объектов, что на практике бывает нечасто. Поэтому измерение, как правило, проводится в балльных шкалах. Присваивая объекту определенный балл, эксперт тем самым проводит измерение с точностью до некоторого отрезка числовой оси. На практике используется хорошо известная 5-балльная шкала, а также 10- и 100-балльные шкалы.

Более сложная процедура множественного сравнения реализуется при проведении *последовательного сравнения* (метод Черчмена — Акоффа). Этот метод включает корректировку указанных экспертом оценок. При этом считается, что если $\phi(a_i)$ и $\phi(a_j)$ — оценки двух альтернатив, то $\phi(a_i) + \phi(a_j)$ соответствует совместному осуществлению альтернатив a_i и a_j . В этом состоит предположение об *аддитивности* оценок альтернатив.

В ходе последовательного сравнения альтернативы ранжируются по предпочтительности. Пусть альтернатива a_1 — наиболее предпочтительная, за ней следует a_2 и так далее. Эксперт определяет предварительные численные оценки $\phi(a_i)$ для каждой альтернативы. Как правило, наиболее предпочтительной альтернативе приписывается оценка 1, а остальные оценки располагаются в интервале $[0, 1]$ в соответствии

со степенью их предпочтительности. Затем эксперт проводит сравнение альтернативы a_i и суммы остальных альтернатив. Если эксперт считает, что a_i предпочтительнее суммы остальных альтернатив, то он корректирует оценки таким образом, чтобы

$$\phi(a_i) > \sum \phi(a_j).$$

В противном случае альтернатива a_i сравнивается с суммой альтернатив, из которой исключаются последовательно наименее предпочтительные альтернативы, до тех пор, пока a_i не окажется более предпочтительной, чем сумма оставшихся альтернатив. После этого она исключается из рассмотрения, и эксперт рассматривает и корректирует оценку альтернативы a_2 . Аналогичные процедуры проводятся с остальными альтернативами, пока не будут откорректированными оценки всех альтернатив.

Если измерение альтернатив целесообразно проводить в шкале отношений, то после присвоения наиболее предпочтительной альтернативе максимальной оценки эксперт указывает, во сколько раз каждая из остальных альтернатив менее предпочтительна, чем a_1 . Далее проводится корректировка оценок.

Метод Черчмена — Акоффа относится к числу наиболее трудосмущих, но, тем не менее, широко используется в практике оценивания альтернатив.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте определение проблемной ситуации.

Перечислите принципы системного анализа.

2. Опишите структуру системного исследования.

3. Какие процедуры выполняются в ходе системного анализа?

Какова последовательность этих процедур?

4. В чем состоят процедуры декомпозиции и агрегирования?

5. В чем состоит сложность процедуры целеполагания?

6. Как осуществляется структурирование цели?

7. Назовите основные типы целей.

8. Как формулируется задача выбора в системном анализе?

9. Перечислите основные методы качественного оценивания.

10. В чем состоит специфика методов группового выбора?

11. Что такое морфологический ящик?

12. Как формулируется условия проведения «мозгового штурма»?

со степенью их предпочтительности. Затем эксперт проводит сравнение альтернативы a_i и суммы остальных альтернатив. Если эксперт считает, что a_i предпочтительнее суммы остальных альтернатив, то он корректирует оценки таким образом, чтобы

$$\phi(a_i) > \sum \phi(a_j).$$

В противном случае альтернатива a_i сравнивается с суммой альтернатив, из которой исключаются последовательно наименее предпочтительные альтернативы, до тех пор, пока a_i не окажется более предпочтительной, чем сумма оставшихся альтернатив. После этого она исключается из рассмотрения, и эксперт рассматривает и корректирует оценку альтернативы a_2 . Аналогичные процедуры проводятся с остальными альтернативами, пока не будут откорректированными оценки всех альтернатив.

Если измерение альтернатив целесообразно проводить в шкале отношений, то после присвоения наиболее предпочтительной альтернативе максимальной оценки эксперт указывает, во сколько раз каждая из остальных альтернатив менее предпочтительна, чем a_1 . Далее проводится корректировка оценок.

Метод Черчмена — Акоффа относится к числу наиболее трудосмущих, но, тем не менее, широко используется в практике оценивания альтернатив.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте определение проблемной ситуации.

Перечислите принципы системного анализа.

2. Опишите структуру системного исследования.

3. Какие процедуры выполняются в ходе системного анализа?

Какова последовательность этих процедур?

4. В чем состоят процедуры декомпозиции и агрегирования?

5. В чем состоит сложность процедуры целеполагания?

6. Как осуществляется структурирование цели?

7. Назовите основные типы целей.

8. Как формулируется задача выбора в системном анализе?

9. Перечислите основные методы качественного оценивания.

10. В чем состоит специфика методов группового выбора?

11. Что такое морфологический ящик?

12. Как формулируется условия проведения «мозгового штурма»?

ГЛАВА 6

ОЦЕНИВАНИЕ СИСТЕМ

6.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В ходе разработки и эксплуатации современных сложных систем выявляются разнообразные практические проблемы, решение которых оказывается возможным исключительно на основе получения комплексных оценок различных по своей природе факторов, внешних воздействий, неоднородных внутренних связей. Поэтому в системных исследованиях выделилось направление, называемое *теорией эффективности* и связанное с определением качества систем и выполняемых ими операций.

Итак, теория эффективности — научное направление, предметом изучения которого является методология количественного оценивания характеристик качества и эффективности функционирования сложных систем. Всем соответствующие определения.

Качество — это совокупность существенных свойств системы, обусловливающих ее пригодность (соответствие) для использования по назначению.

Эффективность — это комплексное операционное свойство процесса функционирования системы, характеризующее его приспособленность к достижению поставленной цели.

Следует подчеркнуть, что при определении качества систем (и их оценивании) учитываются главным образом их структура и свойства основных компонентов. Когда же речь заходит об эффективности, то, наряду с качеством действующего в системе алгоритма функционирования, рассматриваются воздействия (условия) внешней среды, играющие роль ограничений, накладываемых на функционирование или развитие системы.

Таким образом, можно утверждать, что *качество системы является необходимым, но недостаточным условием ее эффективности*. Иными словами, качественная система в определенных (экстремальных) условиях внешней среды может оказаться неэффективной, о чем свидетельствует

реальная практика. Очевидно также, что качественная система окажется малозэффективной при ее использовании не по назначению.

Это означает, что при разработке сложных систем показатели их качества в неявном виде «закладываются» в расчете на типовые (нормальные) условия внешней среды. Именно поэтому качество сложных систем складывается из множества ее свойств (характеристик), а для оценивания их эффективности оказывается достаточным весьма ограниченным набором показателей.

Терминология теории эффективности разделяет понятия «оценка» и «оценивание». Под *оценкой* понимается результат, получаемый в результате выполнения процедур, совокупность которых определяется как *оценивание*. Принято считать, что термину «оценка» соответствует понятие «истинность», а с термином «оценивание» связано понятие «правильность». Это означает, что истинная оценка качества или эффективности системы может быть получена только при правильном выполнении процедур оценивания. Это принципиальное положение определяет место теории эффективности в теории и практике системных исследований.

В общем случае оценивание сложных систем проводится с различными целями. Целью *оптимизации* является выбор наилучшего алгоритма функционирования из нескольких, способных реализовать требуемый закон функционирования. При решении задачи управления системой ее оценивание необходимо для принятия (выбора) решения на множестве альтернатив. В случае, когда ставится задача *идентификации*, необходимо выявить систему, характеристики которой в наибольшей степени соответствуют определенному классу систем. Распространенная цель оценивания альтернативных систем состоит в их *ранжировании*, т.е. установлении порядка их предпочтительности. Этим перечень практических задач, требующих проведения оценивания систем, конечно же, не исчерпывается.

Логика оценивания сложных систем выделяет четыре этапа его проведения.

Этап 1. Определение цели оценивания (целеполагание). Определение цели, как правило, осуществляется относительно системы, в которой оцениваемая система является подсистемой, т.е. с точки зрения целей надсистемы. При проведении системного анализа (системного исследования) задаются цели двух типов: качественные и количественные цели. При этом используются соответственно качественные и количественные *шкалы*, о которых речь пойдет ниже.

Этап 2. Измерение характеристик систем, признанных существенными для конкретных целей оценивания. При этом для измерения

различных характеристик выбираются разные качественные и количественные шкалы и всем измеряемым характеристикам присваиваются определенные значения на соответствующих шкалах.

Этап 3. Обоснование критериев качества и критериев эффективности функционирования систем. Требуемые качество и эффективность системы задаются условиями (правилами), которым должны удовлетворять показатели существенных свойств, т.е. значения измеренных характеристик.

Этап 4. Собственно оценивание. Все исследуемые системы рассматриваются как альтернативы и сравниваются по степени соответствия сформулированным критериям. При этом возможен переход от относительно «мягких» требований к более «жестким» и наоборот. Далее по результатам сравнительного оценивания и в зависимости от его целей производится выбор, оптимизация, ранжирование и т.д.

6.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ШКАЛ

В основе процедуры оценивания лежит сопоставление значений характеристик исследуемой системы значениям выбранных шкал. Практика измерений показала, что все возможные шкалы принадлежат к одному из нескольких типов, определяемых набором допустимых операций на этих шкалах.

Измерением будем называть алгоритмическую операцию, которая ставит в соответствие каждой наблюдаемой характеристике системы, процесса или явления определенное обозначение.

Формально шкалой будем называть кортеж из трех элементов $\langle X, \phi, Y \rangle$, где X — реальная (эмпирическая) система, Y — шкала, ϕ — гомоморфное отображение X на Y . В современной теории измерений приняты следующие определения:

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_n, R_x\}$ — эмпирическая система, содержащая множество свойств (измеряемых характеристик) x_i , на которых в соответствии с целью измерения задано определенное отношение R_x . В процессе измерения каждому свойству $x_i \in X$ ставится в соответствие признак (на качественной шкале) или число (на количественной шкале), характеризующие степень проявления этого свойства. Обычно при оценивании элементы x_i представляют собой альтернативы, а отношение R_x определяет правило сравнения этих альтернатив;

$Y = \{\phi(x_1), \phi(x_2), \dots, \phi(x_n), R_y\}$ — знаковая система с отношением, являющаяся отображением эмпирической системы с помощью некоторых чисел (на количественных шкалах) или образов (на качественных шкалах);

$\phi \in \Phi$ — гомоморфное отображение X на Y , устанавливающее соответствие между X и Y таким образом, что $\phi(x_i) \in Y$ тогда и только тогда, когда $x_i \in X$.

$\Phi = \{\phi_1, \dots, \phi_m\}$ — множество допустимых преобразований $x_i \rightarrow y_i$, определяющее тип измерительной шкалы.

Согласно приведенным определениям измерение эмпирической системы X с отношением R_x заключается в нахождении знаковой системы Y с отношением R_y , являющейся гомоморфным отображением измеряемой системы. Как видим, в отличие от моделирования, основанного на изоморфизме множеств, для измерения свойств объекта на шкалах адекватным является гомоморфное отображение множества его свойств множеством шкальных значений.

В классической теории измерений рассматриваются только такие объекты, про любые два состояния которых можно сказать, различимы они или нет. В ней также приняты только такие алгоритмы измерения, которые различимым состояниям ставят в соответствие разные обозначения, а неразличимым состояниям — одинаковые обозначения. С позиций математики это означает, что состояния объектов и их обозначения должны удовлетворять аксиомам эквивалентности:

- 1) рефлексивности ($A=A$);
- 2) симметричности (если $A=B$, то $B=A$);
- 3) транзитивности (если $A=B$ и $B=C$, то $A=C$).

Отметим, что здесь символ « $=$ » обозначает отношение эквивалентности, которое при числовых значениях A , B и C трансформируется в равенство.

Рассмотрим основные типы качественных (слабых) и количественных (сильных) шкал.

1. Шкалы номинального типа

Если измерение состоит в том, чтобы определить принадлежность результата к тому или иному классу эквивалентности и зафиксировать это с помощью символа, обозначающего этот класс, то это будет измерение, проведенное на номинальной шкале.

Номинальная шкала (шкала наименований), по сути своей является классификационной шкалой, на которой эмпирическим объектам или их неразличимым группам присваивается определенный признак. Множество шкал номинального типа задается множеством взаимно однозначных допустимых шкальных значений. Поэтому основное свойство таких шкал — сохранение отношений равноправия между элементами эмпирической системы при переходе от одной эквивалентной шкалы к другой.

Признак, задаваемый на номинальной шкале, дает объектам независимые друг от друга имена, которые либо совпадают, либо различаются. Поэтому шкалы номинального типа допускают только различие объектов на основе проверки выполнения отношения равноправия (равенства) на множестве этих объектов. Это означает, что на номинальных шкалах может выполняться простейший вид измерений, при котором шкальные значения используются только как имена (наименования) объектов, что дает основание называть их шкалами наименований.

Для обозначения классов могут использоваться слова естественного языка (географические названия, имена и фамилии), определенная символика (гербы и флаги государств, эмблемы, логотипы и т.д.), регистрационные номера. Примерами использования номинальных шкал могут служить коды городов, номера телефонов, автомашин и т.п.

При статистических измерениях номинальная шкала позволяет подсчитывать частоту встречаемости разных наименований объектов или значений их определенных характеристик для последующей обработки с помощью математических методов.

Цель соответствующих измерений состоит в выявлении различий между объектами разных классов. Если классы состоят каждый из одного объекта, то номинальная шкала используется для различения объектов. Если при этом двум или нескольким объектам поставлено в соответствие одно и то же шкальное значение (цифра, но не число), то эти объекты признаются неразличимыми.

В случаях, когда природа наблюдаемых признаков позволяет не только отождествлять их с определенными классами эквивалентности, но и сравнивать их между собой, для измерения целесообразно использовать более сильную шкалу. По этому признаку за номинальной шкалой следует ранговая (порядковая) шкала.

2. Ранговые шкалы

Качественная шкала называется *ранговой шкалой* (шкалой порядка), если множество Φ состоит из монотонно возрастающих допустимых преобразований шкальных значений. Монотонно возрастающим является преобразование $\phi(x)$, удовлетворяющее условию: если $x_1 > x_2$, то и $\phi(x_1) > \phi(x_2)$ для любых шкальных значений из области определения $\phi(x)$. Ранговый тип шкал допускает не только различие объектов, но и их упорядочение по степени проявления измеряемых свойств.

Для ранговой шкалы результаты измерений, кроме трех аксиом эквивалентности, должны дополнительно удовлетворять двум аксиомам *упорядоченности*:

- 4) если $A \neq B$, то либо $A > B$, либо $B > A$;

5) если $A > B$ и $B > C$, то $A > C$.

Этими аксиомами задается шкала *совершенного (строгого) порядка*.

В случае, когда аксиомы (4–5) принимают вид:

4*) либо $A \geq B$, либо $B \geq A$;

5*) если $A \geq B$ и $B \geq C$, то $A \geq C$,

то им соответствует шкала *квазипорядка (нестрого порядка)*.

Ранговые (порядковые) шкалы широко используются при проведении измерений в условиях неопределенности экспертными и другими качественными методами, когда целью измерения является ранжирование ограниченного множества объектов (см. параграфы 5.7–5.9).

Результат измерения на ранговой шкале не определяет интервалов между шкальными значениями объектов (классов), но устанавливает возрастающую или убывающую *последовательность*. Важно помнить, что результаты наблюдения, зафиксированные в такой шкале, *не являются числами*. Над ними нельзя проводить не только арифметические действия, но и вообще любые действия, результат которых изменится при преобразованиях шкалы, не нарушающих ее порядковый статус. Допустимые операции над ранговыми шкалами (шкалами порядка) вытекают из отношений *эквивалентности* и *предпочтения*, т.е. представляют собой операции проверки выполнимости этих отношений.

Рассмотрим эти ограничения на примере хорошо известной шкалы твердости Ф. Мооса, в основу которой положено классическое отношение порядка (минерал A тверже минерала B). В шкале Мооса установлено 10 градаций твердости, каждой из которых соответствует в качестве эталона определенный минерал: 1 — тальк, 2 — гипс, 3 — кальцит, 4 — флюорит, 5 — апатит, 6 — ортоклаз, 7 — кварц, 8 — топаз, 9 — корунд, 10 — алмаз.

Несмотря на числовой характер градаций (классов эквивалентности), числами они не являются. Нельзя, в частности, говорить, что топаз в два раза тверже флюорита, или, что разница в твердости между алмазом и топазом такая же, как между апатитом и кальцитом. Более того, минералов в природе гораздо больше, чем число градаций, а промежуточных единиц градаций твердости шкала не имеет. Следовательно, шкала Мооса устанавливает искусственно введенные отношения нестрогого порядка на множестве.

Другими примерами ранговых шкал могут служить шкалы силы ветра, интенсивности землетрясений, сортности товаров (в торговле) и т.п.

Шкалами номинального и рангового типов ограничивается класс слабых (качественных) шкал. Переходим теперь к рассмотрению класса сильных (количественных) шкал.

3. Шкалы интервалов

Если при упорядочении объектов известны расстояния между любыми двумя значениями, и эти расстояния не зависят от выбора начала отсчета и единиц измерения, то мы используем *шкалу интервалов*.

Этот тип шкал содержит шкалы, единственныес точностью до множества допустимых линейных преобразований вида $\phi(x) = ax + b$, где a — масштаб шкалы, b — начало отсчета, x — шкальное значение; $a > 0$; b — любое значение.

Основное свойство этих шкал состоит в сохранении неизменных отношений интервалов при переходе от одной шкалы к другой:

$$x_1 - x_2 / x_3 - x_4 = \phi(x_1) - \phi(x_2) / \phi(x_3) - \phi(x_4) = const. \quad (6.1)$$

Шкалы интервалов, так же как номинальные и ранговые шкалы, сохраняют различие и упорядоченность измеряемых объектов (альтернатив), но, кроме этого, они *сохраняют отношение разностей шкальных значений*. Иными словами, запись

$$x_1 - x_2 / x_3 - x_4 = K \quad (6.2)$$

означает, что расстояние на шкале между x_1 и x_2 в K раз больше расстояния между x_3 и x_4 , и на любой эквивалентной, т.е. тоже интервальной шкале это отношение будет оставаться неизменным.

Подчеркнем, что в интервальной шкале только интервалы имеют смысл настоящих чисел и только над ними можно выполнять любые арифметические операции. При проведении таких операций над самими шкальными значениями, как правило, получаются бессмысленные результаты — в силу относительности этих значений.

Например, интервальными являются шкалы температур: переход от одной шкалы к другой эквивалентной (например, от шкалы Цельсия к шкале Фаренгейта) задается линейным преобразованием с изменением как начала отсчета (параметр b), так и масштаба измерений (параметр a): $t^{\circ}\text{F} = 1,8t^{\circ}\text{C} + 32$. Однако, если сказать, что при нагреве воды от 10 до 20 градусов (по Цельсию) ее температура увеличилась вдвое, то, скажем для американцев (привыкших использовать шкалу Фаренгейта) это будет непонятно, поскольку по Фаренгейту температура увеличилась от 50° до 68° , т.е. на 36%.

Как видим, единственной новой допустимой операцией над шкальными значениями для интервальной шкалы является определение интервала между ними. При сравнительном оценивании характеристик альтернативных систем шкалы интервалов дают результат измерения: «больше на определенное количество единиц — меньше на определенное количество единиц».

4. Шкалы отношений

Если на интервальной шкале зафиксировать начало отсчета, то это усилит ее, превратив в *шкалу отношений*.

Шкалой отношений (подобия) является шкала, для которой множество допустимых преобразований Φ состоит из преобразований подобия $\phi(x) = ax$, где x — шкальные значения из области определения, a — действительные числа ($a > 0$). При фиксированном нуле (начале отсчета) в таких шкалах имеется свобода выбора единиц измерения.

Шкалы отношений составляют подмножество шкал интервалов с фиксированным началом отсчета ($b = 0$). В шкалах отношений неизменными остаются отношения численных оценок.

Переход от одной эквивалентной шкалы отношений к другой обеспечивается преобразованием *подобия* (растяжения или сжатия), т.е. изменением масштаба измерений.

С математической точки зрения для шкалы отношений, кроме аксиом эквивалентности и упорядоченности (1–5) должны выполняться аксиомы *аддитивности*:

- 6) $A+B = B+A$;
- 7) если $A = C$ и $B > 0$, то $A+B > C$;
- 8) если $A = C$ и $B = D$, то $A+B = C+D$;
- 9) $(A+B)+C = A+(B+C)$.

Результаты измерения на шкале отношений представляют собой полноправные числа: с ними можно проводить любые арифметические действия и процедуры статистической обработки.

Существенным свойством шкал отношений является то, что они отражают отношение характеристик систем, т.е. во сколько раз свойство одной системы превосходит это же свойство альтернативной системы.

Примерами измерений в шкалах отношений может служить измерение расстояний, длин и масс объектов. Как известно, в этих случаях на практике используется значительное разнообразие численных оценок, в частности при измерении в метрах, ярдах, футах и т.д. Тем не менее, в какой бы системе единиц ни производилось измерение, отношение, например, длин любых объектов не меняется.

Еще пример: стоимость товаров в разных валютах имеет различное номинальное значение, но отношение стоимостей товаров будет одинаковым при переходе с одной валюты на другую.

5. Шкалы разностей

Шкалы разностей вводятся как шкалы, единственны с точностью до преобразования сдвига $\phi(x) = x + b$ ($a = 1$). Это означает, что шкалы разностей тоже являются частным случаем шкал интервалов с фик-

сированным масштабом измерения. Начало отсчета при этом может выбираться произвольно. Поэтому эти шкалы, сохранив отношение интервалов между оценками, не сохраняют отношения самих оценок. В шкалах разностей неизменными остаются разности численных оценок характеристик систем.

Константа b является характерным параметром шкалы разностей и называется ее *периодом*. Поэтому такую шкалу называют также *непериодической*.

Над показаниями, полученными в шкале разностей, можно выполнять любые арифметические действия. При этом, правила следует иметь в виду, что начало отсчета, хотя и является общепринятым, но-сит условный характер. При переходе на зимнее или летнее время, при пересечении границ часовых поясов или линии смены дат необходимо вносить в результаты измерений соответствующие уточнения.

6. Абсолютные шкалы

Абсолютными принято называть шкалы, для которых единственным допустимым преобразованием является тождественное преобразование. Это означает, что существует только одно отображение измеряемых объектов в числовую систему. *Абсолютная шкала* имеет абсолютный ноль и абсолютную единицу измерения.

Перечисленные свойства характерны для *числовой оси*. Ее особенности — отсутствие размерности и абсолютность единицы. Это позволяет проводить над показаниями абсолютной шкалы операции, не допустимые для других шкал, в частности, использовать их в качестве показателей степени и оснований логарифмов. Числовая ось применяется в качестве измерительной шкалы в явном виде при измерении количества объектов и событий, а в качестве вспомогательного средства используется во всех других шкалах.

Абсолютные шкалы, являясь частным случаем всех рассмотренных выше шкал, сохраняют все ранее перечисленные отношения между числовыми оценками характеристик объектов: различие (эквивалентность), порядок, отношение интервалов, отношение и разность значений.

6.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НА РАЗНЫХ ШКАЛАХ

При измерении и оценивании качества сложных систем зачастую разные их характеристики, служащие частными показателями качества, могут измеряться на разных типах шкалах — от слабых до самых сильных. Как правило, для получения надежных значений проводится несколько

измерений одного показателя с последующим осреднением. Кроме того, осреднение однородных частных показателей может проводиться для получения обобщенных показателей качества систем.

При измерении и оценивании показателей на сильных шкалах трудностей обычно не возникает. Более сложным оказывается оценивание на качественных, в основном, ранговых шкалах. В частности, при измерении на ранговой шкале необходимо различать *несравнимые альтернативы*, допускающие косвенную сравнительную оценку, от *существенно несравнимых альтернатив*. Так, например, пусть эксперт считает несравнимыми альтернативы y_1 и y_2 , но при этом считает альтернативу y_1 более предпочтительной, а альтернативу y_2 менее предпочтительной, чем альтернатива y_3 . Тогда можно, в порядке уточнения, признать y_1 более предпочтительной, чем y_2 . Отдельные показатели в процессе системного анализа могут уточняться существенным образом, что открывает возможность перехода от оценки, полученной на ранговой шкале, к оценке на количественной шкале.

В теории шкалирования (раздел теории эффективности) определены правила и допустимые операции осреднения характеристик. Допускается проводить осреднение только для однородных характеристик, измеренных на одной шкале. Значения разных показателей нередко имеют для исследователя различную ценность, которая учитывается с помощью коэффициентов значимости (весовых коэффициентов).

Приведем основные формулы осреднения.

1. Средневзвешенное арифметическое $y = \sum c_i y_i$
2. Среднеарифметическое $y = 1/n \sum y_i$
3. Среднеквадратичное $y = \sqrt{1/n \sum y_i^2}$
4. Средневзвешенное геометрическое $y = \prod y_i^c$
5. Среднегеометрическое $y = \sqrt[n]{\prod y_i}$

На практике используются также и другие виды осреднения, в частности, средневзвешенное гармоническое и среднегармоническое. Обратим внимание на то, что средневзвешенные величины получают с использованием весовых коэффициентов.

Средние и средневзвешенные величины отличаются друг от друга не только по величине и способу вычисления, но и по той роли, которую они играют в решении задач системного анализа. Средневзвешенные

величины незаменимы при сравнительном оценивании систем с учетом вклада различных показателей в осредненную оценку.

Среднеарифметическое значение используется в случаях, когда необходимо сравнить абсолютные значения определенных характеристик множества альтернативных систем, среднегеометрическое — для определения относительной разности отдельных значений, когда интерес представляет относительный разброс параметров. Если при осреднении необходимо сохранить неизменной сумму квадратов исходных величин, то следует использовать среднеквадратичное значение показателей.

Очевидно, что в каждом конкретном случае следует тщательно оценивать допустимость применения тех или иных средних величин при использовании тех или иных шкал. В частности, средневзвешенное арифметическое, наиболее часто применяемое в качестве обобщенного показателя, допустимо использовать тогда и только тогда, когда значения частных показателей измерены в шкале отношений.

Развитие теории шкалирования и ее применений, в частности, для нужд математического обеспечения информационных систем связано с заимствованием понятий нечеткой и лингвистической переменных из области теории нечетких множеств и введением понятия нечеткой шкалы. Привлечение понятия функции принадлежности, характеристики для этой теории, представляется перспективным для проведения более тонких измерений качественных характеристик, а также учета неопределенностей, свойственных сложным системам.

В заключение раздела сведем данные, относящиеся к различным измерительным шкалам в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Основные характеристики измерительных шкал

Наименование шкалы	Определяющие отношения	Эквивалентное преобразование	Допустимая обработка данных
Номинальная	Эквивалентность	Перестановки наименований	Вычисление относительных частот
Ранговая	Эквивалентность, предпочтение	Монотонное	Вычисление относительных частот и выборочных квантилей
Интервальная	Эквивалентность, предпочтение, сохранение отношения интервалов	Линейные преобразования	Арифметические действия над интервальными значениями
Разностная	Эквивалентность, предпочтение, сохранение отношения интервалов	Преобразование сдвига	Арифметические действия над шкальными значениями

Наименование шкалы	Определяющие отношения	Эквивалентное преобразование	Допустимая обработка данных
Отношений	Эквивалентность, предпочтение, сохранение отношения интервалов, периодичность	Преобразование растяжения	Любая арифметическая и статистическая обработка
Абсолютной	Эквивалентность, предпочтение, сохранение отношения двух значений, абсолютный нуль	Шкала уникальна и единственно	Любая математическая обработка

Приведенные в таблице сведения могут быть полезными при выборе измерительной шкалы для решения той или иной задачи.

6.4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Процессы, происходящие в природе и обществе, редко бывают детерминированными. На их протекание влияет множество факторов, которые в большинстве случаев имеет случайный характер. Тем не менее, измерение случайных характеристик позволяет уменьшать неопределенность относительно исследуемых процессов и систем. В результате исследователь получает возможность уточнять синтезируемую модель объекта исследования.

Дополнение результатов непосредственных измерений случайных величин адекватными методами их обработки, составляет методологию *статистических измерений*. Речь идет о самостоятельном разделе метрологии, имеющей собственную теоретическую базу, измерительную технику и технологию.

Существует несколько подходов к определению природы случайности. Первый из них отражает взгляды П. Лапласа, основоположника концепции классического детерминизма. По его мнению, случайность не присуща самим объектам и процессам, а только отражает неопределенность, которая, в принципе, устранима. Сторонники такого подхода определяют случайность как вид неопределенности, которая, тем не менее, подчиняется строгой закономерности, выражаемой распределением вероятности событий.

Другая, по сути, противоположная точка зрения основана на рассмотрении случайности как объективного свойства материи, а детерминизма — как некоторого предельного случая проявления случайности.

Естественно, существует и промежуточная позиция, согласно которой в мире происходит как детерминированные (однозначно предсказуемые), так и случайные процессы. При этом случайность может проявляться в разной степени, которая описывается тем или иным статистическим законом распределения вероятностей происходящих событий.

Различия приведенных подходов, впрочем, никаким образом не проявляются в ходе проведения статистических измерений и обработки их результатов. В реальных условиях проявление объективных, и субъективных факторов случайности не вносит изменений в методологию и результат измерений.

В статистических исследованиях различают два основных типа моделей — классификационные и числовые. Классификационные модели отражают первичные формы знания. С их созданием и применением связаны такие задачи, как кластеризация, классификация, упорядочение и сокращение размерности.

6.5. РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Результаты любого эмпирического (опытного) исследования должны быть зафиксированы на материальных носителях, определенным образом обработаны с тем, чтобы они могли быть использованы для снятия априорной неопределенности при решении той или иной проблемной ситуации.

В практике системного анализа прослеживается три последовательных этапа проведения статистических измерений:

- непосредственное измерение существенных характеристик;
- обработка измерительных данных и их интерпретация;
- использование информации, получаемой в результате обработки данных.

Результаты измерений фиксируются, как правило, в протоколах наблюдений. Особое внимание при работе с протоколами измерений уделяется факторам, которые способны при несоблюдении определенных правил привести к искажению результатов. Наиболее существенными среди этих факторов являются:

- разнотипность данных;
- большая размерность выборки;
- зашумленность результатов;
- искажения данных;
- пропущенные значения.

Рассмотрим их последовательно.

Разнотипность данных. Очевидно, что различные характеристики исследуемых систем имеют разный физический смысл и могут измеряться на разных шкалах. Дело в том, что выбор измерительной шкалы зависит от природы и характера измеряемой величины. Однако большинство существующих пакетов прикладных программ, предназначенных для статистической обработки данных, могут работать только с однотипными данными, т.е. данными, полученными в результате измерений, проведенных на одной шкале.

Поэтому возникает необходимость приведения разнотипных данных к одной определенной шкале. При этом перевод результатов в более сильную шкалу требует тщательного анализа. В частности, при переходе от порядковой (ранговой) шкалы к сильным (количественным) шкалам для «усиления» качественной шкалы используются такие приемы как «оцифровка» и ранжирование в соответствии с «силой предпочтения».

Под оцифровкой понимается использование номеров рангов в качестве количественных характеристик степени проявления исследуемых свойств. Введение понятия «сила предпочтения» позволяет количественно сопоставлять интервалы между положениями альтернатив на порядковой шкале, т.е. автоматически перейти к числовой шкале.

Большая размерность выборки. В ряде статистических исследований и испытаний количество объектов и число их измеряемых характеристик могут быть настолько велики, что произведение этих чисел достигает нескольких десятичных порядков. Если, к тому же, приходится измерять эти характеристики в дискретные фиксированные моменты времени, то размерность исходного множества данных статистического исследования возрастает во много раз. Это обстоятельство даже с учетом мощности современных компьютеров может приводить к расходованию весьма больших вычислительных ресурсов и тем самым к снижению эффективности процесса.

Зашумленность результатов. Как известно, весьма часто значения измеренных величин, занесенные в протокол, фактически отклоняются от измеряемого значения на некоторую случайную величину. Статистика появления такой помехи может не зависеть от самой измеряемой величины, и тогда ее называют *аддитивным* (суммируемым) шумом. В тех же случаях, когда статистические свойства сопровождающей помехи зависят от самой измеряемой величины, исследователь имеет дело с *неаддитивным* шумом. Очевидно, что при обработке результатов измерений учет разных по своей природе шумов следует проводить соответствующими методами.

Искажение данных. Данные, занесенные в протокол измерений, в обязательном порядке следует оценивать на предмет соответствия той модели, которая отражает исходные предположения о природе и смысле измеряемых величин. Дело в том, что на практике нередки случаи, когда данные протокола интерпретируются неадекватно принятому алгоритму обработки. К примеру, измеряемая непрерывная величина отображается в виде округленных дискретных значений, что нередко приводит к искажению результата; причиной искажений может оказаться нелинейность измерительного прибора.

Пропущенные значения. В статистических измерениях нередки случаи, когда определенные ячейки протокола наблюдений оказываются незаполненными. Наиболее характерно появление таких пропущенных значений для статистических исследований и испытаний, проводимых в естественных, а не лабораторных условиях (экономические, социологические исследования, промышленный эксперимент). Кроме очевидного решения об исключении из обработки пропущенных значений (вместе со всеми относящимися к ним сведениями) может быть применен тот или иной способ восстановления этих значений. Такая возможность обусловлена избыточностью, которая, как правило, существует в исходном протоколе. Отметим, однако, что универсального метода восстановления пропущенных данных, видимо, не существует. Поэтому всякий раз, когда возникает такая задача, приходится разрабатывать, обосновывать и согласовывать оригинальный, по сути, подход к ее решению.

6.6. СОДЕРЖАНИЕ ОБРАБОТКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Обработка статистических данных представляет собой упорядочение результатов измерений, т.е. извлечение из них информации в виде сведений (обобщенных фактов) или знаний (закономерностей). При этом в зависимости от наших априорных знаний об исследуемой системе рассматривается соответствие измерительных данных одному из двух типов моделей: классификационной или числовой.

Классификационные модели строятся посредством идентификации объектов исследования и отнесения к одному из сформированных классов. При использовании классификационных моделей возникают и решаются задачи кластеризации, классификации, упорядочения объектов и уменьшения размерности.

Решение задачи *кластеризации* состоит в выявлении той или иной естественной группировке объектов. При этом априори не известно число классов и не заданы их границы в пространстве характеристик.

Задача как раз и состоит в том, чтобы определить их, исходя из близости (корреляции) описаний и измерительных данных, отраженных в протоколе наблюдений.

Классификация имеет целью определение принадлежности каждого из исследуемых объектов заданного множества к одному из его подмножеств на основе сопоставления значений их характеристик, зафиксированных в протоколе наблюдений. При постановке задачи классификации, в отличие от задачи кластеризации, количество классов и диапазон их характеристик заданы априори. Если заданы также границы между классами, то задачу классификации называют *априорной*, если же эти границы требуется найти, то речь идет о задаче *распознавания образов по обучающей выборке*.

Упорядочение объектов заключается в установлении отношений порядка между объектами по степени проявления их характеристик, отраженных в протоколе измерений. Речь, как нетрудно видеть, идет о выполнении процедуры ранжирования, которая выполняется на основе данных измерений на порядковой (ранговой) шкале.

Уменьшение размерности модели состоит в отборе наиболее существенных (информационных) признаков либо агрегировании нескольких близких признаков в один с целью упрощения модели и достижения оптимального компромисса между ее точностью и сложностью. Дело в том, что исходная классификационная модель, как правило, включает множество предположений, подлежащих проверке и уточнению. Перечень характеристик множества исследуемых объектов оказывается не только длинным, но еще и «зашумленным». Поэтому сокращение размерности модели является одной из ключевых задач ее оптимизации.

Числовые модели отличаются тем, что характеристики объектов исследуемой совокупности измеряются на численных (количественных) шкалах. В таких моделях учитывается зависимость переменных от времени, поэтому измерения могут касаться как множества объектов в определенный момент времени, так и одного объекта в разные моменты времени.

Чаще всего числовые модели привлекаются для решения задач поиска экстремума, оценивания параметра и установления закона распределения.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. В чем состоит различие понятий «оценивание» и «оценка»?
2. Дайте определение качества и эффективности системы. Выделите ключевые слова в этих определениях.
3. В какой последовательности выполняются этапы оценивания?

4. Почему качественная система в определенных условиях может оказаться неэффективной?
5. Какие свойства систем интегрирует понятие качества?
6. Что представляет собой шкала уровней качества систем?
7. Какие свойства систем интегрирует понятие эффективности?
8. Что такое измерительная шкала?
9. Назовите основные классы измерительных шкал.
10. В чем состоит назначение номинальной шкалы?
11. Какое усиление шкалы происходит при переходе от номинальной шкалы к порядковой?
12. Какая измерительная шкала называется интервальной?
13. В чем состоит существенное различие между шкалами отношений и разностей?
14. Приведите пример абсолютной измерительной шкалы.
15. Какие операции можно проводить со шкальными значениями шкалы интервалов?
16. Приведите примеры использования порядковой шкалы.
17. Почему при измерении характеристик на шкале интервалов не сохраняются отношения шкальных значений?
18. Какие источники неопределенности содержат протоколы наблюдений?
19. В чем состоят задачи кластеризации и классификации? Чем отличается их постановка?
20. В чем состоит специфика статистических измерений?

ГЛАВА 7

ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

7.1. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ СИСТЕМ

Искусственные системы создаются для использования по назначению, т.е. для выполнения определенных операций. На практике цели операции и реально достигаемые результаты могут не совпадать. Это зависит от качества системы, условий протекания выполняемых ею операций, а также способов достижения целевого эффекта. Поэтому при оценивании систем различают их *качество* и *эффективность* реализуемых ими операций (процессов). Иными словами, эффективность представляет собой *качество функционирования* системы в реальных условиях окружающей среды и характеризует степень достижения системой целевого эффекта. Таким образом, высокое качество системы является необходимым, но недостаточным условием ее эффективности. В определенных условиях качественная система может оказаться неэффективной.

С учетом этого обстоятельства вернемся к определениям, разграничивающим понятия качества и эффективности. Определим качество как совокупность существенных свойств системы, обуславливающих ее *пригодность* для использования *по назначению*.

В свою очередь, эффективность определим, как комплексное операционное свойство процесса функционирования системы, характеризующее его *приспособленность* к достижению требуемого *целевого эффекта*.

Уточним, какие совокупности свойств систем задают их качество и эффективность. Множество существенных свойств систем можно сгруппировать в три основных подмножества:

- *общесистемные свойства*, к которым относятся целостность, открытость, наблюдаемость, управляемость, устойчивость, динамичность и др.;
- *структурные свойства*, такие как состав, организация, структура, связность, сложность, степень централизации и др.;

- функциональные свойства, а именно мобильность работоспособность, производительность, быстродействие, мощность, экономичность и др.

Тогда общесистемные и структурные свойства будут выступать как показатели качества систем. В свою очередь, свойства, характеризующие функционирование (поведение) систем определяют качество выполняемых ими операций, т.е. их эффективность.

Здесь следует особо отметить, что при всем формальном разнообразии функциональных (операционных) свойств они естественным образом агрегируются в три показателя эффективности: результативность, ресурсоемкость и оперативность.

Результативность операции определяется степенью достижения целевого эффекта, ради которого функционирует целенаправленная система. Ресурсоемкость характеризуется затратами ресурсов всех видов, использованными для достижения целевого эффекта. Оперативность оценивается расходом времени, потребного для достижения целевого эффекта.

В совокупности результативность, ресурсоемкость и оперативность порождают комплексное свойство — эффективность операции $Y_{\text{эфф}}$ — степень ее приспособленности к достижению целевого эффекта. Эффективность характеризует только операции, она проявляется только при функционировании систем и зависит как от качества самой системы, так и от поведения окружающей среды.

7.2. ПОКАЗАТЕЛИ И КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА

Отметим, что каждое свойство системы, признанное существенным для ее использования по назначению, будучи измеренным на той или иной шкале, может быть представлено в виде выходной переменной, значение которой характеризует меру (степень) проявления этого свойства. Такую характеристику системы будем называть частным показателем ее качества. Обозначим i -ый частный показатель качества j -ой системы символом y_{ij} ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$).

Обобщенный показатель качества j -ой системы представляет собой вектор $Y_j = \langle y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jn} \rangle$, компонентами которого являются частные показатели всех существенных свойств системы. Количество свойств системы, признанных существенными, определяет размерность этого вектора. Отметим, что множество частных показателей составляет именно вектор, поскольку между отдельными свойствами, как правило, существуют векторные (неоднородные) связи, описать которые в рамках теории множеств не представляется возможным.

Очевидно, что частные показатели качества имеют различную физическую природу и, соответственно, различные размерности и единицы измерения. Кроме того, они могут измеряться на разных количественных шкалах, а некоторые допускают измерение только на порядковой (ранговой), т.е. качественной шкале. Поэтому при формировании обобщенного показателя качества сложных систем используются не сами показатели, а их нормированные (безразмерные) значения, что открывает возможность для их сопоставления и объединения.

Процедура нормировки проводится посредством деления натурального показателя, измеренного на той или иной шкале, на нормирующий делитель (показатель), имеющий такую же размерность, что и сам показатель:

$$y_{\text{норм}} = y_i / y_0 \quad (7.1)$$

где y_0 — значение i -го частного показателя, принятос в качестве идеального.

Отметим, что выбор нормирующего делителя зачастую носит субъективный характер и обосновывается в каждом конкретном случае. Основные подходы к выбору нормирующего делителя состоят в следующем:

- во-первых в качестве нормирующего делителя можно принять максимальное значение показателя ($y_0 = \max y_i$);
- во-вторых, нормирующий делитель образуют в виде разности между максимальным и минимальным значениями показателя (в этом случае нормированный показатель переводится в диапазон [0,1]);
- в-третьих, значение нормирующего делителя задается лицом, принимающим решение (ЛПР), выбирающим образцовое, по его мнению, значение.

Требование к качеству системы задается условиями, которым должны удовлетворять показатели ее существенных свойств, а оценивание систем состоит в проверке степени выполнения этих условий для каждой из оцениваемых систем. Как правило, оценивание некоторого множества систем производится с целью выбора одной из них для использования по назначению. Для успешного выбора необходимо располагать критериями качества, т.е. иметь меру и правило (способ) выбора из множества альтернативных систем.

Применяемые на практике критерии качества систем ограничивают область допустимых значений частных показателей качества. При этом более высокие требования накладывают более жесткие ограничения

на допустимые значения показателей. Решая задачу выбора, ЛПР, как правило, предполагает существование некоей идеальной системы (модели), с которой сравниваются альтернативные системы в процессе выбора.

Будем называть *идеальной системой* Y^* гипотетическую модель рассматриваемой системы, характеризуемую наилучшими (идеальными) значениями всех частных показателей качества. Соответственно, обобщенный показатель качества такой системы представим вектором

$$Y^* = \langle y_1^*, y_2^*, \dots, y_i^*, \dots, y_n^* \rangle. \quad (7.2)$$

В общем случае частные показатели качества могут принимать значения из области (множества) допустимых значений y_i . Для ограничения области допустимых значений показателей в соответствии с выбираемыми критериями качества введем понятие области адекватности, имеющей радиус δ . В общем случае область адекватности определяется как модуль нормированной разности между допустимым и идеальным обобщенными показателями качества:

$$\delta = |Y_{\text{доп}} \setminus Y^*| / |Y^*|. \quad (7.3)$$

На радиус области адекватности накладываются ограничения, зависящие от семантики предметной области и выбранного критерия.

При таком рассмотрении все возможные критерии качества будут принадлежать к одному из трех классов:

1. Критерий пригодности представляет собой условие, согласно которому j -я система признается пригодной, если значения всех частных показателей качества этой системы принадлежат области адекватности, а радиус области адекватности соответствует допустимым значениям всех частных показателей, т.е. формально

$$K_{\text{приг.}} (\forall i) (y_i \in \delta \mid \delta_i \rightarrow y_{i \text{ доп}}; i = 1, \dots, n). \quad (7.4)$$

2. Критерий оптимальности определяет правило, согласно которому j -ая система считается оптимальной по i -му показателю, если все частные показатели удовлетворяют критерию пригодности, а значение i -го показателя принадлежит области адекватности, радиус которой по этому показателю оптимален, т.е.

$$K_{\text{оптим.}} (\exists i) (y_i \in \delta \mid \delta_i \rightarrow y_{i \text{ оптим}}). \quad (7.5)$$

Оптимальный радиус области адекватности определяется, как правило, в виде $\delta_{\text{оптим}} = 0$, что подразумевает требование отсутствия отклонений i -го показателя от наилучшего при действующих ограничениях.

ниях значения. Очевидно, что при выборе системы на основе критерия пригодности целесообразно выявить систему с оптимальным значением наиболее существенного (с точки зрения решаемой задачи) показателя качества.

3. Критерий превосходства устанавливает правило, согласно которому j -я система считается превосходной в случае, когда все значения частных показателей принадлежат области адекватности, а радиус области адекватности оптимален по всем показателям:

$$K_{\text{прв}}: (\forall i) (y_i \in \delta \mid \delta_i \rightarrow \delta_{\text{опт}}; i = 1, \dots, n). \quad (7.6)$$

Критерий превосходства накладывает наиболее жесткие требования на результат выбора, поскольку он подразумевает, по сути, нахождение на множестве альтернатив идеальной системы. Следует, однако, отметить, что накладываемые им условия выполнимы только для относительно простых систем, поскольку для сложных систем, как уже отмечалось, характерно наличие неоднородных связей, когда улучшение определенных частных показателей качества неизбежно приводит к ухудшению других частных показателей. Поэтому в теории эффективности выделена проблема корректности критерия превосходства.

Проиллюстрируем применение рассмотренных критериев качества в простейшем случае сравнения нескольких систем по двум показателям качества y_1 и y_2 (рис. 7.1).

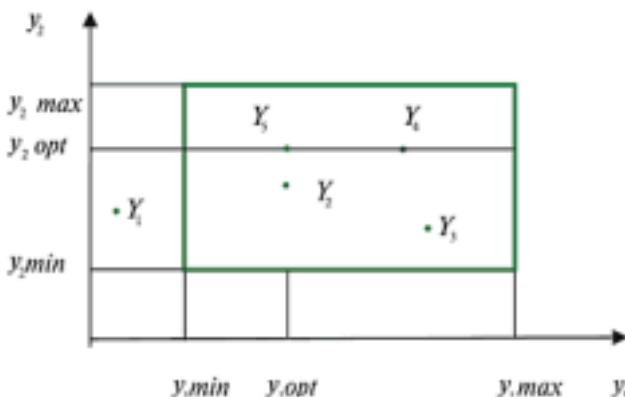


Рис. 7.1. Результаты оценивания систем по критериям качества

Сравниваются пять систем $\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5\}$, для которых определены минимальные и максимальные допустимые, а также оптимальные зна-

чения. Из рис. 7.1 следует: система Y_1 непригодна; система Y_2 пригодна и оптимальна по показателю y_1 ; система Y_3 пригодна по обоим показателям; система Y_4 пригодна и оптимальна по показателю y_2 ; система Y_5 является превосходной.

Нетрудно убедиться, что критерий превосходства представляет собой частный случай критерия оптимальности, который, в свою очередь, является частным случаем критерия пригодности. Действительно, область адекватности для критерия пригодности содержит множество точек, ограниченное экстремальными значениями показателей y_1 и y_2 . Для критерия оптимальности она вырождается для каждого частного показателя в отрезок прямой, а для критерия превосходства вырождается в точку пересечения этих отрезков. Формально имеем:

$$K_{\text{прев}} \cup K_{\text{опт}} \cup K_{\text{приг}} \quad (7.7)$$

Отметим, что с критерием превосходства связана проблема его достижимости, стимулировавшая развитие методов векторной оптимизации.

7.3. ПОКАЗАТЕЛИ И КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В общем случае при оценивании эффективности (совокупности операционных свойств) используется два подхода. Один из них основан на получении оценки исхода операции, т.е. ее результатов, второй связан с оцениванием алгоритма функционирования, обеспечивающего достижение этих результатов.

Под исходом операции подразумевается ситуация (состояние системы и обстановки), возникшее к моменту ее завершения. Для получения количественной оценки исхода операции вводится понятие показателя исхода операции (ПИО), представляющего собой вектор $Y_{\text{исх}}$, компоненты которого отражают частные показатели эффективности. К ним, как известно, относятся результативность или степень достижения целевого эффекта Y_u , оперативность Y_o и ресурсоемкость выполненной операции Y_p , т.е.

$$Y_{\text{исх}} = \langle Y_u, Y_o, Y_p \rangle. \quad (7.8)$$

Выбор совокупности существенных показателей исходов операции для реальных ситуаций связан с обработкой большого объема неформализованных сведений. Поэтому в методологии системного анализа сформулированы определенные требования, выполнение которых

способствует определению оптимального состава ПИО. Как правило, в число требований к ПИО включаются следующие характеристики:

- соответствие цели операции;
- ясность физического смысла;
- измеримость;
- полнота;
- неизбыточность;
- чувствительность.

Требование *соответствия цели операции* является базовым, поскольку его невыполнение делает бесполезным сколь угодно тщательное выдерживание остальных требований. Поскольку цели, стоящие перед системами, определяются их предназначением, то подбор состава ПИО является продолжением процедуры целеполагания. Если перед системой ставится более одной цели, то для каждой из них необходимо определить одну или несколько компонентов ПИО.

Ясность физического смысла необходима для обеспечения возможности измерения количественных значений показателей на соответствующих шкалах. Такая возможность, правда, предоставляется не всегда, особенно для сложных систем, поэтому приходится пользоваться слабыми шкалами, в основном, ранговой (порядковой) шкалой. При этом, как известно, существенную роль начинают играть субъективные оценки. Иногда привлекаются показатели, косвенно характеризующие то или иное свойство систем. Отметим, что требование ясности физического смысла накладывает ограничения на возможность объединения (агрегирования) нескольких показателей в один. Так, например, не имеет физического смысла скалярный показатель, обобщающий работоспособность и производительность.

Требование *измеримости* ПИО тесно связано с требованием ясности физического смысла. Как правило, для обеспечения измеримости на сильных шкалах необходимо совпадение не только физического смысла измеряемых параметров, но и их размерности. Тем не менее, в случае оценивания и сравнения сложных систем часто приходится использовать субъективные экспертные оценки, что автоматически предполагает выбор ранговой (порядковой) шкалы. Если же для различия альтернатив пригодна только номинальная (классификационная) шкала, то требования измеримости окажется не выполненным.

Требования *полноты* и *неизбыточности* тесно связаны между собой, и связь эта носит неоднородный (векторный) характер. Действительно, ПИО должен отражать как целевые (желательные), так и побочные (ненежелательные) последствия операции по показателям результативности, ресурсоемкости и оперативности. Однако очевидно, что стремление

к учету в качестве существенных все большего числа характеристик приведет тем, что в их числе рано или поздно окажутся второстепенные (несущественные). Естественно, это приведет к появлению избыточности и, соответственно, к нелинейному возрастанию трудоемкости процедуры оценивания. Поэтому требование минимизации размерности ПИО, т.е. обеспечение неизбыточного набора его составляющих приводит к необходимости нахождения компромиссного решения.

Наконец, к числу требований к составляющим ПИО, безусловно, относится необходимость наличия у него достаточно высокой чувствительности к изменениям характеристик управляемых и неуправляемых воздействий. Ясно, что это требование тесно связано с предыдущим. Действительно, нечувствительность или малая чувствительность ПИО к изменению характеристики, как правило, свидетельствуют о том, что она не относится к числу существенных.

Ведущую роль при оценивании эффективности играет результат оценивания алгоритма функционирования системы, поскольку именно от него зависят значения ее выходных параметров. Для технических систем алгоритм функционирования определяется выбором физического механизма, выполняющего соответствующие операции. Для систем организационных и организационно-технических эффективность в основном определяется синтезом алгоритма их управления.

Итак, совокупность результативности, оперативности и ресурсоемкости порождает комплексное операционное свойство — эффективность процесса Уэфф или степень его приспособленности к достижению цели. Понятие эффективности принято связывать с системами, и с выполняемыми ими операциями, и с принятием ЛПР управленческих решений. Возникающие при этом понятия считаются эквивалентными, поскольку все они отражают разные аспекты соответствия исходов операций поставленным целям.

Наиболее важным моментом в процедуре оценивания эффективности является выбор критерия эффективности. В практике оценивания считается, что неоптимальный выбор по правильно назначенному критерию предпочтительнее оптимального решения при неправильно сформированном критерии. При этом не следует забывать, что процесс выбора критерия эффективности, подобно процессу целеполагания, является в значительной степени субъективным и требует в каждом отдельном случае индивидуального подхода.

Очевидно, что для формирования критерия эффективности необходимо, прежде всего, четко определить и однозначно сформулировать цель операции. Далее необходимо выделить существенные управляемые и неуправляемые характеристики системы, выполняющей операцию.

Теперь можно определить показатели исхода операции. Эти показатели и будут играть роль *показателей эффективности*. На их основе формируются критерии эффективности операций. Физический смысл таких частных показателей эффективности зависит от цели и характера операции, качеством выполняющей его системы и, конечно, условиями и ограничениями, которые накладывает окружающая среда (обстановка).

Математическое выражение критерия эффективности принято называть *целевой функцией*. Целью операции как раз и является достижение экстремального значения целевой функции. При этом обобщенный (интегральный) показатель эффективности определяется совокупностью трех частных показателей:

$$Y_{\text{общ}} = \langle Y_u, Y_o, Y_p \rangle.$$

Как уже отмечалось выше, в зависимости от типа систем и характера неуправляемых внешних воздействий все возможные операции могут относиться к детерминированным, вероятностным или неопределенным. Соответственно показатели и критерии эффективности функционирования систем относятся к одному из трех возможных типов. Рассмотрим их последовательно.

Критерий пригодности для оценивания детерминированной операции

$$K_{\text{при}}: (\forall i) (y_i \in \delta \mid \delta_i \rightarrow y_{i,\text{дов}}, i \in \langle I, O, P \rangle). \quad (7.9)$$

Согласно этому критерию операция признается эффективной, если все частные показатели исхода операции принадлежат области адекватности, которая содержит все допустимые значения этих показателей.

Критерий оптимальности для оценивания детерминированной операции

$$K_{\text{опт}}: (\exists i) (y_i \in \delta \mid \delta_i \rightarrow y_{i,\text{опт}}). \quad (7.10)$$

Этот критерий определяет правило, согласно которому операция считается эффективной, если при условии выполнения критерия пригодности один из частных показателей исхода операции принадлежат области адекватности, а радиус области адекватности по этому показателю имеет оптимальное значение.

Критерий превосходства при оценивании эффективности не используется в принципе, поскольку для частных показателей эффективности характерны неоднородные (векторные) связи. В частности, так связаны оперативность и ресурсоемкость: улучшение одной из них неизбежно приводит к ухудшению другой.

Как нетрудно убедиться, критерии эффективности для оценивания детерминированных операций формируются во многом аналогично тому, как это делается при установлении критериев качества. По-иному строится процедура формирования критериев эффективности в случае оценивания вероятностных операций. В этом случае используется понятие *вероятности достижения цели* $P_{\text{да}}$.

Введем критерий пригодности для оценивания вероятностной операции:

$$K_{\text{прав}}: P_{\text{да}}(Y_{\text{эфф}}) \geq P_{\text{да_пр}}(Y_{\text{эфф}}). \quad (7.11)$$

Этот критерий устанавливает правило, согласно которому операция будет признана эффективной, если вероятность достижения цели по обобщенному показателю эффективности $P_{\text{да}}(Y_{\text{эфф}})$ окажется не меньше требуемой вероятности достижения цели по этому показателю $P_{\text{да_пр}}(Y_{\text{эфф}})$.

Критерий оптимальности для оценивания вероятностной операции выглядит следующим образом:

$$K_{\text{опт}}: P_{\text{да}}(Y_{\text{эфф}}) = P_{\text{да}}(Y_{\text{опт}}). \quad (7.12)$$

Согласно этому критерию операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по обобщенному показателю эффективности $P_{\text{да}}(Y_{\text{эфф}})$ будет равна вероятности достижения цели с оптимальным значением этого показателя $P_{\text{да}}(Y_{\text{опт}})$. При такой постановке речь может идти, в частности, о достижении оптимального компромисса между показателями оперативности и ресурсоемкости.

При оценивании эффективности вероятностных операций нередко возникают сложности с определением требуемой вероятности, особенно для сложных систем. Тогда приходится исходить из известных данных для наиболее близких аналогов.

Наиболее серьезные трудности, естественно, возникают при оценивании эффективности неопределенных операций. Для решения этой проблемы в практике системного анализа разработано несколько подходов. В их основу положены как количественные, так и качественные методы оценивания и выбора.

7.4. МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ СИСТЕМ

Итак, оценивание систем проводится на основании тех или иных критериев. Изначально задачи количественного оценивания качества и эффективности систем формулировалась в рамках критерия превосходства в виде

$$K_{\text{пред}} \rightarrow \text{opt } y_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (7.13)$$

Однако, поскольку для сложных систем характерно наличие неоднородных (векторных) связей между различными показателями, то возникает проблема корректности критерия превосходства. Она состоит в невыполнимости задачи оптимизации значений всех существенных показателей.

Действительно, рассмотрим в качестве примера задачу передачи сообщений (информации) по каналу связи. Пусть множество существенных показателей ограничено всего двумя: пропускная способность y_1 и достоверность передачи данных y_2 . Очевидно, что увеличение пропускной способности системы связано с исключением избыточной информации, в частности алгоритмов восстановления после сбоев, от чего возрастает риск уменьшения достоверности переданных данных. Со своей стороны, использование методов повышения помехозащищенности заведомо снижает пропускную способность.

Таким образом, решение проблемы корректности критерия превосходства лежит на пути поиска рационального компромисса, при котором неоднородно связанные показатели будут иметь приемлемые значения.

В практике системного анализа разработан ряд компромиссных методов количественного оценивания, направленных на решение проблемы корректности критерия превосходства. Наибольшее распространение среди них получили:

- * методы теории полезности;
- * методы векторной оптимизации.

Разработка этих методов системного анализа базируется на следующих эмпирических положениях.

Первое: принято считать, что не существует системы наилучшей для любого ЛПР. Разные ЛПР в одних и тех же условиях могут предпочесть альтернативные системы, поскольку имеют каждый свою систему предпочтений.

Второе: признается, что не может существовать системы, оптимальной для всех целей (назначений) и состояний обстановки (внешней среды). Любая система может быть эффективной только при использовании по своему назначению и в конкретных условиях.

Два этих подхода объединяет то, что оценивание систем производится согласно критериям с помощью шкал. Как и в случае измерений под шкалой понимается гомоморфизм эмпирической системы с отношениями в числовую шкалу с отношениями. При этом образы элементов эмпирической системы называются шкальными значениями, играющими роль оценок по критериям.

7.5. ОЦЕНИВАНИЕ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ПОЛЕЗНОСТИ

Теория полезности базируется на предположении, что критерий эффективности предназначен для выявления *порядка предпочтений* на множестве альтернатив (исходов операций). При этом для уменьшения возникающей неопределенности, обусловленной привлечением эвристических процедур оценивания, производится аксиоматизация предпочтений произвольного ЛПР.

Очевидно, что при сравнении и оценивании сложных систем с целью выбора выявить формально отношения предпочтения или безразличия непосредственным сравнением альтернатив весьма затруднительно. Дело в том, что показатели исходов операций имеют разный физический смысл, разные шкалы и единицы измерения. Это затрудняет сведение их к некоторому обобщенному или интегральному показателю эффективности. Было бы весьма желательно иметь для получения оценок ПИО какую-то единую меру. Однако даже деньги (единий денежный эквивалент) на эту роль не подходят, поскольку далеко не все с их помощью можно корректно оценить, например, репутацию.

Поскольку в практике выбора на множестве альтернатив не существует какой-либо универсальной меры, позволяющей соизмерять исходы операций на *неравномерных шкалах*, выход состоит в том, чтобы ввести такую меру искусственно. В качестве такой меры используется понятие *полезности альтернатив (исходов)*.

Вообще-то большинство людей используют естественным образом (на уровне ментальных моделей) достаточно простой способ оценивания альтернатив, упорядочивая их по степени возрастания их полезности. Результат своей оценки альтернатив каждый из нас, в принципе, может отразить количественно, приспив каждому исходу число, выраждающее его относительную предпочтительность. В частности, исход, признанный наименее полезным, оценивается цифрой 1, следующий за ним — цифрой 2 и так далее до наиболее полезного исхода.

Таким образом, полезность исхода операции представляет собой действительное число, присваиваемое исходу операции и характеризующее степень его предпочтительности по сравнению с другими альтернативными исходами относительно их результативности (степени достижения цели).

Зная возможные альтернативы с их показателями полезности, можно построить *функцию полезности*, которая открывает возможность для сравнения и выбора решений. В теории полезности показано, что функция полезности существует в виде отображения упорядоченного множества альтернатив A в множество действительных чисел F при вы-

полнении естественных допущений относительно предпочтений ЛПР. Система предпочтений ЛПР формулируется в виде нескольких аксиом.

Сформулируем основные аксиомы теории полезности.

Аксиома 1. *Измеримость альтернатив*. Каждой альтернативе (исходу) a_i может быть поставлено в соответствие неотрицательное действительное число c_i , представляющее меру относительной полезности исхода a_i , $i = 1, 2, \dots, n$; $0 \leq c_i \leq 1$.

Аксиома 2. *Сравнимость альтернатив*. Две любые альтернативы a_i и a_j сравнимы в том смысле, что, либо одна из них предпочтительнее другой, либо они эквивалентны. Это означает, что при сравнении двух исходов возможен один из трех выводов: предпочтительнее альтернатива a_i , предпочтительнее альтернатива a_j , альтернативы одинаково предпочтительны:

$$(\{A\}): (a_i > a_j \vee a_j < a_i \vee a_i = a_j). \quad (7.14)$$

Здесь следует добавить, что если одновременно истинны высказывания: альтернатива a_i предпочтительнее альтернативы a_j , и кроме того альтернатива a_j предпочтительнее альтернативы a_k , то между альтернативами a_i и a_k имеет место *отношение безразличия*: $a_i \sim a_k$.

Аксиома 3. *Транзитивность альтернатив*. Соотношения предпочтения и эквивалентности исходов транзитивны: если альтернатива a_i предпочтительнее альтернативы a_j , а альтернатива a_j предпочтительнее альтернативы a_k , то альтернатива a_i тоже предпочтительнее альтернативы a_k . Аналогично, если исход a_i эквивалентен исходу a_j , а исход a_j эквивалентен исходу a_k , то исходы a_i и a_k тоже эквивалентны.

Аксиома 4. *Коммутативность альтернатив*. Предпочтение альтернативы a_i альтернативе a_j не зависит от порядка их предъявления.

Аксиома 5. *Независимость альтернатив*. Если альтернатива a_i предпочтительнее альтернативы a_j и кроме того существует альтернатива a_k , которая не оценивается относительно альтернатив (исходов) a_i и a_j , то смесь исходов a_i и a_k предпочтительнее смеси исходов a_j и a_k . Смесь исходов представляет собой исход, состоящий в появлении одного из исходов с вероятностью p , а другого — с дополнительной вероятностью $1-p$. Иначе говоря, считается, что отношение предпочтения (безразличия) между двумя альтернативами не нарушается наличием третьей.

В теории полезности принято считать, что если в реальной задаче оценивания альтернативных систем выполняются эти пять аксиом, то существует *функция полезности*, однозначно определенная на множестве этих альтернатив с точностью до монотонного строго возрастающего преобразования. Это означает, что показатели полезности измеряются

на шкале интервалов. Следует подчеркнуть, что функция полезности характеризует относительную, а не абсолютную предпочтительность альтернатив, поскольку присваиваемые исходам числа характеризуют их порядок, но не то, насколько или во сколько раз одна альтернатива превосходит другую.

Функция полезности представляет собой числовую ограниченную функцию $F(a)$, определенную на множестве альтернатив $A=\{a_k\}, k=1,2,\dots,n$ так, что $F(a)=F(a_j)$, когда альтернативы эквивалентны (неразличимы), и $F(a_i) > F(a_j)$, в случае, когда альтернатива a_i предпочтительнее альтернативы a_j .

7.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ПОЛЕЗНОСТИ

Прежде всего, следует отметить, что существующие методы определения функции полезности носят приближенный характер. Наиболее известные среди них следующие:

- Метод аппроксимации.
- Экспертное оценивание.
- Анализ влияния исходов операции на операцию более высокого уровня иерархии.

Методика определения функции полезности на основе аппроксимации заключается в следующем. При анализе исходов некоторой конкретной операции проводится поиск характерных точек функции полезности, как правило, ее экстремумов, а неизвестные значения заменяются определенной известной функцией. Вид такой функции выбирается в зависимости от того, что известно ЛПР об ожидаемых исходах операции и показателях их полезности.

К наиболее простым и часто применяемым аппроксимациям относятся одноступенчатое, треугольное и косинусоидальное представления функции полезности (рис. 7.2).

Одноступенчатую аппроксимацию целесообразно применять для операций, показателем исхода которых является срок достижения цели, например, срок завершения работ.

Треугольное и косинусоидальное представления функции полезности применимы для операций, показателем исхода которых служит интервал времени, для которого определены минимально и максимально допустимые отклонения от оптимального момента времени ($t_{min} < t_0 < t_{max}$). Эти значения и выбираются в качестве характерных точек. В зависимости от конкретной ситуации или предпочтений ЛПР функция полезности будет представлять собой либо треугольник, либо отрезок косинусоиды, построенные по трем этим точкам.

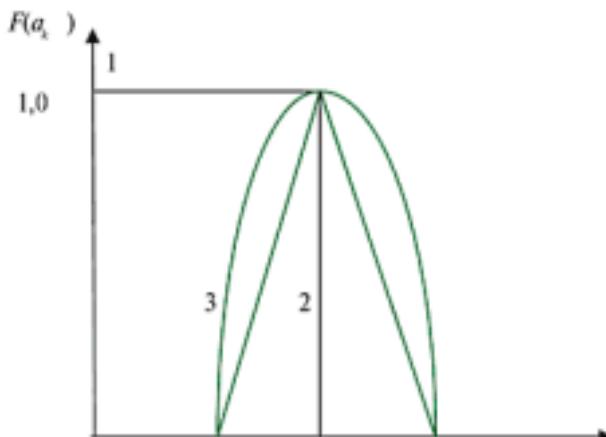


Рис. 7.2. Аппроксимации функции полезности: 1 — одноступенчатая; 2 — треугольная; 3 — косинусоидальная

Методы определения функции полезности на основе *экспертного оценивания* базируются на предположении о том, что знания, практический опыт и интуиция человека-эксперта во многих случаях полезнее формальных построений.

Независимо от выбранного способа проведения экспертизы в нем присутствуют следующие характерные процедуры:

- ранжирование множества исходов операций по степени их предпочтительности ($a_1 > a_2 > \dots > a_n$)
- определение полезности каждого исхода $F(a_i)$ с последующей проверкой установленных оценок на предмет наличия возможных противоречий;
- устранение обнаруженных противоречий в оценках посредством корректировки варианта ранжирования и (или) оценок предпочтительности.

Следует отметить, что экспертные методы определения функции полезности получили широкое развитие и активно используются при решении практических задач.

Анализ влияния исходов операции на операцию более высокого уровня иерархии базируется на основополагающих принципах системного анализа и поэтому может считаться классическим. Действительно, как уже отмечалось, условия функционирования системы задает надсистема, т.е. система более высокого уровня иерархии. Поэтому естественным критерием эффективности системы является степень соответствия выполняемых ею операций достижению цели вышестоящей системы.

Будем рассматривать показатель исхода операции исследуемой системы как один из управляемых параметров, обеспечивающих выполнение операции вышестоящей системы. Тогда можно получить некоторую зависимость эффективности функционирования надсистемы от рассматриваемого показателя. Эта зависимость и принимается в качестве функции полезности исходов исследуемой операции.

Следует заметить, что такой подход особенно полезен при оценивании эффективности сложных организационных и организационно-технических систем, в которых отдельные структурные подразделения (подсистемы) могут преследовать собственные цели, не совпадающие с внешними целями. Поэтому одной из важнейших функций управления является координация действий всех структурных подразделений со стороны ЛПР верхнего уровня иерархии.

7.7. ОБЩАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Методология векторной оптимизации составляют еще один подход к разрешению проблемы корректности критерия преобразования. Она активно используется для оценивания сложных систем в условиях неопределенности.

Пусть $K = (k_1, k_2, \dots, k_n)$ — векторный критерий, представляющий собой отображение множества альтернатив A на множество шкальных значений R , т.е.

$K: A \rightarrow R; K(a)$ — векторная оценка альтернативы (элемента) $a \in A$, R — шкала. Тогда общая задача векторной оптимизации может быть сформулирована в виде:

$$K(a) \rightarrow \text{opt } K(a), \quad (7.15)$$

где opt — оператор, определяющий семантику векторной оптимизации.

В основе метода векторной оптимизации лежит *принцип Парето*. Его идея состоит в том, что, прежде всего, следует исключить все наихудшие альтернативы, оставив для выбора только *несравнимые альтернативы*. Несравнимыми считаются любые две альтернативы a_i и a_j , если a_i предпочтительнее a_j по одной группе критериев (показателей), но при этом a_j предпочтительнее a_i по другой группе критериев. Даже если одна из пары альтернатив уступает другой только по одному критерию, они все равно признаются несравнимыми.

Множество несравнимых альтернатив образует *множество Парето* A^* , которое называют также множеством компромиссов или переговорным множеством.

Множество A^* задается следующим образом:

$$(\forall a \in A^*) (\exists a^* \in A^*) (K(a^*) \geq K(a)). \quad (7.16)$$

Это означает, что множество Парето содержит альтернативы, которые всегда более предпочтительны по отношению к любой альтернативе из множества A/A^* .

Неравенство $K(a^*) \geq K(a)$ показывает, что

$$k_1(a^*) \geq k_1(a); k_2(a^*) \geq k_2(a); \dots; k_n(a^*) \geq k_n(a). \quad (7.17)$$

и при этом хотя бы одно из этих неравенств является строгим.

Процедура векторной оптимизации теперь будет заключаться в нахождении *наилучшего (оптимального) компромисса* между альтернативами из множества Парето с учетом важности (существенности) критериев.

В системном анализе разработана следующая последовательность действий в рамках процедуры векторной оптимизации. Вначале определяются частные показатели и критерии эффективности. На втором этапе формируется множество Парето, после чего формулируется задача многокритериальной оптимизации. Наконец, на третьем этапе эта задача решается путем скаляризации компонентов векторного критерия. Под скаляризацией понимается нахождение компромисса, при котором векторный характер связи можно не принимать во внимание, считая, что неоднородно связанные критерии (показатели) имеют оптимальные значения.

7.8. МЕТОДЫ ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

На практике используется несколько методов решения задачи многокритериальной оптимизации. Наиболее простым из них является *метод выделения главного критерия*. Выбирая этот метод, ЛПР назначает наиболее важный для него критерий главным. Для остальных критериев указываются границы, в пределах которых они могут находиться. Тем самым они выводятся в состав ограничений. Иными словами, для наиболее существенного показателя применяется критерий оптимальности, а для всех остальных устанавливаются границы пригодности. Очевидно, что достоинство метода состоит в его оперативности, а очевидный недостаток связан с невысокой точностью оценивания.

Метод лексикографической оптимизации базируется на проведении упорядочения (ранжирования) множества всех критериев A по признаку

абсолютной предпочтительности (строгого порядка), т.е. наличие эквивалентности исключается. На первом шаге отбирается подмножество альтернатив A_1 , имеющих наилучшие показатели по наиболее важному (первому) критерию. Может случиться так, что в это подмножество войдет единственная альтернатива, тогда она и признается наилучшей.

Если подмножество A_1 содержит более одной альтернативы, то на втором шаге из входящих в него альтернатив формируется подмножество A_2 , имеющих наилучшие показатели по второму критерию. Процедура продолжается до тех пор, пока не будет отобрана наилучшая альтернатива. Как правило, наилучшая альтернатива отбирается на втором или третьем шаге. Это значит, что не все критерии попадают на рассмотрение, а только самые важные, что ограничивает точность выбора.

Это ограничение преодолевается методом последовательных уступок. Процедура этого метода отличается тем, что после проведения ранжирования критериев для каждого из них назначается допустимое отклонение от наилучшего значения («уступка»). Далее на первом шаге формируется подмножество A_1 альтернатив, для которых отклонение оценки по первому критерию от наилучшего значения не превышают допустимого отклонения. На втором шаге определяется подмножество A_2 по второму критерию с учетом его «уступки» и так далее. При этом соблюдаются условия, чтобы каждое очередное подмножество содержало более одного элемента, поскольку в противном случае однозначного или пустого подмножества оптимизация по остальным критериям окажется невозможной.

Отметим, что если потребовать, чтобы «уступка» по всем критериям была бы равной нулю, то метод последовательных уступок автоматически трансформируется в метод лексикографической оптимизации.

Поскольку метод последовательных уступок связан с необходимостью периодически изменять величину допустимого отклонения с целью недопущения образования однозначных множеств, что делает его весьма трудоемким, целесообразным оказалось привлечение возможностей компьютерных технологий.

Человеко-машинные процедуры векторной оптимизации позволяют успешно комбинировать способность ЭВМ быстро проводить громоздкие расчеты и возможности человека оперативно оценивать ситуацию в целом для принятия решений.

Алгоритм метода построен следующим образом. ЛПР задает свои предпочтения на множество оценок альтернатив. ЭВМ автоматически ограничивает исходное множество альтернатив, формируя подмножество A_1 , и выдает соответствующие данные. ЛПР оценивает ситуацию и варьирует «уступки», указывая допустимые уровни их снижения по одним

критериям и увеличения по другим. ЭВМ снова выполняет расчетные процедуры и строит подмножество A_2 . Процесс продолжается вплоть до завершения задачи выбора альтернатив. Естественно, выбор ведется на множестве Парето.

7.9. МЕТОДЫ СВЕРТКИ ВЕКТОРНОГО КРИТЕРИЯ

Решение задач однокритериального выбора методом теории полезности состоит в том, что каждой альтернативе ставится в соответствие определенное числовое значение, и сравнение альтернатив сводится к сравнению соответствующих значений. При этом считается, что для каждой альтернативы может быть задана функция предпочтения (функция полезности или критерий) $k(a)$, которая и позволяет сравнивать альтернативы по простому принципу: если $k(a_1) > k(a_2)$, то $a_1 > a_2$ и наоборот. Если предположить, что выбор любой альтернативы приводит к однозначным последствиям и присвоенный критерий выражает в численном виде оценку этих последствий, то лучшей будет признана альтернатива с наибольшим значением:

$$a^* = \arg \max_{a \in A} k(a)$$

Следует отметить, что такая простая по постановке задача нередко оказывается непростой для решения. Однако сложность выбора наилучшей альтернативы существенно возрастает, когда оценивание производится по нескольким качественно разным критериям.

Задачи многокритериальной (векторной) оптимизации формулируются следующим образом. Пусть оценивание альтернатив проводится по некоторым критериям:

$$k_1(a), k_2(a), \dots, k_i(a), \dots, k_n(a); a \in A (i = 1, \dots, n), \quad (7.18)$$

где A — множество возможных альтернатив, n — число критерия.

Необходимо определить альтернативу a^* , наилучшим образом удовлетворяющую всем критериям, т.е.

$$a^* \in A: k_i(a^*) = k_{\text{max}}(a), i = 1, \dots, n. \quad (7.19)$$

Именно к такому классу задач относятся методы свертки векторного критерия.

Смысъл этих методов состоит в преобразовании векторного критерия в скалярный, который представляет собой некоторую функцию от значений компонентов векторного критерия. С учетом перехода к скалярному критерию исходная задача заменяется новой, а именно:

$$k(a) \rightarrow \text{extr } k(a), \quad (7.20)$$

где $k(a)$ — скалярный критерий, представляющий собой некоторую функцию от значений компонентов векторного критерия:

$$k(a) = f(k_1(a), k_2(a), \dots, k_n(a)).$$

Цель рассматриваемого подхода состоит в получении функции f , которая называется сверткой. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

1. *Обоснование допустимости свертки.* Речь идет о том, что свертку можно проводить для однородных показателей. Известно, что показатели эффективности естественным образом разделяются на три группы: показатели результативности, оперативности и ресурсоемкости. Так вот свертка отдельных показателей результативности, оперативности и ресурсоемкости признана недопустимой, поскольку, как правило, приводит к потере физического смысла.

Допустимо, например, проводить свертку таких показателей как мобильность, быстродействие и производительность, поскольку все они характеризуют оперативность. Однако свертка, скажем, управляемости, экономичности и быстродействия не имеет смысла, поскольку эти показатели относятся к разным группам. Что же касается свертки обобщенных показателей от каждой группы, то она, естественно, вполне допустима и даже необходима, поскольку образует обобщенный показатель эффективности.

2. *Нормировка (нормирование) критериев.* Для проведения операции свертки необходимо привести все критерии к безразмерному виду, иначе произойдет потеря физического смысла. Нормировка критериев проводится подобно нормировке показателей с помощью нормирующего делителя, что обеспечивает перевод критериев к безразмерной форме. Эта аналогия совершенно естественна, поскольку между показателями и критериями существует тесная связь, и нередко показатели выступают в роли критериев. Отметим также, что в качестве нормирующего делителя при нормировке критерия берется, как правило, его максимальное значение.

3. Ранжирование приоритетности (степени важности) критерииев. Учет приоритетности критерииев обеспечивается, как правило, заданием вектора коэффициентов их важности:

$$\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n), \sum \delta_i = 1 \quad (7.21)$$

где δ_i — коэффициент важности i -го критерия, который обычно берется равным коэффициенту значимости соответствующего частного показателя.

Поскольку установление коэффициентов важности критерииев связано с субъективными предпочтениями ЛПР, задача решается средствами экспертного оценивания.

Далее исходная векторная оценка $K(a)$ альтернативы a заменяется новой векторной оценкой, получаемой на основе нормированных критерииев:

$$k(a) = (\delta_1 k_1(a), \delta_2 k_2(a), \dots, \delta_n k_n(a)),$$

где $k_i(a)$ — нормированный частный критерий.

Теперь полученная векторная оценка преобразуется с посредством операции свертки ее компонентов. На практике в основном используется два вида свертки: аддитивная и мультипликативная.

4. Свертка компонентов векторного критерия. Операция *аддитивной свертки* позволяет представить обобщенный скалярный критерий в виде суммы взвешенных нормированных частных критерииев:

$$k(a) = \sum \delta_i k_i(a) / k_{i_0} \quad (7.22)$$

где k_{i_0} — нормированный частный критерий.

Все такие критерии образуют группу аддитивных критерииев. Поскольку речь идет о поиске оптимального компромисса, для них принят *принцип справедливой компенсации абсолютных значений нормированных частных критерииев*, которому должны соответствовать решения по изменению «уступок». Справедливым признается компромисс, при котором суммарный уровень снижения значений одних критерииев (показателей) не превышает суммарного уровня увеличения значений других показателей.

Формально операция *мультипликативной свертки* дает представление обобщенного скалярного критерия в виде произведения:

$$k(a) = \prod k_i(a)^{\delta_i} \quad (7.23)$$

Как видим, мультиплексивная свертка представляет собой результат перемножения частных критериев $k_j(a)$, возведенных в степень δ_j , причем в этом случае критерии берутся исконными.

Компромисс в этом случае основывается на *принципе справедливой относительной компенсации*, при котором суммарный уровень относительного снижения значений одних показателей не должен превышать суммарного уровня относительного увеличения значений других показателей.

Выбор типа свертки зависит от того, что важнее для ЛПР — абсолютные или относительные изменения значений частных критериев. Однако следует отметить, что и та, и другая свертки представляют собой формальные математические приемы, при выполнении которых варьирование значениями допустимых отклонений может привести в противоречие с объективной ролью частных критериев. Поэтому не существует четких условий и алгоритмов применения этих методов, поскольку при их реализации существенная роль остается за эвристическими процедурами.

Кроме того, результат выбора часто оказывается весьма чувствительным даже к небольшим изменениям значения обобщенного критерия, и оптимальная в новом смысле альтернатива существенно отличается от прежней. Этими обстоятельствами обусловлена широкая применимость аксиоматического подхода — теории полезности (см. параграф 7.5).

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте общее определение критерия.
2. Какие критерии используются при оценивании качества систем?
3. Что представляет собой область адекватности?
4. Какие требования предъявляются к показателю исхода операции?
5. Как связаны требования полноты и неизбыточности?
6. Перечислите аксиомы теории полезности.
7. В чем состоит транзитивность множества?
8. Что представляет собой функция полезности?
9. Что понимается под смесью альтернатив?
10. Какие существуют способы определения функции полезности?
11. Что представляет собой множество Парето?
12. Какие альтернативы считаются несравнимыми?
13. В чем состоит проблема корректности критерия превосходства?

Как видим, мультиплексивная свертка представляет собой результат перемножения частных критериев $k_j(a)$, возвещенных в степень δ_j , причем в этом случае критерии берутся исконными.

Компромисс в этом случае основывается на *принципе справедливой относительной компенсации*, при котором суммарный уровень относительного снижения значений одних показателей не должен превышать суммарного уровня относительного увеличения значений других показателей.

Выбор типа свертки зависит от того, что важнее для ЛПР — абсолютные или относительные изменения значений частных критериев. Однако следует отметить, что и та, и другая свертки представляют собой формальные математические приемы, при выполнении которых варьирование значениями допустимых отклонений может привести в противоречие с объективной ролью частных критериев. Поэтому не существует четких условий и алгоритмов применения этих методов, поскольку при их реализации существенная роль остается за эвристическими процедурами.

Кроме того, результат выбора часто оказывается весьма чувствительным даже к небольшим изменениям значения обобщенного критерия, и оптимальная в новом смысле альтернатива существенно отличается от прежней. Этими обстоятельствами обусловлена широкая применимость аксиоматического подхода — теории полезности (см. параграф 7.5).

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Дайте общее определение критерия.
2. Какие критерии используются при оценивании качества систем?
3. Что представляет собой область адекватности?
4. Какие требования предъявляются к показателю исхода операции?
5. Как связаны требования полноты и неизбыточности?
6. Перечислите аксиомы теории полезности.
7. В чем состоит транзитивность множества?
8. Что представляет собой функция полезности?
9. Что понимается под смесью альтернатив?
10. Какие существуют способы определения функции полезности?
11. Что представляет собой множество Парето?
12. Какие альтернативы считаются несравнимыми?
13. В чем состоит проблема корректности критерия превосходства?

ГЛАВА 8

ПРОБЛЕМА ВЫБОРА В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ

8.1. ВЫБОР В УСЛОВИЯХ РИСКА

Начнем с определения понятия риска. В литературе можно обнаружить весьма значительное количество определений риска. Наиболее общей является, пожалуй, дефиниция риска как опасности неблагоприятного исхода на одно ожидаемое событие. За меру риска принимается разница между ожидаемым значением показателя эффективности и тем его значением, которое оказалось реализованным. Этот подход к формализации феномена риска был предложен в 1951 г. Л. Дж. Сэвиджем в виде принципа минимаксного сожаления по поводу того, что выбранное решение не оказалось наилучшим при реализованном состоянии обстановки.

Операции, выполняемые системами в условиях риска, носят вероятностный характер, поскольку однозначные (детерминированные) соответствия между системами и исходами операций, типичные для условий определенности, нарушаются случайным образом.

Напомним, что такие операции относятся к стохастическим процессам с известным законом распределением вероятностей. Как уже отмечалось выше, знание закона распределения вероятностей позволяет ЛПР принимать рациональные решения по прогнозированию наступающих исходов.

Иными словами, каждой системе (альтернативе) a_i соответствует множество исходов $\{y_k\}$ с известными вероятностями их проявления $p(y_k / a_i)$.

Поэтому для оценивания эффективности систем в условиях риска находят математическое ожидание функции полезности на множестве исходов $K(a) = M_g(F(y))$.

Пусть исходы y_k ($k = 1, 2, \dots, m$) имеют дискретные значения показателей, и каждый из них возникает с вероятностью $p(y_k / a_j)$, обладая полезностью $F(y_k)$.

Тогда математическое ожидание функции полезности выглядит следующим образом:

$$K(a_i) = \sum p(y_k / a_i) F(y_k), i = 1, 2, \dots, n \quad (8.1)$$

Очевидно, что, положив вероятность определенного исхода равной единице, а остальных — равными нулю, мы автоматически переходим к оценке для детерминированных операций.

Для анализа ситуации, когда показатели исходов вероятностной операции представляют собой дискретные величины, удобно пользоваться табличным представлением (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Оценивание систем в условиях риска

a_1	y_k	$p(y_k / a_1)$	$F(y_k)$	$K(a_1)$
a_1	y_1	$p(y_1 / a_1)$	$F(y_1)$	
	y_2	$p(y_2 / a_1)$	$F(y_2)$	
	\dots	\dots	\dots	
	y_m	$p(y_m / a_1)$	$F(y_m)$	
a_2	y_1	$p(y_1 / a_2)$	$F(y_1)$	
	y_2	$p(y_2 / a_2)$	$F(y_2)$	
	\dots	\dots	\dots	
	y_m	$p(y_m / a_2)$	$F(y_m)$	
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
a_n	y_1	$p(y_1 / a_n)$	$F(y_1)$	
	y_2	$p(y_2 / a_n)$	$F(y_2)$	
	\dots	\dots	\dots	
	y_m	$p(y_m / a_n)$	$F(y_m)$	

Для исходов с непрерывными значениями показателей математическое ожидание имеет вид интеграла:

$$K(a_i) = \int p(y / a_i) F(y) dy, \quad (8.2)$$

где $p(y/a_i)$ — плотность вероятностей исходов для одной альтернативы, а интегрирование ведется по всей допустимой области пространства исходов.

Теперь можно сформировать критерий оптимальности для вероятностных операций:

$$K(a_i) = \max M_a(F(y)) \quad (i = 1, \dots, m). \quad (8.3)$$

Согласно этому критерию оптимальной считается система, для которой математическое ожидание функции полезности на множестве исходов принимает максимальное значение.

Итак, последовательность действий по оцениванию эффективности систем в условиях риска следующая: определение исходов операций по каждой системе (альтернативе) \rightarrow построение функции полезности на множестве исходов \rightarrow нахождение распределения вероятностей на множестве исходов \rightarrow расчет математического ожидания функции полезности на множестве исходов операции для каждой системы.

Совершенно очевидно, что выбор оптимальной системы, т.е. безусловно *рационального* решения не дает никаких гарантий. Выбор может оказаться неудачным для конкретной реализации состоявшейся операции. Рациональность решения состоит в том, что при многократном повторении операции оптимальный «в среднем» выбор решений обеспечит наибольший успех. Это прекрасно подтверждают профессиональные игроки в покер, которые могут проиграть любителю на «короткой дистанции», но всегда выигрывают в продолжительном розыгрыше.

Поскольку в основе рассматриваемо подхода лежит понятийный и математический аппарат теории вероятностей, то возможны и другие критерии оценивания, а именно:

- * максимум вероятностной гарантии достижения результата не ниже требуемого уровня.
- * минимум дисперсии исходов
- * максимум вероятности случайного события
- * минимум среднего риска

Подчеркнем, что сведение задачи к вероятностному типу целесообразно в тех случаях, когда:

- * операции носят массовый характер;
- * имеется возможность определить реальные показатели исходов;
- * известны законы распределения вероятностей на множестве исходов;
- * известны вероятностные характеристики параметров обстановки.

Опыт принятия решений по выбору систем в условиях риска позволил заложить основы методологии оценивания систем в условиях, когда закон распределения вероятности в стохастических процессах неизвестен или отсутствует в принципе.

8.2. ВЫБОР В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Необходимость принятия решений и выбора в условиях неопределенности относится к извечным проблемам человечества. Превращение априорной энтропии в информацию (процесс познания) составляет, пожалуй, основной смысл его жизнедеятельности. Окружающий мир постоянно порождает случайные события, закон распределения вероятностей которых нам неизвестен. Познавая мир, мы научились выявлять наличие такого закона (если он объективно существует). Тем самым удается перевести часть неопределенных процессов в разряд вероятностных. Отсюда возникает статус *эксперта* — опытного наблюдателя, обладающего богатым багажом эмпирических знаний в конкретной предметной области и, кроме того, незаурядной интуицией.

Тем не менее, остается непрогнозируемым широкий круг процессов, для которых распределение вероятностей отсутствует. Речь, следовательно, идет о событиях (исходах), равновероятных для ЛПР. Основным источником неопределенности является окружающая среда, называемая обстановкой. Неопределенность, связанная с системой, как мы знаем, устраняется посредством исследования «черного ящика». Целенаправленные системы, тем более, хорошо известны ЛПР, хотя они и подвержены флуктуациям, порождающим частичную неопределенность.

Ранее нами рассматривалась процедура выбора в условиях, при которых его последствия для ЛПР были известны. Поэтому процедура сводилась к сравнению разных следствий, которые и играли роль альтернатив. Однако на практике весьма часто приходится принимать решение в условиях, когда для каждой альтернативы существует множество возможных исходов, из которых будет реализован один, но какой именно — в момент выбора неизвестно.

Поэтому, говоря о *неопределенной операции*, мы имеем в виду такую ситуацию, когда *известно* множество возможных состояний обстановки, а также эффективность имеющегося множества систем для каждого из них, но *неизвестно*, с какой вероятностью может возникнуть любое из этих состояний.

Задачи такого рода принято называть *выбором в условиях неопределенности с дискретным набором альтернатив и исходов*. Основной вопрос: «Какую альтернативу выбрать, не зная заранее, какой из возможных исходов будет реализован?». В такой постановке для решения задачи оказался подходящим понятийный и математический аппарат *теории игр*.

Действительно, мы (один игрок) производим выбор из множестве альтернатив. Выбираемые альтернатива — это *наши ходы*. Реализованные исходы (нам заранее неизвестные) будем интерпретировать как

ответные ходы второго игрока, осуществляющего выбор на множество исходов (своих альтернатив). Суммарность наших ходов, т.е. решений по выбору альтернатив будет отражать нашу *стратегию игры*. Естественно, речь идет о *выборе эффективной стратегии*.

Все неопределенные операции естественным образом делятся на два подмножества:

- * *статистически неопределенные операции*;
- * *игровые операции*.

Условия статистически неопределенных операций диктует объективная реальность, которую принято называть *природой*. Природа считается нейтральной по отношению к ЛПР, случайным образом выбирающей состояние обстановки, т.е. свои ходы. Статистически неопределенные операции принято также называть «играми с природой».

В игровых операциях неопределенность создается активным противодействием со стороны других игроков (ЛПР) — противников (конкурентов). Неопределенных операций такого рода существует множество: от шахматной партии до боевых действий. Классический пример игровых операций — конкуренция в области экономики.

Обратим внимание на следующее обстоятельство. Когда речь идет об отношениях с конкретными конкурентами, то это — игровые операции. Но если речь заходит об учете состояния общей рыночной конъюнктуры при принятии решения, то это уже статистически неопределенная операция. Иными словами, мировая экономическая система подпадает под принятное определение природы.

Следовательно, большинство современных организационно-технических и социально-экономических систем обладают свойствами, которые не позволяют отнести выполняемые ими операции к детерминированным или вероятностным. Перечислим основные из этих их свойств.

1. Наличие в управляющей системе ЛПР, реализующего функции управления на основе субъективных моделей, а в составе объекта управления — целенаправленных индивидов порождает огромное разнообразие поведения системы в целом.

2. Система, являющаяся объектом управления, часто преследует цели, не соответствующие целям управляющей системы.

3. В процессе принятия решений существенную роль играют эвристические рассуждения ЛПР, не поддающиеся математической формализации.

4. Нередко ЛПР, оценивая ситуацию, руководствуется не ее реальным состоянием, а принятой априори моделью управления объектом.

5. Как правило, отсутствует статистика поведения системы, необходимая для выявления законов распределения вероятностей исходов вследствие конкретных решений, принятых ЛПР.

6. В процессе принятия решений ЛПР использует логические и эвристические процедуры, не допускающие формализации методами классической математики.

Выбор решений в условиях статистической неопределенности (играх с природой) целесообразно проводить, руководствуясь методами *теории статистических решений*. Для принятия решений в условиях активного противодействия используются методы *теории игр*.

В общем случае оценивание эффективности систем для неопределенных операций производят, сводя в табл. 8.2 следующие показатели:

a_i — вектор управляемых параметров, характеризующий свойства системы ($i = 1, \dots, m$);

n_j — вектор неуправляемых параметров, определяющий состояние обстановки ($j = 1, \dots, k$);

k_{ij} — эффективность системы a_i при состоянии обстановки n_j ;

$K(a_i)$ — эффективность системы a_i .

В каждой строке таблицы содержатся значения эффективности одной системы при всех состояниях обстановки, в каждом столбце — значения эффективности всех систем для одного состояния обстановки. Такую таблицу принято называть *матрицей эффективности*. Она позволяет держать в поле зрения все множество возможных ситуаций (сочетаний).

Таблица 8.2

Оценивание эффективности в условиях неопределенности

a_i	n_j				$K(a_i)$
	n_1	n_2	...	n_k	
a_1	k_{11}	k_{12}	...	k_{1k}	
a_2	k_{21}	k_{22}	...	k_{2k}	
...	
a_m	k_{m1}	k_{m2}	...	k_{mk}	

Напомним, что при протекании неопределенной операции (процесса) может быть известно, какие состояния обстановки могут возникнуть и какова эффективность имеющихся систем для каждой из них, но неизвестны вероятности, с которыми можно ожидать появление того или иного состояния. Поэтому для уменьшения неопределенности при оценивании систем приходится использовать субъективные предпочтения ЛПР или экспертов.

8.3. ВЫБОР В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

При выборе в условиях неопределенности центральным моментом является определение критерия для оценивания вариантов решения. В силу априорной неопределенности исходов необходимо оценить сразу целую строку матрицы эффективности. Имея такие оценки для всех строк, можно сравнивать их между собой и осуществлять выбор в соответствии с тем или иным критерием.

Очевидно, что универсального критерия для оценивания эффективности в неопределенных операциях нет и быть не может. Все зависит от характера предпочтений ЛПР. В зависимости от отношения к выбору решения в условиях неопределенности (риска) он может проводиться с позиций либо *объективиста*, либо *субъективиста*. В свою очередь среди субъективистов могут быть как лица, склонные к риску, или *оптимисты*, так и склонные к осторожности, или *пессимисты*. Здесь уместно дать определение экономического риска. Мы остановимся на следующей дефиниции: *экономический риск есть обобщенная объективная характеристика ситуации принятия решений в условиях неопределенности, отражающая возможность появления и значимость для ЛПР ущерба в результате последствий выбранного решения*.

В целом, в зависимости от характера ЛПР, в неопределенных операциях чаще всего применяются следующие критерии:

- Лапласа;
- среднего выигрыша;
- осторожного игрока (максиминный критерий Вальда);
- оптимистичного игрока (максимаксный критерий);
- взвешенного оптимизма (критерий Гурвица);
- минимального риска (критерий Сэвиджа).

Рассмотрим перечисленные критерии и сравним результаты их использования на конкретном примере.

1. Критерий Лапласа. Этот критерий базируется на широко известном предположении: если вероятности ожидаемых состояний обстановки неизвестны, следует считать их равновероятными. Тогда оценка эффективности системы будет:

$$K(a_i) = 1/n \sum k_{ij} (i = 1, \dots, m). \quad (8.4)$$

Оптимальной следует признать систему, для которой:

$$K_{\max} = \max_i \left(1/n \sum k_{ij} \right) (i = 1, \dots, m). \quad (8.5)$$

2. Критерий среднего выигрыша. Основу этого критерия составляет предположение: если о состояниях обстановки ничего неизвестно, то вероятности этих состояний p_i следует задать или, попросту говоря, угадать. Эффективность систем оценивается как математическое ожидание (среднее ожидаемое значение) оценок эффективности по всем состояниям обстановки:

$$K(a_i) = \sum p_i k_{ij} (i = 1, \dots, m). \quad (8.6)$$

Оптимальной будет признана система с эффективностью

$$K_{\max} = \max_i (\sum p_i k_{ij}) (i = 1, \dots, m). \quad (8.7)$$

3. Критерий Вальда. Этот критерий, иначе называемый *критерием максимина*, выбирает так называемый *осторожный наблюдатель*, поскольку он гарантирует определенный выигрыш при наихудшем состоянии обстановки или *наилучший из худших результатов*. В основе критерия Вальда лежит принцип: при неизвестном априори состоянии обстановки следует «закладываться» на худший вариант развития событий, т.е. ориентироваться на минимальную эффективность каждой системы. При этом выбирается должна система с максимальным значением *минимальной* эффективности. В этом и состоит сущность критерия максимина.

В каждой строке матрицы эффективности выделяется минимальная оценка конкретной системы по всем состояниям обстановки

$$K(a_i) = \min_j k_{ij} (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, k). \quad (8.8)$$

Оптимальной по этому критерию признается система с максимальным значением минимальной эффективности:

$$K_{\max} = \max_i (\min_j k_{ij}) (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, k). \quad (8.9)$$

Выбор критерия Вальда направлен на исключение любых элементов риска при принятии решения. Однако продолжением этого достоинства является очевидный недостаток пессимистической по сути оценки ожидаемой ситуации.

4. Критерий максимакса или «неограниченного оптимизма». Сторонник использования этого критерия выберет в каждой строке матрицы эффективности систему с максимальным значением эффективности, а оптимальной посчитает систему с наибольшим значением максимума. Как и полагается оптимисту, он будет ожидать, что состояние обстанов-

ки окажется самым удачным, т.е. именно таким, какому соответствует выбранная система. Поэтому для него:

$$K(a_i) = \max_j k_{ij} \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, k); \quad (8.10)$$

$$K_{\max} = \max_i (\max_j k_{ij}) \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, k). \quad (8.11)$$

Естественно, сторонники выбора критерия максимакса обладают азартным характером и рискуют на наибольшей степени. Следует, правда, отметить, что иногда возникают такие жизненные ситуации, что приходится отбросить всяческую осторожность — «или пан, или пропал».

5. Критерий взвешенного оптимизма (Гурвица). Нередко этот критерий называют критерием обобщенного максимиана. Важное достоинство этого критерия состоит в возможности регулировать соотношение оптимизма и пессимизма, принимая взвешенные решения.

С этой целью в рамках применения критерия вводится коэффициент оптимизма ω , определенный в интервале значений $0 \leq \omega \leq 1$. Этот коэффициент отражает соотношение азарта и осторожности ЛПР. Эффективная система выбирается в результате процедуры *взвешивания максимальной и минимальной оценок* с помощью коэффициента ω .

$$K(a_i) = \omega \max_j k_{ij} + (1 - \omega) \min_j k_{ij} \quad (8.12)$$

Оптимальной будет признана система с максимальным значением взвешенного критерия:

$$K_{\max} = \max_i [\omega \max_j k_{ij} + (1 - \omega) \min_j k_{ij}], \quad 0 \leq \omega \leq 1. \quad (8.13)$$

Очевидно, что при $\omega = 0$ критерий Гурвица трансформируется в критерий максимиана Вальда, при $\omega = 1$ — в критерий максимакса. Поэтому весьма ответственной процедурой является определение значения коэффициента ω . Нередко оно устанавливается средствами экспертного оценивания. На практике значения ω , как правило, выбираются в диапазоне $0,3 \div 0,7$.

6. Критерий минимального риска (Свидца). Этот критерий, так же, как и критерий Вальда, относится к критериям осторожного игрока. Правда, он несколько более оптимистичен, чем критерий Вальда. По своей сути он отражает *сожаление* игрока по поводу того, что выбранная система не оказалась наилучшей при наступившем состоянии обстановки. Для проведения оценок по этому критерию привычная матрица эффектив-

ности (таблица 2.5) преобразуется в матрицу потерь (риска). Каждый элемент матрицы риска вводится как разность между максимальным и текущим значением эффективности в столбце:

$$\Delta k_{ij} = \max_i k_{ij} - k_{ij}$$

Далее по отношению к матрице риска применяется критерий минимакса, а именно:

$$K(a_i) = \max_j \Delta k_{ij} \quad (8.14)$$

Оптимальной признается система с минимальным значением потерь (риска).

$$K_{\min} = \min_i (\max_j \Delta k_{ij}). \quad (8.15)$$

Итак, оценивание эффективности систем в условиях неопределенности может проводиться по различным критериям. Выбор определенного критерия зависит от ряда факторов. Укажем на основные из этих факторов:

- характер ЛПР (склонность к риску или наоборот осторожность);
- источник неопределенности (нейтральная природа или сознательное активное противодействие);
- цель и значимость операции (допустим ли определенный риск или необходим гарантированный результат).

Ясно, что от выбора конкретного критерия существенным образом зависит принимаемое решение, поэтому в одной и той же ситуации разные ЛПР, руководствуясь разными критериями, предпочтут разные системы.

Проиллюстрируем это на примере. Пусть имеется три системы и возможны четыре состояния обстановки. Построим матрицу эффективности с произвольно взятыми значениями оценок эффективности (табл. 8.3).

Таблица 8.3

Матрица эффективности

a_i	k_j			
	k_1	k_2	k_3	k_4
a_1	0,5	0,3	0,1	0,2
a_2	0,2	0,1	0,6	0,3
a_3	0,3	0,4	0,2	0,2

Применим последовательно приведенные выше критерии.

1. По критерию Лапласа:

$$K(a_1) = 0,25 \cdot (0,5 + 0,3 + 0,1 + 0,2) = 0,275;$$

$$K(a_2) = 0,3;$$

$$K(a_3) = 0,275.$$

Оптимальное решение — выбор системы a_2 .

2. По критерию среднего выигрыша зададим следующие вероятности наступления возможных состояний обстановки:

$$p_1 = 0,4; p_2 = 0,2; p_3 = 0,1; p_4 = 0,5. \text{ Тогда:}$$

$$K(a_1) = 0,4 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 0,3 + 0,1 \cdot 0,1 + 0,5 \cdot 0,2 = 0,37;$$

$$K(a_2) = 0,31;$$

$$K(a_3) = 0,31$$

Оптимальное решение — выбор системы a_1 .

3. По критерию Вальда:

$$K(a_1) = \min(0,5; 0,3; 0,1; 0,2) = 0,1;$$

$$K(a_2) = 0,1;$$

$$K(a_3) = 0,2$$

Оптимальное решение — выбор системы a_2 .

4. По критерию максимакса:

$$K(a_1) = \max(0,5; 0,3; 0,1; 0,2) = 0,5;$$

$$K(a_2) = 0,6;$$

$$K(a_3) = 0,5$$

Оптимальное решение — выбор системы a_2 .

5. По критерию Гурвица (зададим значение коэффициента $\omega = 0,6$):

$$K(a_1) = 0,6 \cdot 0,5 + (1 - 0,6) \cdot 0,1 = 0,34;$$

$$K(a_2) = 0,4;$$

$$K(a_3) = 0,38$$

Оптимальное решение — выбор системы a_2 .

6. Для выбора по критерию Сэвиджа построим матрицу риска (табл. 8.4).

Таблица 8.4

Матрица риска

a_i	k_j			
	k_1	k_2	k_3	k_4
a_1	0	0,1	0,5	0,1
a_2	0,3	0,3	0	0
a_3	0,2	0	0,4	0,1

Тогда:

$$K(a_1) = \max(0; 0,1; 0,5; 0,1) = 0,5;$$

$$K(a_2) = 0,3;$$

$$K(a_3) = 0,4.$$

Оптимальное решение — выбор системы a_2 .

Таким образом, выбор того или иного критерия, в частности, выбор коэффициента оптимизма для критерия Гурвица, существенным образом влияет на результаты оценивания. В свою очередь, на выбор критерия оказывает влияние целый ряд факторов — от природы неопределенности до характера лица, принимающего решение.

Обобщим для удобства сравнения результаты оценивания эффективности систем (табл. 8.5). Символом a^* будем отмечать системы (альтернативы), оптимальные по соответствующим критериям.

Как нетрудно убедиться, по мере последовательной перемены критерии все системы побывали в статусе оптимальных, что убедительно свидетельствует о сложности и неоднозначности выбора конкретного критерия. Поэтому при анализе и синтезе сложных систем тип критерия должен быть заранее оговорен, согласован с заказывающей стороной и считаться заданным.

Наличие совпадений результатов выбора по нескольким критериям, т.е. признак устойчивости выбранного решения, дает основание считать это решение *рациональным*. В случае отсутствия совпадений (при конкуренции альтернатив) возможно применение процедур мажоритарной обработки результатов оценивания по простому большинству голосов заинтересованных лиц или привлеченных экспертов.

Сравнение результатов оценивания

Альтернативы	Оценки эффективности по критериям					
	Лапласа	Среднего выигрыша	Вальда	Максимакса	Гурвица	Сэвиджа
a_1		a^*				
a_2	a^*			a^*	a^*	a^*
a_3			a^*			

Как видим, большинство критериев указывают на альтернативу a_2 , что дает основания считать ее оптимальной. Отметим, что в принципе некоторая альтернатива может оказаться объективно оптимальной, и тогда на нее укажут все используемые критерии.

Критерий Гурвица известен в теории принятия решений как критерий взвешенного оптимизма, дающий ЛПР возможность варьировать значением коэффициента оптимизма в соответствии со своим отношением к риску при выборе стратегий в задачах «игры с природой». При этом возникает впечатление, что, варьируя коэффициентом оптимизма, можно эффективно управлять предпочтениями ЛПР в зависимости от специфики задачи выбора стратегии.

Однако статистический анализ на репрезентативных выборках матриц эффективности показывает, что в большинстве случаев (около двух третей матриц) выбор по критерию Гурвица ограничен либо предельно оптимистичным, либо предельно осторожным решением. Выбор третьей, промежуточной альтернативы (на которую указывают критерии Лапласа либо Сэвиджа) имеет место при средних значениях коэффициента оптимизма достаточно редко (менее 15% случаев). Кроме того, примерно в 20% случаев наблюдается совпадение выбора по, казалось бы, взаимно исключающим критериям Вальда и максимакса.

Такой результат, тем не менее, не противоречит здравому смыслу, поскольку отражает выбор альтернативы, оптимальной по всем критериям. Рассмотрим такую ситуацию более подробно.

Поскольку критерий Гурвица в основном «взвешивает» только предельно оптимистичный и предельно пессимистичный критерий, возникает естественная задача ранжирования основных критериев по степени их оптимизма для обеспечения ЛПР реальной свободой выбора с учетом своего отношения к риску в условиях статистической неопределенности. Статистический анализ парной ранговой корреляции таких критериев позволяет пронести операцию ранжирования, которая устанавливает между четырьмя рассмотренными критериями следующего отношения нестрогого порядка:

$$K_W < K_S < K_L < K_M ,$$

где символами K_W , K_S , K_L и K_M обозначены соответственно критерии Вальда, Сэвиджа, Лапласа и максимакса, а знак « $<$ » означает «менее оптимистичен».

На самом деле критерии здесь связаны между собой отношением предпочтения или эквивалентности что в предельном случае допускает возможность эквивалентности всех рассматриваемых критериев. Поэтому отличие от нуля коэффициента взаимной корреляции результатов выбора по критериям Вальда и максимакса статистически оправдано и не несет в себе противоречия.

Подчеркнем, что приведенное отношение нестрогого порядка может быть положено в основу формирования вышеупомянутой ранговой шкалы для качественного измерения соотношения оптимизм-пессимизм критериев.

Действительно, корреляционный анализ показывает, что критерии Сэвиджа и Вальда, как и следовало ожидать, близки по своей семантике, но при этом критерий Сэвиджа безусловно более оптимистичен, поскольку существенным образом коррелирует с критерием Лапласа и в заметной степени — с критерием максимакса, с которым критерий Вальда коррелирует только в особом случае совпадения выбора по всем критериям. Критерий Лапласа, в свою очередь, в наибольшей степени тяготеет к критерию максимакса, и его можно позиционировать вблизи середины обсуждаемой шкалы, поскольку коэффициенты его взаимной корреляции с критериями Вальда и максимакса весьма близки и составляют около 0,35.

Отметим, однако, что для ЛПР было бы желательно располагать еще, как минимум, одним критерием, который занимал бы промежуточную позицию между критериями Лапласа и максимакса. Дело в том, что критерий Лапласа представляет собой разновидность критерия среднего выигрыша и, строго говоря, не ориентирован на проявление ЛПР существенного оптимизма. Поэтому подбор (или конструирование) более оптимистичного критерия из числа классических или комбинированных представляет несомненный интерес.

8.4. ВЫБОР РЕШЕНИЙ В КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЯХ

Решение многих практических задач связано с необходимостью анализа ситуаций, в которых сталкиваются две (или более) противоборствующие стороны, преследующие собственные цели, причем результат любых действий каждой из сторон зависит от образа действий, выбранных

противником. Именно такие ситуации и носят название *конфликтных*. Наиболее эффективным средством разрешения конфликтных ситуаций считается методология *теории игр*.

Классификация видов игр, как и любая классификация, зависит от выбора признака классификации: по числу игроков, по количеству возможных стратегий, по свойствам функции выигрыша, по наличию или отсутствию возможности предварительных переговоров и взаимодействия между участниками игры (игроками) в процессе игры.

В зависимости от количества игроков различают игры с двумя, тремя и более участниками.

По числу стратегий игры могут быть конечные и бесконечные. В конечных играх игроки располагают ограниченным выбором числа возможных стратегий, в бесконечных играх количество возможных стратегий не ограничено. Примером конечной игры может служить игра в орлянку, когда выбор ограничен двумя стратегиями, примером бесконечной игры — ситуация «продавец — покупатель», когда каждый игрок может называть любую цену товара.

Важным отличительным признаком игры является характеристика *функции выигрыша* (платежной функции). Так, если выигрыш одного из игроков равен проигрышу другого, т.е. очевиден конфликт между игроками, игры называются *антагонистическими* или *играми с нулевой суммой*. Противоположная ситуация, когда игроки и выигрывают, и проигрывают сообща и поэтому, для них выгодно сотрудничать, соответствует *игре с постоянной разностью*. Между этими крайними случаями существует множество возможных игр с *ненулевой суммой*, в которых имеют место и антагонистические, и согласованные действия игроков.

Игры, условия которых допускают предварительные переговоры между игроками, принято называть *кооперативными*, и наоборот, игры, в которых такая возможность исключается — *лекооперативными*. Как видим, все антагонистические игры относятся к некооперативным играм.

Введем основные понятия и определения теории игр.

Игры, в которых целью игроков является максимизация выигрыша коалиции (коллектива игроков) без его последующего разделения между игроками, называются *коалиционными*. Игры, в которых действия каждого игрока направлены на достижение максимального индивидуального выигрыша, носят название *бескоалиционных*.

Для формализации понятий обозначим символом I множество всех игроков, которое будем считать конечным. Игроков принято различать по номерам, поэтому считаем $I = \{1, 2, \dots, n\}$.

Бескоалиционная игра. Пусть каждый игрок $i \in I$ располагает некоторым множеством S_i стратегий (возможных действий). В процессе игры каждый игрок выбирает для себя ту или иную стратегию $s_i \in S_i$.

В ходе каждой партии игры складывается система стратегий $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, которая называется *ситуацией*. Множество всех ситуаций есть произведение всех S_i . Выигрыши i -го игрока в ситуации s обозначим $R_i(s)$. Функция R_i определяется на множестве всех ситуаций и называется функцией выигрыша i -го игрока.

С учетом этих обозначений бескоалиционной игрой является кортеж (тройка):

$$B = \langle I, \{S_i\}, \{R_i\} \rangle, \quad (8.16)$$

где I и $\{S_i\}$ — множества, а R_i — функции на множестве, принимающие действительные значения.

Бескоалиционная игра называется игрой с постоянной суммой, если существует $C = \text{const}$, такая, что

$$\sum R_i(s) = C \forall s \in S. \quad (8.17)$$

Ситуация, складывающаяся в игре, называется приемлемой для i -го игрока в случае, если, изменив свою стратегию на какую-либо другую, он не сможет увеличить свой выигрыш. Ситуация, приемлемая для всех игроков, называется *равновесной ситуацией* (или *ситуацией равновесия*). В равновесных ситуациях (и только в них) ни один игрок не заинтересован в отклонении от своей стратегии. *Равновесной стратегией игрока* в бескоалиционной игре называется такая его стратегия, которая входит хотя бы в одну из равновесных ситуаций игры.

Процесс нахождения равновесной ситуации в бескоалиционной игре принято называть *решением игры*.

Матричные игры. Антагонистические игры, в которых каждый игрок имеет конечное множество стратегий, называются *матричными играми*. Стратегии игроков в таких играх принято называть *чистыми стратегиями*. Процесс в матричной игре выглядит следующим образом. Задается матрица потерь (платежей) $A = [a_{ij}]$, подобная изображенной в виде таблицы 2.8. Игроки 1 и 2 независимо друг от друга выбирают свои чистые стратегии α_i и β_j . После того, как выбор сделан, элемент матрицы A отражает размер выигрыша (проигрыша) игрока 1, если он применяет чистую стратегию α_i , а игрок 2 — чистую стратегию β_j . Ситуацию в матричной игре составляет пара (α_i, β_j) .

Для того, чтобы ситуация в матричной была равновесной, необходимо и достаточно, чтобы

$$\max_i (\min_j a_{ij}) = \min_j (\max_i a_{ij}). \quad (8.18)$$

Равновесные стратегии игроков в антагонистической игре являются их оптимальными стратегиями. Выбор игроком 1 оптимальной стратегии в соответствии с $\max_i (m_i, a_j)$ дает ему выигрыш, не меньший, чем значение игры независимо от действий игрока 2. Соответственно, выбор игроком 2 оптимальной стратегии в соответствии с $\min_j (\max_i (m_i, a_j))$, в любом случае принесет ему проигрыш, не больший, чем значение игры, определяемое общим значением $\max_i (m_i, a_j)$ и $\min_j (\max_i (m_i, a_j))$.

Таким образом, исход матричной игры по существу оказывается предопределенным, поскольку зависит только от условий игры, определяемых заданием матрицы A .

Кооперативные игры. Кооперативной игрой называется игра с ненулевой суммой, по условиям которой игрокам разрешается образовывать коалиции, т.е. обсуждать перед игрой свои стратегии и договариваться о совместных действиях. Основная цель кооперативной игры состоит в дележе общего выигрыша между членами коалиции. Наиболее сложной задачей оказывается именно дележ выигрыша. Кооперативные игры, в которых возможен раздел суммарного выигрыша в любых пропорциях, получили название игр с *трансферабельной полезностью*.

Идеальным решением кооперативной игры с трансферабельной полезностью принято считать следующее решение:

- а) оно существует в любой игре;
- б) с ним вынужден будет согласиться любой игрок;
- в) оно предполагает минимальное множество дележей.

Следует подчеркнуть, что законченной теории кооперативных игр до настоящего времени не создано. Считается, что для этого необходима разработка новых, более совершенных понятий конфликтного равновесия, не требующих от игроков каких-либо искусственных норм поведения.

Завершая обсуждение проблемы принятия решений в условиях неопределенности, сделаем одно замечание общего характера. При выборе решений необходимо отдавать себе отчет в том, что снять неопределенность полностью невозможно в принципе. Поэтому слишком высокие требования к точности решения таких задач окажутся неуместными.

Целесообразно выделить определенную область приемлемых решений, которые окажутся несущественно хуже других независимо от выбранного подхода. Как видим, речь идет о выделении множества Парето, т.е. множества несравнимых альтернатив. Именно в пределах этого множества и должен производиться окончательный выбор решения лицами, ответственными за этот выбор, т.е. ЛПР.

Следует, однако, заметить, что в ходе проведения исследования и собственно операции выбора некоторые неопределенные случайные

факторы могут стать известными, что, безусловно, должно быть использовано на этапе принятия решения.

8.5. СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Жизнедеятельность современного человека протекает в условиях информационного общества, для которого характерно стремительное развитие информационных технологий и их внедрение в самые разнообразные сферы жизни.

Наиболее актуальной задачей современного этапа информационной революции становится задача *автоматизации интеллектуальной деятельности*, в первую очередь принятия решений в условиях неполной определенности.

Усложнение процессов управления крупными организационными структурами, носящее объективный характер, приводит к необходимости решения следующих проблем:

- повышение оперативности управления;
- снижение трудозатрат ЛПР на выполнение второстепенных процедур;
- повышение степени научной обоснованности принимаемых решений.

В процессе принятия решений ЛПР выполняет упорядоченную последовательность процедур, относящихся к трем группам функций:

- функций обмена сообщениями (информацией) $\{f_o\}$;
- рутинные (вспомогательные) функции обработки сообщений $\{f_p\}$;
- функции принятия решений, состоящего в преобразовании содержания сообщений (информации) $\{f_c\}$.

Группа функций $\{f_o\}$ связана с доведением принятых решений до объекта управления и принятием от него сообщений о его текущем состоянии.

К функциям $\{f_p\}$ рутинного преобразования относятся учет (регистрация), хранение, поиск, копирование, тиражирование, каталогизация данных и тому подобные операции. Следует подчеркнуть, что эта группа функций никоим образом не связана с содержательной обработкой информации, т.е. изменения форму ее представления, не изменяет ее смысл.

Функции принятия решений $\{f_c\}$ представляют собой порождение новой по отношению к прежним решениям информации, реализуемое при решении задач анализа состояния объекта управления, планирования прогнозирования, оперативного управления, организации и координации. Решение этих задач связано с постоянным анализом динамики

изменяющейся ситуации (состояния объекта управления и обстановки), порождением множества альтернативных решений в каждом цикле управления и выбором оптимального по тем или иным критериям решения. Это требует выполнения аналитических расчетов, логических процедур, а также привлечения эвристических методов.

Эта группа функций, бесспорно, является главной, поскольку требует от ЛПР высокой квалификации и немалого опыта. Поэтому автоматизация этих функций представляет собой чрезвычайно актуальную научно-техническую проблему. Основные направления ее решения связаны с сокращением времени, затрачиваемого на выполнение как рутинных операций (сбор, поиск, выборка, предварительная обработка, оформление и размножение документов), так и творческих процедур (решение расчетных, логических и эвристических задач и, конечно же, собственно выбор управляющего воздействия).

В первую очередь представляется целесообразным освободить ЛПР высших уровней от рутинных операций и трудоемких расчетов, выполняемых «ручную». В дальнейшем основное внимание должно сосредоточиться на использовании компьютерных технологий для ускорения выбора оптимальных решений «в сотрудничестве» с человеком, ответственным за принятие таких решений.

Сегодня создание систем поддержки принятия решений (СППР) базируется на концепции ее ориентации на конкретного пользователя (ЛПР). Основу такой концепции составляет признание того факта, что процесс принятия решений в условиях неполной определенности носит *субъективный характер*. Что это означает? Если в одних и тех же условиях различные ЛПР принимают одинаковые решения, то такие решения принято считать объективными. Если же, напротив, разные пользователи, располагающие одинаковой информацией, будут выбирать различные решения, то такие решения следует признать субъективными.

По существу, это означает, что в большинстве практических ситуаций каждый конкретный ЛПР проявляет полную самостоятельность и действует на основании своих собственных знаний, опыта и интуиции. При этом, естественно, не исключено привлечение любых экспертов и консультантов.

Таким образом, назначение СППР состоит в том, чтобы помочь ЛПР выбрать решения, которые именно ему представляются наилучшими, но которые он нашел бы, преодолевая существенные трудности, либо вообще не смог бы найти в силу большой сложности многокритериальной задачи.

Отметим еще одно немаловажное обстоятельство. Как известно (см. параграф 7.9), при решении многокритериальных задач методы

векторной оптимизации не позволяют проводить выбор или ранжирование непосредственно по совокупности критерииев. Необходимым оказывается проведение той или иной формальной операции свертки критерииев (показателей). Получается, что выбор алгоритма свертки разработчиком системы оказывает на процесс выбора альтернатив влияние, неконтролируемое ЛПР как пользователем системы. Этот недостаток традиционных информационных систем, опирающихся при выборе решений на формальное выполнение операции свертки, при использовании СППР сводится к минимуму.

8.6. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Другим крупным направлением автоматизации информационных процессов, относящихся к прерогативе ЛПР, является разработка интеллектуальных систем. Речь идет о перспективах создания искусственного интеллекта в рамках сравнительно нового научного направления, именуемого *инженерией знаний*.

На современном этапе становления и развития информационного общества именно знания становятся наиболее важным и определяющим ресурсом в числе основных факторов производства. Можно утверждать, что информационное общество является обществом, основанным на знаниях. Естественно на повестку дня выдвигается проблема генерации (создания) новых знаний.

Для корректной постановки и успешного решения этой проблемы весьма желательным представляется сформировать фундаментальную теоретическую базу для понятия «знание». Между тем, анализ показывает существование различных подходов к выбору исходной исследовательской позиции для дефиниции знания как философской категории и интерпретации внутренней сущности того, что принято называть знаниями.

В частности, западная философская школа традиционно различает субъект и объект знания. Напротив, восточная философская традиция не проводит четкого различия между субъектом и объектом знания. Такая традиция ориентирует человека на жизнь в мире собственного (индивидуального) опыта, определяющего субъективное понимание закономерностей взаимодействия человеческого сознания и природы.

Отсюда становится очевидным, что перед современной мировой наукой стоит проблема разработки теоретической базы новой парадигмы развития общества. На повестку дня выдвигаются функции описания, объяснения и предсказания феномена инновационного процесса как

взаимодействия формализованных и неформализованных знаний. Именно на решение этой проблемы ориентированы исследования в области искусственного интеллекта.

Примем в качестве рабочего следующее определение:

Искусственный интеллект — направление развития информационных технологий, нацеленное на разработку аппаратно-программных средств, позволяющих пользователю ставить и решать интеллектуальные задачи своей предметной области, общаясь с компьютером на ограниченном подмножестве естественного языка.

Основное направление в области разработки систем искусственного интеллекта связано с созданием моделей представления знаний, а также баз знаний, образующих ядро экспертизных систем. Основополагающую роль здесь играет разработка моделей и методов извлечения и структурирования знаний.

Возникает естественный вопрос — в чем состоит, с точки зрения специалиста в области информационных технологий, отличие знаний от обычных данных и, соответственно, баз знаний от баз данных, традиционно обрабатываемых компьютерами при решении самых разнообразных задач. Приведем рабочие определения, которые позволят сделать это очевидным.

Определение 1. *Данные — это отдельные факты, характеризующие объекты и процессы конкретной предметной области.*

В ходе компьютерной обработки происходит трансформация данных, которая может быть условно на следующие этапы:

1. Данные как результат наблюдения и измерения;
2. Данные на материальных носителях,
3. Структуры данных в виде таблиц, диаграмм, графиков;
4. Данные в компьютерах на языке описания данных;
5. Базы данных на машинных носителях.

В отличие от данных, знания представляют собой результат мыслительной деятельности человека, направленной на осмысление и обобщение его опыта, полученного в результате практической деятельности.

Определение 2. *Знания — это закономерности предметной области, полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие специалистам формулировать и решать задачи в этой области.*

Нередко используется следующее лаконичное и емкое определение:

Определение 3. *Знания — это хорошо структурированные данные, т.е. данные о данных или метаданные.*

Если для хранения данных создаются базы данных, для которых характерны большой объем и относительно небольшая удельная стоимость

информации, то для хранения знаний — базы знаний (информационные массивы небольшого объема, но обладающие весьма значительной ценностью).

Как уже отмечалось, базы знаний составляют основу экспертных систем. В качестве рабочего определения экспертной системы примем следующее:

Экспертная система — это сложный программный комплекс, аккумулирующий знания и опыт высококвалифицированных специалистов (экспертов) в конкретной предметной области и обеспечивающий их тиражирование для консультирования менее квалифицированных пользователей.

Стандартная структура экспертной системы приведена на рис. 8.1.



Рис. 8.1. Базовая структура экспертной системы

Поясним основные термины.

Пользователь — специалист предметной области, для которого предназначена экспертная система.

Интерфейс пользователя — комплекс программ, реализующий диалог пользователя с экспертной системой, как при вводе информации, так и при получении ее рекомендаций.

Решатель (блок логического вывода) — программа, моделирующая ход рассуждений эксперта на основании знаний, имеющихся в базе знаний.

Подсистема объяснений — программа, дающая возможность пользователю получать ответы на вопросы, касающиеся процесса получения решений.

Интеллектуальный редактор базы знаний — программа, позволяющая специалисту в области искусственного интеллекта (аналитику) формировать базу знаний в диалоговом режиме. Она включает в себя различные сервисные средства, облегчающие работу с базой.

Функция аналитика состоит в посредничестве между экспертом и базой знаний. Процесс взаимодействия аналитика с экспертом принято называть извлечением знаний. Дадим рабочее определение:

Извлечение знаний — получение аналитиком от эксперта наиболее полного из возможных представлений о предметной области и способах принятия решений в ней. В ходе этого процесса происходит перенесение компетентности от эксперта с использованием различных коммуникативных и текстологических методов.

Коммуникативные методы извлечения знаний охватывают совокупность процедур взаимодействия аналитика с непосредственным источником знаний — экспертом.

Текстологические методы извлечения знаний основаны на изучении специальной литературы и технической документации.

В практике извлечения знаний аналитик, как правило, комбинирует коммуникативные и текстологические методы. Добавим, что в ряде случаев используются групповые методы извлечения знаний, открывающие возможность одновременного извлечения знаний от нескольких экспертов, позиции которых, естественно, совпадают далеко не полностью.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Каким критерием целесообразно пользоваться при выборе в условиях риска?
2. Как оценивается эффективность систем в условиях неопределенности?
3. Что представляет собой матрица эффективности?
4. Какие операции называются игровыми?
5. В каких случаях речь идет об играх с природой?
6. Перечислите критерии, используемые для выбора в условиях неопределенности.
7. Какой критерий предусматривает введение коэффициента оптимизма?
8. Как перейти от матрицы эффективности к матрице риска?
9. Чем отличается критерий Сэвиджа от критерия Вальда?
10. Какие факторы оказывают существенное влияние на выбор критерия?
11. Назовите основные классы игровых ситуаций.
12. В чем различие между играми с постоянной суммой и постоянной разностью?
13. Какие игры называются антагонистическими?
14. В чем состоит специфика кооперативных игр?
15. Каково назначение систем поддержки принятия решений?
16. Сформулируйте определения данных и знаний.

Извлечение знаний — получение аналитиком от эксперта наиболее полного из возможных представлений о предметной области и способах принятия решений в ней. В ходе этого процесса происходит перенесение компетентности от эксперта с использованием различных коммуникативных и текстологических методов.

Коммуникативные методы извлечения знаний охватывают совокупность процедур взаимодействия аналитика с непосредственным источником знаний — экспертом.

Текстологические методы извлечения знаний основаны на изучении специальной литературы и технической документации.

В практике извлечения знаний аналитик, как правило, комбинирует коммуникативные и текстологические методы. Добавим, что в ряде случаев используются групповые методы извлечения знаний, открывающие возможность одновременного извлечения знаний от нескольких экспертов, позиции которых, естественно, совпадают далеко не полностью.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Каким критерием целесообразно пользоваться при выборе в условиях риска?
2. Как оценивается эффективность систем в условиях неопределенности?
3. Что представляет собой матрица эффективности?
4. Какие операции называются игровыми?
5. В каких случаях речь идет об играх с природой?
6. Перечислите критерии, используемые для выбора в условиях неопределенности.
7. Какой критерий предусматривает введение коэффициента оптимизма?
8. Как перейти от матрицы эффективности к матрице риска?
9. Чем отличается критерий Сэвиджа от критерия Вальда?
10. Какие факторы оказывают существенное влияние на выбор критерия?
11. Назовите основные классы игровых ситуаций.
12. В чем различие между играми с постоянной суммой и постоянной разностью?
13. Какие игры называются антагонистическими?
14. В чем состоит специфика кооперативных игр?
15. Каково назначение систем поддержки принятия решений?
16. Сформулируйте определения данных и знаний.

ГЛАВА 9

БАЗОВАЯ МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Системный анализ, как методология разрешения проблем, объединяет теорию и практику, формализованные знания и индивидуальный опыт специалистов. От выявления проблемы до ее снятия — длительный путь в виде решения целого ряда задач, образующих вполне определенную последовательность этапов:

1. Формулировка проблемы.
2. Структурирование проблематики.
3. Конфигурирование проблемы.
4. Постановка задачи и определение целей.
5. Выбор и агрегирование критерииев.
6. Генерирование альтернатив.
7. Исследование ресурсных ограничений
8. Моделирование проблемы
9. Синтез решения.
10. Реализация решения.

Рассмотрим содержание перечисленных этапов, образующих методику системного анализа, принятую в качестве опорной или базовой.

9.1. ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

По определению проблемная ситуация состоит в наличии противоречия между состояниями выделенной системы и обстановки (окружающей среды). Системный анализ исследует сложные системы, как правило, в условиях неполной определенности. Поэтому начальный этап системного исследования состоит не в постановке задачи, как это имеет место в практике большинства наук и научных направлений, а в кропотливой работе по структурированию исходной проблемы.

Отправной точкой системного исследования проблемы является изложение инициатором такого исследования первоначального определения самого факта существования проблемы. В качестве инициатора

исследования может выступать ЛПР (руководитель организации), заказчик, частный клиент и т.д. Как правило, он ограничивается только обозначением сферы интересов, выдвигая весьма приблизительную модель будущего.

Следует подчеркнуть, что даже в тех случаях, когда первоначальная формулировка проблемы внешне выглядит вполне конкретно, это совсем не означает, что так же будет выглядеть постановка задачи.

Такой ход событий обусловлен рядом причин. Прежде всего, формулируемая заказчиком постановка задачи отражает его индивидуальное видение проблемы, т.е. его собственную модель реальной проблемной ситуации, изложенную на естественном языке. В подавляющем большинстве случаев это представление носит весьма приблизительный характер. Необходима тщательная проверка такой модели на адекватность, что неизбежно приводит к необходимости ее уточнения, расширения и дополнения.

Другая причина состоит в том, что реальная *проблемная система* отнюдь не является изолированной. Она входит в виде составной части в определенную надсистему, включает в себя некоторое количество подсистем, взаимодействует с другими системами своего уровня. Следовательно, то или иное решение проблемы непременно скажется на условиях функционирования всего этого окружения проблемной системы.

Указанные причины принуждают системно аналитика рассматривать любую исходную формулировку проблемы как некое «нулевое приближение» постановки задачи на проведение исследования. Они же обуславливают характер и содержание работы, особенно на двух последующих этапах.

9.2. СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМАТИКИ

Открытость и сложность проблемной системы вынуждают рассматривать решаемую проблему не изолированно, а как совокупность взаимосвязанных проблем. Для представления этой совокупности будем пользоваться термином *проблематика*, имеющим более высокий уровень общности, чем термин проблема.

Таким образом, на втором этапе системного исследования выявленная в рамках определенной системы проблема расширяется до масштаба проблематики. Необходимо установить, каким образом предполагаемое решение проблемы затронет интересы каждой системы, существенным образом связанный с проблемной системой.

В большинстве реальных условий окружение проблемной системы составляют следующие заинтересованные стороны:

- 1) *заказчики* — лица или организации, ставящие проблему, заказывающие проведение системного анализа и оплачивающие работы по его проведению;
- 2) *лица, принимающие решения*, от полномочий которых зависит непосредственное решение проблемы;
- 3) *активные участники решения проблемы*, которые будут заинтересованы в процессе проведения системного исследования;
- 4) *пассивные участники решения проблемы*, на которых тем или иным образом скажутся последствия решения проблемы;
- 5) *команда системного аналитика*, которая непосредственно организует и выполняет системное исследование с целью выработки решения, способного снять или, по крайней мере, ослабить существующую проблему.

Отметим, что участники решения проблемы или, иначе, заинтересованные стороны могут быть совершенно по-разному заинтересованы в решении проблемы. Каждая из заинтересованных сторон имеет собственное восприятие проблемы и на нем строит свое отношение к ней. Полное снятие или существенное ослабление проблемы в рамках проблемной системы приведет к исчезновению, ослаблению, возникновению, усугублению их собственных проблем. Естественно, среди заинтересованных (в широком смысле) сторон, как правило, окажутся и такие, кто решительно не заинтересован в решении проблемы и будет оказывать сопротивление ожидаемым переменам.

Формирование проблематики в том, как раз и состоит, чтобы нарисовать полную картину того, кто из ближайшего окружения проблемной системы и в чем заинтересован или, напротив, не заинтересован, а также какие изменения они считают необходимым внести в решение проблемы и почему. Как видим, речь идет об определении границ предметной области, в том числе, на основе учета степени заинтересованности в решении проблемы его потенциальных участников.

Для получения соответствующих сведений командой системного аналитика могут быть использованы различные методы от опросов и интервью до сценариев и коллективной генерации идей. При этом в каждом конкретном случае разработка формы и анализ содержания опросных анкет, сценариев и сводных таблиц требуют творческого подхода системного аналитика и его команды. Стандартный подход в большинстве случаев приводит к формированию неадекватной концептуальной модели, что, естественно не позволит обеспечить успешное комплексное решение проблемы.

Таким образом, на втором этапе должна быть получена *информация, необходимая и достаточная для формирования и структурирования адекватной проблематики предметной области*.

Очевидно, что любая серьезная проблема требует рассмотрения ее с различных точек зрения и, соответственно, многопланового описания. Такая многоплановость реальной жизни ставит перед системным аналитиком принципиальный вопрос о допустимой минимизации описания проблемы. Речь идет о том, что описание проблемы следует дать на языках, отражающих видение проблемы всеми заинтересованными сторонами. В этом и состоит формирование так называемого *конфигуратора* проблемы.

9.3. КОНФИГУРИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Основным результатом формирования проблематики является совокупность различных, нередко противоположных, точек зрения, которые следует тем или иным образом согласовать при решении проблемы. Дополнительную сложность создает то обстоятельство, что для описания своей точки зрения на сущность проблемы каждая из сторон может использовать свой специфический язык (понятийный аппарат).

Совокупность всех языков, на которых будет описываться решаемая проблема, принято называть ее *конфигуратором*. Очевидно, что разнообразие языков конфигуратора должно быть достаточным для отражения всех существенных аспектов решения проблемы.

Нередко оказывается, что число заинтересованных сторон слишком велико и возникает потребность в уменьшении размерности проблематики. В таких случаях приходится прибегать к процедуре агрегирования. Простейший способ агрегирования состоит в признании эквивалентности близких точек зрения.

В конечном счете, системному аналитику необходимо установить совокупность всех существенных отношений участников решения проблемы. На языке системного анализа это означает задание структуры некоторой надсистемы (по отношению к проблемной системе), построенной на сформированной проблематике. Будем называть такую структуру *проблематической надсистемой*.

Совокупность всех существенных отношений в проблематической надсистеме будет определять конфигурацию решаемой проблемы, которая должна содержать столько разновидностей структуры, сколько различных языков или точек зрения на проблему составили ее конфигуратор.

Главным на этом этапе является получение обоснованного вывода о том, что полученный конфигуратор проблемы исчерпывающим образом (с точки зрения цели анализа) описывает исходную проблему и систему, которую она охватывает.

9.4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛЕЙ

После того, как выявлена проблематика и определена конфигурация проблемы, производится постановка задачи. В рамках постановки задачи должно быть непременно намечено направление поиска возможных вариантов решения проблемы и определены задания на проведение соответствующих исследований.

Следует иметь в виду, что независимо от того, какой вид примет окончательное решение проблемы, оно должно представлять собой управленческое решение, реализация которого откроет возможность устраниить возникшую проблему или, в крайнем случае, ослабить ее проявление.

Итак, системный аналитик на этом этапе стремится преобразовать существующую проблему в приемлемую постановку задачи *принятия решения*.

Далее следует определить, что конкретно необходимо сделать для выполнения поставленной задачи. Возникновение проблемы порождает потребность в ее разрешении, потребность, в свою очередь, требует определить цель как модель желаемого будущего. Иными словами, речь идет о необходимости выбора направления, двигаясь в котором, можно будет будет ослаблять проявление проблемы, «ходить» от нее. Вся сложность задачи состоит в том, что возможных направлений множество, а выбрать необходимо только одно, желательно, оптимальное.

Стремление учесть интересы всех заинтересованных сторон на данном этапе порождает множественность целей. При определении частной цели для конкретной заинтересованной стороны следует ориентироваться на принятую в ней систему ценностей, которая, в свою очередь формирует систему предпочтений при выборе решений. Как правило, систему ценностей организации олицетворяет лицо, принимающее решение. Однако в некоторых случаях для установления истинной системы ценностей может понадобиться изучение мнений руководителей среднего звена, ведущих специалистов и даже отдельных исполнителей.

В процессе целеполагания возникает опасность подмены истинной цели средствами ее достижения, когда вместо определения, что нужно сделать, решается, как должен быть реализован спонтанно выбранный вариант достижения цели. Так, классическим примером результата подмены цели в экономике является перепроизводство продукции.

Еще одна опасность состоит в смешении целей, когда авторитетные специалисты-профессионалы, участвующие в решении проблемы, навязывают команде системного аналитика свою трактовку существа проблемы и пытаются подменить истинную цель, руководствуясь ис- каженной системой ценностей.

Во многих случаях первоначально определенные цели в ходе проведения системного анализа изменяются, уточняются и даже отменяются. Как правило, это вызвано остаточной неопределенностью относительно истинной цели. По мере выполнения системного анализа предметной области эта неопределенность снимается, цели уточняются и конкретизируются. Заметим, что изменение целей может быть вызвано изменением объективных условий обстановки. Впрочем, и изменение субъективных решений может существенным образом повлиять на выбор целей.

Следовательно, в процессе выполнения целеполагания необходимо, в принципе, предусматривать возможность уточнения целей системного анализа, вплоть до их полной замены.

Подводя итог изложенным соображениям, перечислим основные трудности, которые приходится преодолевать при определении целей:

Цель представляет собой модель желаемого будущего, вследствие чего при ее определении нетрудно ошибиться.

Поскольку проблема порождает проблематику, то цель, как правило, не бывает единственной.

При определении целей заинтересованных сторон должны учитываться принятые в них системы ценностей, которые, как правило, не совпадают, а зачастую противоречат друг другу.

Множественность целей порождает опасность их смешения или подмены средствами достижения целей.

По мере исследования предметной области цели могут меняться.

Сформулируем чрезвычайно важный вывод: *определить истинную цель гораздо важнее, чем найти лучшую альтернативу*. Очевидно, что не самая лучшая альтернатива, пусть и неоптимальным образом, но все-таки ведет к цели, в то время, как ошибка в выборе цели не только не приведет к решению проблемы, но и порождает новые проблемы.

9.5. ВЫБОР И АГРЕГИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ

Выбор на множестве альтернатив требует наличия критериев, являющихся средством такого выбора. В принципе, критерием может служить любой признак альтернативной системы, значение которого может быть измерено, как минимум, в порядковой (ранговой) шка-

ле. При этом цели должны быть представлены в более слабой, т.е. в номинальной (классификационной) шкале. Такое ограничение, накладываемое на обозначение целей, обусловлено тем, что критерий является *количественной моделью качественной цели*. Иными словами, критерий представляет собой отображение ценностей, заложенных в цели, на параметры приемлемых альтернатив. Речь идет о том, что установление значения критерия для конкретной альтернативы по своей сути есть результат *косвенного измерения степени ее пригодности в качестве средства достижения цели*.

В ходе дальнейшего исследования основное внимание уделяется уже не столько целям, сколько соответствующим критериям. Это означает, что критерии должны быть связаны с целями отношением существенного подобия для того, чтобы оптимизация по критериям соответствовала максимальному приближению к цели.

Многокритериальный характер большинства реальных задач обусловлен не только множественностью целей, но и тем, что даже одну цель редко удается адекватно отразить единственным критерием. Поэтому поиск решения, как правило, состоит не столько в попытках отыскать наиболее адекватный цели критерий, сколько в подборе дополняющих друг друга критериев, которые отражают разные аспекты цели.

На практике, однако, неизбежно возникает знакомая задача обеспечения оптимального компромисса по соотношению точности и сложности. С одной стороны, многокритериальность обеспечивает более адекватное отражение цели, но с другой — повышает сложность решаемой задачи. Поэтому необходимо добиться такого положения дел, чтобы критерии отражали все существенные аспекты цели, но при этом количество задействованных критериев было бы небольшим.

Основным способом, обеспечивающим выполнение задачи минимизации количества используемых критерии, является их *агрегирование*. Целью агрегирования является объединение родственных критерии и получение ограниченного количества независимых укрупненных критерии. Обычно в результате агрегирования появляются уже известные *критерии эффективности* или целевые критерии, а также *критерии ограничения*. В рамках целевого критерия могут выдвигаться все новые и новые альтернативы, а критерии ограничения запрещают некоторые из альтернатив и тем самым способствуют уменьшению размерности задачи.

Существенным является то, что критерии ограничения должны строго соблюдаться, в отличие от целевых критерии, которыми можно и нужно варьировать, в том числе, жертвуя одними ради других.

9.6. ГЕНЕРИРОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВ

Генерирование альтернатив является творческим этапом системного анализа.

Именно поэтому он представляет наибольшую сложность для команды системного аналитика. Действительно, смысл этого этапа состоит в «придумывании» вариантов решения проблемы, т.е. в формировании перечня допустимых альтернатив. Совершенно очевидно, что если в этот перечень не включена наилучшая альтернатива, то никакие процедуры сравнения альтернатив, никакие способы выбора и, конечно же, никакие инструментальные средства их поддержки не смогут ее выявить.

Следовательно, на этом этапе необходима мобилизация всех интеллектуальных ресурсов команды системного аналитика для того, чтобы не упустить перспективные альтернативы и, в первую очередь, ту, которая в дальнейшем окажется оптимальной. Впрочем, следует подчеркнуть, что действительно наилучшая альтернатива, как правило, весьма нестандартна и поэтому далеко не всегда она попадает в поле зрения системного аналитика. Тогда возникает задача выбора в пределах множества Парето.

На практике, естественно, следует стремиться сгенерировать для включения в генеральное множество как можно большее число альтернатив, что повышает вероятность попадания в него действительно наилучшей альтернативы, но отнюдь не гарантирует этого.

В рамках системного анализа разработан широкий перечень рекомендаций, направленных на обеспечение формирования полноценного генерального множества альтернатив (предъявления). Речь идет не только о способах извлечения знаний, которые могут быть положены в основу генерируемых альтернатив, но также о модификации и комбинировании уже имеющихся альтернатив. Отметим, что для генерирования альтернатив хорошо подходят качественные методы оценивания систем (см. параграф 5.6), в частности «мозговой штурм» и морфологические методы.

Не последнюю роль в этом творческом процессе играет обеспечение для команды системного аналитика и активных участников решения проблемы комфортных условий работы и ее должного организационно-методической поддержки.

Изначальное стремление к генерации как можно более представительного множества альтернатив, как правило, приводит к тому, что их количество оказывается весьма внушительным. Теперь уже возникает задача отсеивания наихудших альтернатив. Поскольку тщательное количественное сравнение альтернатив оборачивается неприемлемыми затратами времени, рекомендуется проводить их «грубое» качественное

сравнение на предмет наличия желательных признаков, например, адаптивности к изменению условий, отсутствия неконтролируемых побочных эффектов и других.

9.7. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Любой вид целенаправленной деятельности предполагает *преобразование доступных ресурсов в конечный результат*. Совершенно очевидно, что никакой результат не может быть достигнут без затраты ресурсов, и именно поэтому ресурсосмкость, как частный показатель эффективности является первым и основным критерием-ограничением. Реальные системы жизнеспособны только потому, что являются открытыми и способны получать из окружающей среды материальные, энергетические и информационные ресурсы. Очевидно, что эти ресурсы *не могут быть неограниченными*. Особым видом ресурсов следует считать время, в течение которого система должна достичь целевого эффекта, причем время *ограничено изначально длительностью жизненного цикла любой системы*.

Следовательно, достижение любой цели лимитируется двумя фактами: *доступными ресурсами* (причем, имеющими не только материальное выражение в виде установленного бюджета) и *сроками исполнения*. Отметим, что как показывают статистические данные, в современных условиях до 80% проектов не укладываются либо в бюджет, либо в сроки, либо ни в то, ни в другое.

Поэтому умелое управление имеющимися ресурсами, умение их рационально использовать приобретает особую важность. Эффективное управление ресурсами при разрешении проблемной ситуации состоит в их рациональном распределении по составляющим выбранных путей достижения цели. Но это — еще не все, необходимо обеспечить оптимальное распределение ресурсов по времени, что потребует провести тщательный анализ их потребности для частных целей, определить приоритеты в распределении, выявить источники поступления ресурсов и контролировать их состояние в ходе движения к цели.

Особая и наиболее важная роль принадлежит *информационным ресурсам*. Речь идет в первую очередь о таком нематериальном продукте, создаваемом человеком, как *знания*. Это наиболее ценный компонент информационных ресурсов. Вторая составляющая информационных ресурсов — это *вычислительные ресурсы*, определяющие потенциальную эффективность использования информационных технологий для поддержки принятия решений.

Современная наука определяет информацию как меру снятия неопределенности в ходе опытного познания действительности. Полученным при этом знаниям придается упорядоченный, по возможности формализованный характер. Эта формализация позволяет человечеству пользоваться в дальнейшем отработанными средствами для получения новых знаний. Очевидно, что знаниями такого рода можно овладеть в процессе обучения.

Однако существует еще область неформализованных знаний, полученных индивидом на генном уровне и обогащенных его личным жизненным опытом. Эти знания, существующие в глубинах сознания, в значительной своей части остаются скрытыми (латентными) для самого их обладателя. Именно они питают интуицию, порождая иррациональный эффект озарения, что и делает специалиста экспертом.

При проведении системного исследования аналитики используют как формализованные, так и неформализованные (можно сказать, житейские) знания, которые, естественно, у каждого развиты в разных пропорциях. Поэтому не исключено, что возможная ограниченность тех или других знаний не позволит выявить наиболее перспективную альтернативу или построить адекватную математическую модель проблемной ситуации. В итоге поставленная цель не будет достигнута, даже если материальные и финансовые ресурсы будут иметься в избытке. Все упрется в ограниченность такой составляющей информационных ресурсов, как знания. Впрочем, и ограниченность вычислительных ресурсов может стать причиной неудачи, когда их попросту не хватит для своевременного разрешения проблемы. Какие бы финансовые ресурсы не были заложены в смету расходов, цель не будет достигнута при отсутствии специалистов необходимого уровня квалификации.

Поэтому анализ возможных ограничений доступных информационных ресурсов представляет собой важнейший компонент этого этапа.

9.8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

На этом этапе требуется *увязать воедино цели, критерии и ограничения с допустимыми альтернативами* таким образом, чтобы альтернативы можно было бы сравнивать с точки зрения эффективности указываемых ими путей достижения цели. Такая увязка достигается путем моделирования, конечным результатом которого должна стать формализованная модель. Собственно говоря, речь идет о выборе достижимого уровня формализации для представления проблемы (проблемной системы) семантической моделью.

Очевидно, что характер формируемой модели в значительной степени детерминируется конфигуратором проблемы, т.е. языками, на которых она описана концептуально с позиций всех заинтересованных сторон.

Весьма желательно, чтобы конфигуратор проблемы позволял ограничиться при формализации модели одним математическим языком. Тогда можно с большой вероятностью рассчитывать на построение *конструктивной* аналитической модели, которая с необходимой степенью адекватности и точности отразит все существенные свойства проблемной системы. Под конструктивностью математической модели следует понимать существование отработанных методов ее решения, позволяющих получать объективное решение для выработки эффективных управленческих воздействий. Даже если такие методы неизвестны, всегда имеется возможность найти профессионалов — математиков, способных решить задачу, благо фундаментальная математика создала впечатляющий задел в области методов решения сложных прикладных задач.

На практике для конфигурации проблемы чаще приходится привлекать более одного языка ее описания в силу различия позиций заинтересованных сторон. Если все языки конфигуратора проблемы допускают формализацию, можно построить комплекс частных моделей и на их основе провести поиск приемлемого решения.

Однако нередки случаи, когда конфигуратор проблемы включает, наряду с формализуемыми языками, не формализуемые естественные языки со своими тезаурусами, в том числе, обыденный язык. В таких случаях модель строится из фрагментов описания предметной области — вербальных и формализованных. Для формализованных компонентов такой смешанной модели используется алгоритмизированный поиск решений (расчетные и логические процедуры), для неформализованных — мобилизуются опыт и интуиция высококвалифицированных специалистов.

9.9. СИНТЕЗ РЕШЕНИЯ

Содержание этого этапа системного анализа состоит в выборе *оптимальной альтернативы на основе сравнения всех отобранных альтернатив*. Сравнение, как известно, производится с помощью критерии. Поэтому и требуется увязать цели, критерии и ограничения с допустимыми альтернативами. Ведь альтернативы следует сравнивать с точки зрения потенциальной *эффективности* указываемых или путей достижения цели.

Как правило, в случае наличия множества заинтересованных сторон не существует решения, которое наилучшим образом удовлетворило бы все стороны. Поэтому приемлемым принято считать такое решение, ко-

торое повышает эффективность функционирования проблемной системы хотя бы для одной заинтересованной стороны без признаков ухудшения для всех других заинтересованных сторон. Поиск оптимального решения, естественно, должен быть направлен на увеличение числа сторон, которые будут удовлетворены этим решением.

Следует подчеркнуть, что при решении рассматриваемой задачи, в отличие от оптимизационных задач, необходимо не просто последовательно сужать множество допустимых альтернатив, руководствуясь тем или иным формальным алгоритмом, а обеспечить действительно синтез решения, т. е. согласование частных альтернатив (решений), сгенерированных с учетом интересов каждой заинтересованной стороны.

В конечном итоге неважно, опирается ли решение на определенные объективные закономерности, или, напротив, только на интуицию и опыт экспертов и лиц, принимающих решение, важен исключительно результат. Следовательно, синтез решения, как правило, требует выверенного сочетания расчетных, логических и эвристических процедур. При этом способы и пропорции такого сочетания интуитивных и рациональных действий неизвестны и вряд ли могут быть четко сформулированы.

Впрочем, они детерминированы конкретной ситуацией, в которой решается конкретная задача. Решение зависит и от квалификации и опыта системного аналитика, и от объема и достоверности его априорных сведений о проблемной ситуации, и от системы ценностей заказчика и характера его ожиданий, а также степени его влияния на членов аналитической группы, и еще от множества факторов. К их числу, конечно же, относятся и факторы, определяющие рабочее настроение и психофизическое состояние участников решения проблемы.

9.10. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ

Только на этом этапе системного анализа можно окончательно убедиться в достижении поставленных целей. Ведь последнее зависит не только от того, насколько обоснованным оказалось выбранное решение, но и от того, насколько правильно были восприняты и адекватно реализованы сформулированные рекомендации лицами, принимающими решение. Поэтому случаи, когда после завершения системного анализа проблема остается нерешенной, могут быть обусловлены как выбором незэффективного решения, так и невыполнением вполне качественных рекомендаций. Известны случаи, когда результаты системного анализа попросту отвергались лицами, принимающими решение. Впрочем, тогда можно предполагать о недоработках на этапе структурирования проблема-

тики и конфигурирования проблемы, обусловивших несогласованность моделей системного аналитика и лица, принимающего решение.

В целом же внедрение в практическую деятельность результатов системного анализа помимо непосредственного решения проблемы может способствовать дальнейшему развитию системы. В частности, применительно к современным экономическим системам можно утверждать, что развитие в большей степени зависит от знаний и информации, чем от финансовых и материальных ресурсов. Недостаток ресурсов может остановить рост системы, но не ее развитие. Как показывает современная практика, по мере своего развития система становится все менее зависимой от материальных ресурсов: она становится способной добывать их или производить самостоятельно. Такое развитие непосредственно связано с самообучением, которое становится основным, если не единственным средством развития. Поэтому для современного этапа становления информационного общества характерно трансформация многих компаний в *самообучающиеся организации*.

Отсюда следует вывод о том, что полноценное внедрение результатов системного анализа, обеспечивающего дальнейшее развитие системы, преодолевшей проблемную ситуацию, возможно только на основе согласованных действий всех заинтересованных сторон. Действительно, заказчик обладает высоким уровнем неформализованных знаний в предметной области, но слабо знаком с формализованной методологией системных исследований. Системный аналитик, напротив, профессионально владеет приемами системного подхода, но, естественно, не является специалистом в конкретных предметных областях, подлежащих системному анализу. Поэтому не удивительно, что модели проблемной ситуации у них существенным образом различаются и излагаются на разных языках конфигуратора. В этой связи следование принципу тесного сотрудничества, стремление стать единомышленниками является обязательным условием взаимоотношений заказчика и системного аналитика.

Надо сказать, что базовая методика проведения системного анализа отнюдь не представляет собой систему жестких рекомендаций. Однако ею целесообразно руководствоваться при формировании конкретных методик для конкретных проблемных ситуаций.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Перечислите этапы базовой методики системного анализа.
2. Чем отличаются по смыслу понятия «проблема» и «проблематика»?
3. Какие заинтересованные стороны включаются в ближайшее окружение проблемной системы?

4. Что представляет собой конфигуратор проблемы?
5. Как формируется проблематическая надсистема?
6. Как проблематическая надсистема связана с конфигуратором проблемы?
7. Какие ограничения накладываются на определение целей?
8. В чем состоит основная сложность выполнения целеполагания?
9. Как соотносятся понятия «цель» и «критерий» при проведении системного анализа?
10. Какова роль критериев в проведении системного анализа?
11. В чем состоит содержание процедур системного анализа на этапе постановки задач?
12. Чем обусловлена многокriterиальность задач системного анализа?
13. В чем состоит разница между целевыми критериями и критериями-ограничениями?
14. В чем заключается содержание системного анализа на этапе порождения альтернатив?
15. Какие методы в наибольшей степени подходят для порождения альтернатив?
16. Чем определяется характер моделей, создаваемых в процессе системного анализа?
17. Как связаны конфигуратор проблемы и ее модель? Какие при этом появляются варианты решения проблемы?
18. В чем состоит содержание системного анализа на этапе синтеза решения? Какие сложности при этом приходится преодолевать?
19. В чем состоит специфика реализации синтезированных решений, и какие возможности при этом открываются?
20. По каким причинам реализация результатов оказывается наиболее эффективной в рамках самообучающейся организации?

ЧАСТЬ III

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В УПРАВЛЕНИИ

ГЛАВА 10

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

10.1. СОДЕРЖАНИЕ ФУНКЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ

Применительно к обеспечению эффективности управления системный анализ, представляющий собой методологию разрешения проблем, как нельзя более подходит для снятия противоречий между состояниями объектов управления и обстановки. В целом же методология системного анализа в управлении выступает в качестве средства снятия неопределенности, регулярирующей возникающей в процессе выбора управленческих решений.

Основу управления составляет преобразование информации о состоянии объекта управления в командную информацию. Речь идет о преобразовании содержания (смысла) сообщения о состоянии объекта управления, в результате которого создается новая информация в виде решения о выборе управляющего воздействия. Управление как информационный процесс в организационных (организационно-технических) системах представляет собой последовательность функций, составляющих технологический цикл управления. При этом под функцией управления понимается устойчивая упорядоченная последовательность операций, выделенная в соответствии с принципом разделения труда в управляющей системе.



Рис. 10.1. Функциональная модель цикла управления

Функциональный подход к декомпозиции процесса и циклов управления позволяет выделить следующие функции управления:

- сбор данных;
- подготовка сообщения;
- передача сообщения по каналу связи;
- регистрация данных (учет);
- контроль;
- анализ;
- оперативное управление;
- планирование;
- прогнозирование;
- организация;
- координация;
- доведение решений.

Особую группу составляют функции управления, связанные с учетом человеческого фактора: *стимулирование* и *мотивация* персонала.

Дадим определения перечисленным функциям управления и сформируем функциональную модель цикла управления (рис. 10.1).

Сбор данных представляет собой функцию измерения или оценивания контролируемых характеристик объекта управления, выполняемого персоналом объекта управления для передачи соответствующих данных в управляющую систему.

Подготовка сообщения (запроса) — преобразование собранных данных к виду, пригодному для передачи по каналам связи в управляющую систему. В определенных случаях сообщение о состоянии объекта управления может передаваться по запросу из управляющей системы.

Передача сообщения по каналу связи — реализация функции f_o обмена сообщениями при выполнении требований своевременности, достоверности и безопасности передачи.

Регистрация данных (учет) — группа рутинных функций f_p , обеспечивающих хранение полученных данных. Эта группа функций включает ввод-вывод данных, поиск, преобразование формы, отображение, копирование и тиражирование, статистическую обработку. Сюда относится также обеспечение целостности и конфиденциальности данных.

Контроль — множество функций, направленных на определение состояния объекта управления в каждом цикле управления. Среди функций контроля следует выделить измерение (оценивание) своевременности достоверности, точности и полноты представления данных из объекта управления. Целью контроля является определение степени соответствия текущего состояния объекта управления его заданному состоянию.

Постановка задачи контроля включает формализацию частных задач наблюдения, классификации и идентификации состояния объекта управления.

Принято различать предварительный, текущий и заключительный контроль. Предварительный контроль проводится перед началом процесса управления для оценивания начального состояния объекта управления и возможных воздействий окружающей среды. Текущий контроль выполняется в течение всего процесса управления с целью выявления отклонений от заданного состояния. Заключительный контроль позволяет получать оценку степени достижения цели по завершению процесса управления.

Под функцией *анализа* будем понимать способ обработки результатов контроля, позволяющий выбрать и обосновать альтернативное решение либо о продолжении оперативного управления, либо о переходе к планированию. Пусть, например, контролируемый параметр y_i в результате выполнения очередного цикла управления изменяется в пределах Δy_i . Если анализ показывает, что отклонение от требуемого состояния $\Delta y_i \leq \Delta y_{i\text{des}}$, где $\Delta y_{i\text{des}}$ — допустимое отклонение, то принимается решение о переходе (продолжении) к оперативному управлению. Если же $\Delta y_i > \Delta y_{i\text{des}}$, то принимается решение о переходе к осуществлению функции планирования.

Отметим, что нередко функции контроля и анализа рассматриваются совместно как единая функция управления, связанная с измерением

и оцениванием величины отклонения текущего состояния объекта управления от его оптимального состояния. Нетрудно убедиться, что при проведении такого оценивания используется аналог критерия пригодности, рассмотренного выше применительно к оцениванию качества и эффективности.

Оперативное управление имеет целью обеспечение функционирования системы (объекта управления) в соответствии с принятым планом действий по выполнению задачи управления. В зависимости от поставленной задачи оперативное управление может быть направлено на стабилизацию, слежение, выполнение принятой программы управления (движение по траектории в параметрическом пространстве). В ряде случаев задачей оперативного управления может быть оптимизация параметров управляемой системы или ее адаптация к условиям обстановки.

Функция планирования направлена на последовательное снятие неопределенности относительно структуры и закона функционирования объекта управления, а также состояния обстановки. Переход к планированию осуществляется при качественном изменении условий функционирования системы и (или) обстановки, препятствующем продолжению оперативного управления. Очевидно, что планирование представляет принятие решений по целеполаганию, однако как функция управления оно включает также принятие решений по соответствующим действиям, направленным на достижение требуемого состояния системы и /или окружающей среды.

Принято разделять планирование стратегическое и тактическое. На этапе стратегического планирования определяется необходимость перестройки структуры объекта управления, его выходных параметров, а также закона и алгоритма функционирования. В ходе тактического планирования принимается решение по выбору траектории перевода системы в требуемое состояние с учетом имеющихся ресурсов и ожидаемых состояний обстановки.

Функция прогнозирования состоит в снятии неопределенности относительно возможной структуры, закона и алгоритма функционирования системы в будущем. Независимо от обстоятельств, прогноз представляет собой научно обоснованное суждение о возможном состоянии объекта управления и обстановки в достаточно отдаленном будущем, а также об альтернативных вариантах и сроках достижения предполагаемого целевого состояния.

Основными целями прогнозирования, как правило, являются:

- * предупреждение неблагоприятных состояний обстановки, в которых может оказаться организационная система;

- выбор варианта структуры системы, адекватной прогнозируемым состояниям обстановки;
- выбор организационных и технических решений, способных обеспечить эффективное функционирование системы в будущем.

Очевидно, что важность получения достоверного прогноза исключительно велика. Именно поэтому для прогнозирования привлекаются специалисты высокой квалификации — эксперты. Для получения особо важных прогнозов используются процедуры коллективной экспертизы, в том числе трудоемкий и дорогостоящий метод Дельфи.

Прогнозы принято различать по длительности периодов упреждения будущего (промежуткам времени на которые рассчитан прогноз). Оперативные прогнозы строятся на период, в течение которого объект управления существенно не меняется, краткосрочный — рассчитывается на перспективу количественных изменений. Среднесрочные прогнозы захватывает промежуток времени, в течение которого ожидается преобладание количественных изменений над качественными. Наконец, долгосрочные прогнозы строятся на перспективу качественных изменений системы и обстановки.

Функция *организации* заключается в образовании оптимальных связей между всеми компонентами объекта управления, установлении порядка и условий (в том числе, ограничений) их функционирования, распределении ресурсов системы в интересах оперативного достижения целевого эффекта. Эта функция обеспечивает:

- агрегирование функциональных элементов и ресурсов в виде организационных структур;
- распределение ответственности между ЛПР различных уровней иерархии.

Функция *координации* направлена на обеспечение согласованного взаимодействия подсистем в соответствии с общесистемными целями и поддержание этой согласованности в течение всего процесса управления вплоть до достижения цели. Основная задача координации состоит в устранении противоречий, между частными целями подсистем, формируемыми разными ЛПР в процессе функционирования организационных систем. Именно эта особенность организационных систем порождает одну из основных сложностей управления ими.

10.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ

Построение моделей функций управления необходимо с точки зрения задач их автоматизации с целью эффективного управления организационными системами. Особенно важной представляется задача

автоматизации процесса принятия управлений решений, связанных с семантическим преобразованием информации.

10.2.1. МОДЕЛЬ ФУНКЦИИ КОНТРОЛЯ

Моделирование функции контроля обеспечивает отображение трех частных задач, составляющих в совокупности общую задачу контроля состояния объекта управления. Речь идет о задачах наблюдения, классификации и идентификации.

Задача наблюдения. Представление системы семантической моделью (см. параграф 2.3) приводит к записи глобальных уравнений системы — уравнения наблюдения (1.4):

$$y(t) = g(z(t), x(t))$$

и уравнения состояния (1.5):

$$z(t) = f(z(t_0), x(\tau)); \tau \in [t_0, t].$$

Состояние системы (объекта управления) $z(t) \in Z$ в каждый момент времени характеризуется множеством переменных z_p , меняющихся вследствие внутренних возмущений, управляемых и неуправляемых (внешних) воздействий. При этом переменные состояния $z(t)$ в общем случае могут быть неизвестны, и судить об их физической природе и величине оказывается затруднительным. Выходные же переменные $y(t)$ являются конкретными физическими величинами, они наблюдаемы и измерямы. Потому определение состояния объекта реально осуществимо именно в пространстве выходных переменных.

Формально определение произвольного состояния объекта возможно только в том случае, когда в результате измерения выходных переменных $y(t)$ при известных значениях входных переменных $x(t)$ может быть получена достоверная оценка любого внутреннего состояния $z(t)$. В этом и состоит задача наблюдения теории управления. Она сводится к решению относительно $z(t)$ уравнения

$$G(t, x(t), z'(t)) = y'(t), \quad (10.1)$$

где G — оператор, $y'(t)$ — реализация выходного сигнала, доступная для регистрации.

Система может считаться наблюдаемой в состоянии $z(t)$ на множестве моментов времени T при входном воздействии $x(t)$ и отсутствии возму-

щений, если уравнение (10.1) имеет единственное решение $z^*(t) = z(t) \in Z$. Если такое утверждение выполняется для любого $z(t) \in Z$, то объект управления считается полностью наблюдаемым.

Необходимое и достаточное условие полной наблюдаемости системы состоит в том, что каждый элемент $y(t) \in Y$ при фиксированных значениях t и $x(t)$ имеет в качестве прообраза единственный элемент $z(t)$. Это означает, что каждому состоянию системы должно соответствовать одно и только одно значение выходной переменной. Следовательно, должно существовать отображение, обратное уравнению наблюдения (1.4), которое позволяет воспроизвести внутренние состояния объекта управления по наблюдаемым выходным характеристикам, порождаемым этими внутренними состояниями:

$$g^{-1}: Y \rightarrow Z$$

Благодаря наличию такого обратного преобразования выходные переменные могут быть использованы в качестве признаков наблюдаемого текущего состояния объекта управления. Иными словами, при полной наблюдаемости объекта управления всегда имеется возможность определения его состояния по результатам измерения его выходных характеристик. В этом и состоит решение обратной задачи управления.

Очевидно, что весьма важным для обеспечения полной наблюдаемости системы является определение набора элементов (контрольных точек), в которых производится измерение существенных выходных характеристик. В организационных системах ответственность за полноту, достоверность и точность данных о состоянии системы несет ЛПР объекта управления.

Решением задачи наблюдения функция контроля не исчерпывается.

Задача *классификации*. Эта задача состоит в отнесении конкретного наблюдаемого состояния объекта управления к одному из сформированных (заданных) классов эквивалентности. Дело в том, что каждое конкретное состояние объекта относится к одному из подмножеств его текущих состояний, обладающих некоторыми общими свойствами. Речь идет о таких состояниях, по отношению к которым принимаются одинаковые решения. Формально задача классификации формулируется следующим образом: необходимо найти отображение

$$\xi: Y \rightarrow R,$$

где R — множество классов состояния объекта управления.

При решении задачи классификации множество возможных состояний объекта, которое, в принципе может быть неограниченным, разбивается на конечное и, как правило, ограниченное, количество непересекающихся классов, соответствующих состояниям с определенными общими признаками. Далее устанавливается принадлежность любого конкретного (эмпирического) состояния объекта управления одному из классов.

Иными словами, задача классификации сводится к формированию определенных *агрегированных состояний* объекта управления. Термин «агрегирование», обычно означающий объединение компонентов системы в рамках общей функциональной задачи, применительно к задаче классификации имеет смысл объединения в определенный класс эквивалентности по совокупности общих признаков. Следовательно, множество агрегированных состояний задает типы состояний, к одному из которых будет отнесено конкретное наблюдаемое состояние объекта управления.

Задача *идентификации (распознавания образов)*. Формально эта задача состоит в выполнении преобразования:

$$\eta: R \rightarrow S,$$

где S — оценка конкретного реального состояния системы, полученная в результате очередного измерения ее входных и выходных характеристик.

Следовательно, преобразование η ставит в соответствие определенному типу состояния объекта управления R единственное конкретное решение S о его истинном реальном состоянии. На практике при идентификации реального состояния объекта учитывается вероятность возможных ошибок измерения, погрешностей средств измерения, помех в каналах связи и других причин неполного соответствия полученных данных реальному состоянию объекта управления.

10.2.2. МОДЕЛИ ФУНКЦИИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В связи с огромным разнообразием задач управления функция оперативного управления на практике реализуется множеством способов, которые будем называть принципами оперативного управления.

Общая структурная схема системы с управлением приведена на рис. 10.2.

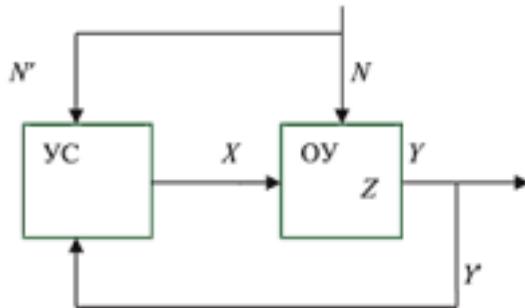


Рис. 10.2. Общая структурная схема системы с управлением

В зависимости от объема и степени полноты информации об управляемом объекте и состоянии обстановки, которой располагает управляющая система, эта общая схема может принимать разнообразные конкретные формы. Рассмотрим возможные классы (типы) систем с управлением с точки зрения реализуемых ими принципов оперативного управления.

На рис. 10.2 используются следующие обозначения: X — множество управляемых воздействий; Y — множество выходов ОУ; Z — множество внутренних состояний ОУ; N — множество неуправляемых (внешних) воздействий; Y' — подмножество выходов, известных в УС; N' — подмножество неуправляемых воздействий, известных в УС.

Среди рассматриваемых структур в отдельную группу можно выделить так называемые *регуляторы*, реализующие такие задачи управления как выполнение программы, стабилизация и слежение. Такие системы имеют целью обеспечение требуемого состояния или определенного подмножества заданных состояний переменных Y в условиях действия возмущений (неуправляемых воздействий), формально представляемых переменными N . Множество переменных X выполняет функцию управляемых воздействий. При этом входные воздействия X и N порождают множество непосредственно не наблюдаемых переменных внутреннего состояния Z , в свою очередь, порождающих множество выходных сигналов, позволяющих за счет функции контроля их идентифицировать.

Системы с управлением, в которых контур обратной связи не содержит разрывов, называются замкнутыми, системы, у которых отсутствуют те или иные элементы контура обратной связи — разомкнутыми.

Задача управления по программе состоит в однозначном (жестком) выполнении заранее составленной и введенной в систему последовательности управляемых воздействий $\{x_i\}$. Эта последовательность априори задается на весь процесс управления вплоть до достижения поставленной цели. При этом программа доводит управляемые воздействия до объекта управления через определенные промежутки времени Δt , без учета его

реального состояния, т.е. функция контроля не задействуется. Приведем структурную схему управления по программе (рис. 10.3).

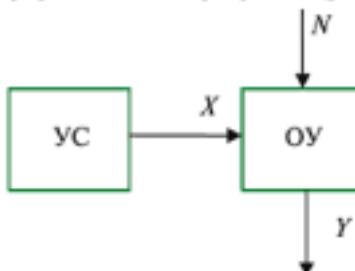


Рис. 10.3. Структурная схема программного управления

Управление по программе предполагает полное отсутствие в управляющей системе сведений о состоянии объекта управления и обстановки, т.е. $Y=0$, $N=0$

Использование такого метода управления, естественно, ограничено задачами, условием которых является несущественное влияние неуправляемых воздействий внешней среды на состояние объекта управления. Кстати, примером системы с программным управлением может служить учебное заведение, проводящее учебный процесс в строгом соответствии с утвержденным учебным планом.

В случае, когда возмущающее воздействие окружающей среды на разомкнутую систему оказывается существенным, используется подход, основанный на компенсации действия таких неуправляемых воздействий.

Задача управления по возмущениям предполагает возможность контроля состояния обстановки управляющей системой и его учета при формировании управляющих воздействий. Так функционируют, в частности, системы кондиционирования, режим работы которых регулируется в соответствии с параметрами внешней среды.

Структурная схема управления по возмущениям выглядит следующим образом (рис. 10.4).

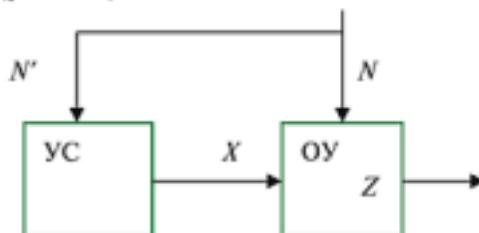


Рис. 10.4. Управление по возмущениям

Когда управляющая система получает полную информацию о состоянии обстановки ($N = N$), может быть обеспечена полная компенсация воздействий внешней среды. Такое управление называют инвариантным. Однако для открытых систем предусмотреть все возможные возмущения, как правило, весьма проблематично. Поэтому управление по возмущениям с неполной информацией чревато накоплением ошибок. Использование такого управления оправдано в случаях, когда диапазон изменений состояния обстановки существенно ограничен.

Управление по состоянию, основанное на замыкании контура обратной связи, является более универсальным. Благодаря наличию обратной связи управляющая система располагает информацией о динамике состояний объекта управления (рис. 10.5).

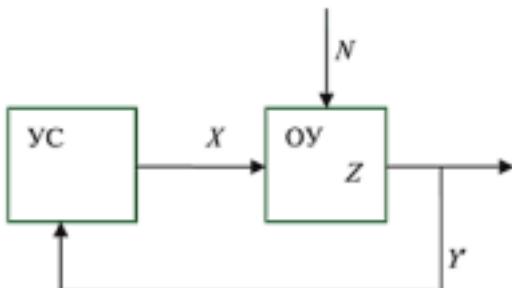


Рис. 10.5. Управление по состоянию

В зависимости от конкретных условий управление по состоянию может производиться либо с полной информацией ($Y = Y$), либо с неполной информацией. При этом, естественно, должно выполняться условие наблюдаемости объекта управления. На основе информации о текущем состоянии ОУ в УС определяется величина его отклонения от требуемого состояния и далее, в зависимости от выполняемой задачи, выбирается определенное управляемое воздействие.

Так, при выполнении задачи стабилизации оперативное управление направлено на удержание текущего состояния в заданных пределах изменения, что и обеспечивает стабилизацию выходных характеристик. Примером выполнения такой задачи может служить гомеостазис живых организмов.

В задачах слежения управление имеет целью соблюдение определенного соответствия между текущим состоянием ОУ и состоянием некоторой внешней системы, которое изменяется случайным образом. Типичной системой слежения является радиолокационная станция в режиме сопровождения воздушной цели. Кстати, живые организмы

тоже выполняют задачу слежения, согласовывая режим дыхания с выполняемой физической нагрузкой.

Основной недостаток систем управления по состоянию связан с появлением неустранимых отклонений от требуемого состояния. Это обусловлено формированием управляемых воздействий только после того, как отклонение уже появилось, т.е. задержкой управляемого воздействия по отношению к моменту возникновения отклонения. Особенно заметен этот недостаток при управлении по состоянию с неполной информацией.

Наибольшее распространение на практике получили системы с комбинированным управлением. В них задействованы два замкнутых контура: контур обратной связи и контур контроля окружающей обстановки. Схема такого управления приведена на рис. 10.6.

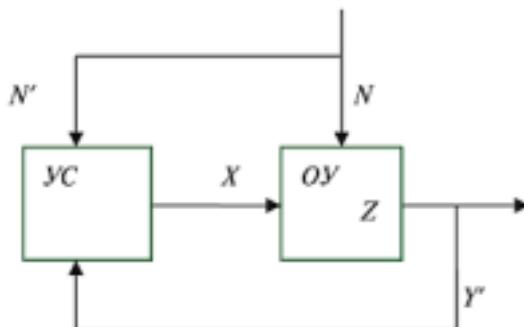


Рис. 10.6. Комбинированное управление

Естественно, комбинированное управление, в зависимости от реальных условий, может осуществляться с полной или неполной информацией. При этом источниками неопределенности (неполноты информации) могут оказаться сам объект управления, обстановка (окружающая среда), а также и то и другое. Как правило, реальные ситуации порождают условия управления с неполной информацией, и в первую очередь это связано с изменчивостью обстановки.

Иерархическое управление с необходимостью вводится в системах с неполной информацией в соответствии с *принципом необходимой иерархии*.

Этот принцип утверждает, что с ростом неопределенности состояний системы и обстановки для эффективного управления требуется все более высокие уровни иерархии. Схема системы иерархического управления с двумя (для простоты) уровнями иерархии приведена на рис. 10.7.

Иерархическое управление широко применяется в организационных и организационно-технических системах, для которых характерна высокая неопределенность в ходе принятия решений. Информация, поступающая в управляющую систему, не полностью отражает реальное

состояние объекта управления. При управлении такими системами ЛПР зачастую приходится использовать эвристические процедуры, поскольку взаимодействия между подсистемами и отдельными исполнителями, как правило, не формализуемы.

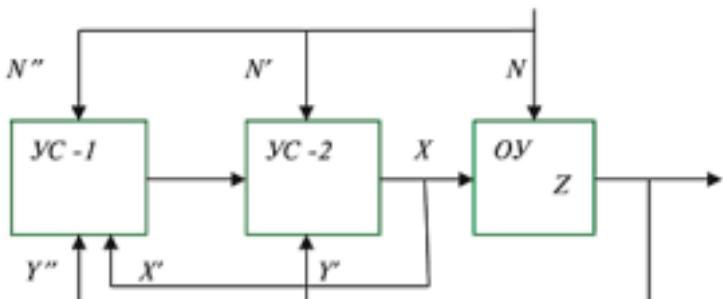


Рис. 10.7. Иерархическое управление

На рис. 10.7 УС-1 — управляющая система верхнего уровня иерархии; УС-2 — управляющая система нижнего уровня иерархии; X' — подмножество управляемых воздействий, УС-2, известное в УС-1; Y' — подмножество выходов ОУ, известное в УС-1; N'' — подмножество неуправляемых воздействий (неконтролируемый входов ОУ), известное в УС-1.

Очевидно, что процессы управления иерархическими системами не могут ограничиваться только функциями регулирования. На первый план выдвигаются функции планирования и прогнозирования, мотивации и стимулирования. Особую важность приобретают функции организации и координации. Поэтому естественным оказывается распределение функций между управляющими подсистемами. При этом на УС-2 возлагаются функции оперативного управления (регулирования), а УС-1 берет на себя функции, непосредственно не относящиеся к регулированию, в том числе, целеполагание, прогнозирование и планирование. На этом уровне иерархии осуществляется принятие решений, а на уровнях УС-2 и ОУ обеспечивается реализация принятых решений.

10.2.3. МОДЕЛЬ ФУНКЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ

Функция планирование является альтернативой по отношению к функции оперативного управления, поскольку решение о переходе к планированию принимается при невозможности или нецелесообразности продолжения оперативного управления. Планирование, как процесс снятия неопределенности относительно структуры и закона

функционирования объекта управления представляет собой последовательность двух подпроцессов. Первый из них связан с принятием решений по целеполаганию (последовательность процедур определения структуры и диапазона значений целевых выходных параметров). Второй подпроцесс состоит в выборе конкретных значений параметров и способа достижения соответствующего состояния системы (решается задача принятия решения по выбору действий).

Структура процесса планирования может быть формально представлена кортежем из двух компонентов (двойкой):

$$R_{\text{пл}} = \langle I, F \rangle, \quad (10.2)$$

где I — информационный компонент, описывающий в форме общей задачи принятия решения (ОЗПР) текущие решения и данные, используемые для их выбора, F — процедурный компонент, включающий операции обмена сообщениями $f_e(t)$, их рутинного $f_p(t)$, и семантического $f_s(t)$, преобразования.

При этом функции преобразования содержания сообщений (и несвойствами информации) включают расчетные процедуры $r(t)$, логические процедуры $I(t)$ и эвристики $e(t)$. Эвристиками здесь принято называть методы выбора решений, основанные на неформальных правилах, вырабатываемыми опытными специалистами в той или иной предметной области (экспертами). При решении задач рассматриваемого типа эвристические процедуры обеспечивают сокращение объема вычислений, а также получение приемлемого результата в случаях, когда аналитические или алгоритмические методы оказываются неприменимыми.

Процесс планирования заключается в преобразовании сведений о состоянии объекта управления в командную информацию (управляющие воздействия):

$$R_{\text{пл}} = I_{\text{пл}} \rightarrow I_{\text{ком}} \quad (10.3)$$

Полностью компоненты процесса планирования удобно formalизовать в терминах теории принятия решений (см. параграф 2.5):

$$\text{ОЗПР: } \langle T, I_{\text{пл}}, I_{\text{альт}}, I_{\text{выб}}, \Phi, \Psi \rangle, \quad (10.4)$$

где T — цель принятия решения, в рассматриваемом случае — выбор наилучшей альтернативы;

$I_{\text{пл}}$ — исходные данные для порождения альтернатив;

$I_{\text{альт}}$ — множество порожденных альтернатив, предлагаемое для выбора;

$I_{\text{выб}}$ — выбранная альтернатива;

Φ — принцип (правило) порождения альтернатив;

Ψ — принцип (правило) выбора наилучшей альтернативы.

Тогда механизм получения решений для произвольной задачи планирования, формализующий функции семантического преобразования информации выглядит следующим образом:

$$I_{\text{реш}} = \Psi \{ \Phi(I_{\text{ст}}) \rightarrow \exists I_{\text{иск}} \}. \quad (10.5)$$

Здесь $\Phi(I_{\text{ст}})$ означает применение правила порождения альтернатив (вариантов управляемого воздействия) к множеству исходных данных, привлеченных для порождения альтернатив, а $\exists I_{\text{иск}}$ определяет существование искомой альтернативы.

В целом процесс планирования состоит из ряда этапов, обеспечивающих решение ОЗПР соответствующего уровня. В частности, он содержит этапы:

- определения целевого состояния;
- определения структуры процесса;
- определение выходных параметров;
- определение необходимых ресурсов.

Общее количество этапов планирования (уровней рекурсии) определяется для каждой задачи планирования конкретно. Оно зависит от степени исходной неопределенности задачи, которая последовательно снимается от этапа к этапу. Так, на первом этапе рассматривается абстрактный перечень целей развития системы, а на последнем — конкретные решения по распределению ресурсов, обеспечивающие достижение целевого состояния.

Кроме того, на каждом этапе могут вводиться обратные связи, учитывающие влияние результатов выполненных этапов на дальнейший процесс выбора альтернатив.

10.2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

При решении задач прогнозирования исходят из обоснования предложений о предстоящих качественных изменениях систем в относительно отдаленном будущем. В таком случае речь идет о формировании долгосрочных прогнозов, для получения которых целесообразно использовать логические процедуры и (или) экспертные методы.

Логические методы прогнозирования базируются на выявлении аналогии функционирования или развития рассматриваемой системы с этапами жизненного цикла некоторой другой системы (*аналога*).

Экспертные методы прогнозирования основаны на использовании опыта и латентных знаний (интуиции) квалифицированных специали-

ств, привлекаемых для содействия ЛПР в выборе решений в условиях неопределенного будущего. Наиболее надежные прогнозы обеспечивает применение разновидностей метода Дельфи, а также метода сценариев в комбинации со статистическими методами (см. параграф 5.7).

В случаях, когда задача прогнозирования основывается на предположении о сохранении в будущем существенных закономерностей поведения систем, т.е. перспективе в основном количественных изменений параметров, речь может идти о формировании краткосрочных либо среднесрочных прогнозов. Тогда удобно использовать процедуру экстраполяции.

Методы экстраполяции основаны на идее продвижения установленной закономерности протекания процесса за пределы эмпирического диапазона параметров. В их основе лежит математическая операция *интерполяции* — вычисления промежуточных значений функции на основании заданного ряда ее значений. В широком смысле слова интерполяирование состоит в представлении некоторой функции, набор значений которой задан (при конкретных значениях непрерывной переменной), с помощью другой, более простой функции.

Если $y = f(x)$ — функция, заданная рядом значений y_1, y_2, \dots, y_n , которые она принимает при значениях x_1, x_2, \dots, x_n независимой переменной x , и пусть $\phi(x)$ — произвольная (более простая) функция, принимающая при x_1, x_2, \dots, x_n те же самые значения, что и $y = f(x)$. Замена $y = f(x)$ на $\phi(x)$ в пределах указанного интервала и представляет собой операцию интерполяции.

В отличие от интерполяции экстраполирование представляет собой процесс вычисления значений функции $y = f(x)$, находящихся за пределами ряда ее заданных значений.

Очевидно, что при обосновании прогноза экстраполирование следует использовать с определенной осторожностью. Однако, если Δx берется достаточно малым, и к тому же известно, что функция $y = f(x)$ вблизи границ заданного ряда значений изменяется плавно, то можно уверенно экстраполировать ее за пределы установленного ряда значений.

По мере увеличения интервала упреждения прогноза Δx , естественно, растет степень неопределенности в отношении протекания процессов дальнейшего развития системы. Поэтому методы экстраполяции применяются в сочетании со статистическими методами.

Статистические методы прогнозирования основаны на использовании теории вероятности, математической статистики и теории случайных процессов.

При реализации любых методов прогнозирования возникает задача оценивания качества прогноза. Такая задача решается посредством

верификации прогноза. В процессе верификации анализ совокупности способов, критериев и процедур прогнозирования позволяет оценить такие показатели качества прогноза, как его достоверность, точность и обоснованность. В задачах управления качество прогнозов оценивается по результатам их использования для целей планирования и оперативного управления.

Каких-либо стандартных методов верификации прогнозов пока не существует. Однако считается, что доверительный интервал прогноза можно оценить, зная характеристики инерционности и связности системы, устойчивости ее динамики. Так, высокая инерционность системы дает основания полагать, что траектория ее изменений будет достаточно гладкой и устойчивой.

10.3. ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ

Очевидно, что эффективность процесса управления непосредственно связана с качеством решений, вырабатываемых управляющей системой с целью воздействия на объект управления. Поэтому в соответствии с системным *принципом измерения* эффективность управляющей системы следует оценивать по степени ее содействия достижению цели всей системы с управлением.

Наиболее общим показателем эффективности управления является степень соответствия принятых решений состояниям объекта управления. Этот показатель количественно может быть определен количеством условной энтропии, измеряющей степень несоответствия решений реальным состояниям системы.

Критерий качества принимаемых решений может быть тогда представлен в виде:

$$H(X)_{\text{пред}} \geq H(Y), \quad (10.6)$$

что означает: требуемое множество управляющих воздействий управляющей системы, представляющее собой априорную энтропию для ЛПР объекта управления, должна быть не меньше энтропии, характеризующей неопределенность ЛПР УС относительно фактического состояния объекта управления перед началом очередного цикла управления.

Практическое использование этого критерия, однако, затруднительно, поскольку он не учитывает семантики состояний ОУ и действий УС. Это касается и вероятностного (энтропийного) подхода в целом.

Анализ основных функций управления позволил установить, что наиболее информативными при оценивании эффективности управления являются показатели:

- ценности информации;
- остаточной неопределенности принимаемых решений.

Показатели и критерии ценности информации мы уже рассматривали в параграфе 3.3. В соответствии с формулой Харкевича (3.10)

$$I_{\text{н}} = \log P_{\text{дл}} 1 - \log P_{\text{дл}} 0 = \log (P_{\text{дл}} 1 / P_{\text{дл}} 0),$$

ценность информации определяется путем сравнения вероятностей достижения цели до и после получения и использования по назначению того или иного сообщения. Естественный критерий ценности информации формулируется в виде правила

$$I_a = \max (P_{\text{дл}}) \quad (10.7)$$

Второй из показателей оценивает относительное количество эвристических процедур, привлеченных для принятия решения. Для уяснения сущности критерия минимума эвристик целесообразно рассмотреть, из чего складывается качество решения.

Качество решения представляет собой комплексное свойство, включающее многие внутренние характеристики процесса управления, что усложняет его интерпретацию. Формально принятие решения есть процесс преобразования исходных данных, которыми располагает ЛПР, в решение:

$$\{f_{\text{реш}}\}: \{I_{\text{из}}\} \rightarrow \{I_{\text{реш}}\}, \quad (10.8)$$

где $\{f_{\text{реш}}\}$ — множество функций преобразования информации,

$\{I_{\text{из}}\}$ — множество сведений о состоянии объекта управления и обстановки,

$\{I_{\text{реш}}\}$ — командная информация.

При такой постановке процесс принятия решения состоит в порождении информационного объекта $\{I_{\text{из}}\}$ и приведении ему в соответствие нового информационного объекта $\{I_{\text{реш}}\}$, что достигается путем последовательного снятия неопределенности относительно принимаемого решения. Каждый этап этого процесса сопровождается переходом от гипотез к конкретным данным.

При этом остаточная энтропия $H_{\text{ост}}$ связана с допустимым промежутком времени для принятия решения, ограниченным требуемой

оперативностью процесса управления. Эти соображения позволяют сформулировать *принцип минимума эвристик*: чем меньше эвристических процедур задействовано в процессе принятия решения, тем выше качество решения.

Поэтому эффективность управления может быть оценена по разности между остаточной неопределенностью $H_{\text{ост}}^{\text{инф}}$ информационного объекта $\{I_{\text{реш}}\}$ и минимальной возможной остаточной неопределенностью $H_{\text{ост min}}$ для этого информационного объекта. При этом фиксируется промежуток времени, отводимый для принятия решения:

$$H_{\text{реш}} - H_{\text{ост min}} \text{ при } T_{\text{реш}} > T_{\text{реш min}} \quad (10.9)$$

где $H_{\text{ост}}$ — остаточная неопределенность информационного объекта, достигнутая в конкретной системе управления;

$H_{\text{ост min}}$ — минимальную возможную остаточную неопределенность для этого информационного объекта, обеспечиваемую в идеальной системе управления.

Критерий, отражающий принцип минимума эвристик, формулируется в виде правила:

$$H_{\text{ост реш}} = \min(H_{\text{ост}}). \quad (10.10)$$

Согласно этому правилу лучшим признается решение, имеющее минимальную возможную остаточную неопределенность. Критерий минимума эвристик в явном виде устанавливает зависимость качества решений от времени, допустимого для их выбора. Он также обладает в необходимой мере свойствами измеримости, полноты, неизбыточности, ясности физического смысла и чувствительности.

Если считать, что в идеальной системе управления используются оптимальные процедуры, и их применение приводит к выбору наилучших решений за оптимальное время, то $H_{\text{ост реш}} = 0$. Если же решения в некой гипотетической системе принимаются только на основе эвристик, то в предельном случае остаточная неопределенность решения будет близка к равновероятному (случайному) выбору решений, что эквивалентно отсутствию управления.

В реальных системах управления эвристические решения принимаются при отсутствии (ограниченности) необходимой информации и при невозможности ее получить за время, выделенное для принятия решения. Поэтому $H_{\text{ост реш}} = H_{\text{ост min}}$ и, следовательно, остаточная определенность не равна нулю.

Это дает основание для проведения сравнительного анализа решений, получаемых в разных по структуре и алгоритму функционирования системах управления, в том числе, с использованием автоматизированных систем поддержки принятия решений и экспертных систем.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. В чем заключается общая задача управления?
2. Какие вам известны конкретные задачи управления?
3. Перечислите основные типы систем с управлением.
4. Какие вы знаете аксиомы теории управления?
5. Назовите основные функции управления.
6. Как формально ставится общая задача принятия решения?
7. Из каких частных задач складывается задача контроля объекта управления?
8. Сформулируйте задачу наблюдения.
9. В чем состоит обратный характер задачи наблюдения?
10. На чем основаны методы прогнозирования?
11. В чем состоит процедура экстраполяции?
12. Какое ограничение налагается на использование процедуры экстраполяции для прогнозирования?
13. Как формируется модель процесса планирования?
14. Что означает термин «эвристика»?
15. В чем состоит принцип необходимой иерархии?
16. Сформулируйте естественный критерий эффективности управления.
17. Как характеризует принятые решения наличие остаточной энтропии?
18. Как определяется эффективность управления?
19. В чем заключается принцип минимума эвристик?
20. Как сказывается на качестве решения ограничение времени, отводимого на его принятие?

ГЛАВА 11

КАЧЕСТВО УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ

11.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПОНЯТИЙ

Одним из принципов формирования информационного общества и экономики знаний является преобразование генерируемых знаний в новые стратегии управления сложными техническими и организационными системами. Объективное возрастание сложности систем порождает высокую неопределенность ситуации принятия решений.

Постановка общей задачи выбора стратегий или принятия решений характерна для проблемной ситуации, в которой лицо принимающее решение (ЛПР) оказывается перед необходимостью осуществить выбор наилучшей альтернативы в условиях высокой неопределенности и ограниченного лимита времени. Как следствие, такие задачи относятся к числу наиболее сложных.

В рамках системного подхода любой объект, явление или процесс принято рассматривать как сложную систему, движущуюся к заранее поставленной или объективно существующей цели

Наличие разнообразных, порой противоречивых, трактовок понятий качества и эффективности применительно к оцениванию процессов управления вносит существенную неопределенность в понятийный аппарат теории управления. Это обстоятельство затрудняет сотрудничество специалистов при обсуждении, в том числе в печати, результатов фундаментальных и прикладных исследований в рамках этого важнейшего научного направления.

В литературе нередко смешиваются понятия качества, эффективности, продуктивности, результативности, которые используются как по отношению к информационным объектам, так и информационным процессам. Это приводит к росту неопределенности в сообщениях, которыми обмениваются субъекты информационных процессов, приводя в итоге к неоправданным затратам времени и ресурсов.

Введем понятия качества принимаемых решений и эффективности процесса управления, исходя из базовых положений теории эффективности (см. гл. 7).

Определение 1: качество решения — совокупность существенных свойств решения, определяющих степень его пригодности для использования по назначению — для осуществления управляющего воздействия с целью перевода объекта управления в требуемое состояние в очередном цикле управления.

Определение 2: эффективность управления — комплексное операционное свойство процесса управления, как упорядоченной совокупности управляющих воздействий, характеризующее степень его приспособленности к достижению цели управления.

Очевидно, что принимаемое ЛПР управляющей системы (УС) решение отражает модель ситуации (состояния объекта управления и обстановки), которую ЛПР синтезировал к моменту доведении до объекта управления (ОУ) сообщения об очередном управляющем воздействии.

Следовательно, существенными свойствами решения могут служить свойства такого сообщения, в том числе: своевременность, актуальность, полнота, точность и другие. Необходимый и достаточный набор (множество) существенных свойств решения будет определяться выполняемой в данном цикле функцией управления: оперативное управление, планирование или прогнозирование:

$$Y_k = \langle Y_1, Y_2, \dots, Y_n \rangle, \quad (11.1)$$

где Y_k — обобщенный показатель качества решения, Y_1, Y_2, \dots, Y_n — частные показатели качества решения.

Что же касается показателей эффективности, то к ним, как известно, относятся результативность (в частности, степень достижения целевого эффекта), оперативность и ресурсоемкость:

$$Y_e = \langle Y_{e'}, Y_{e''}, Y_p \rangle, \quad (11.2)$$

где Y_e — обобщенный показатель эффективности завершенного процесса управления, $Y_{e'}, Y_{e''}, Y_p$ — указанные частные показатели эффективности.

Необходимо отметить одно важное обстоятельство. Дело в том, что в практике целенаправленной деятельности используется широкий спектр понятий, связанных с оцениванием эффективности, в частности: такие понятия, как производительность, продуктивность, экономичность, мощность и другие. На бытовом уровне они нередко рассматриваются как синонимы.

Однако, строго говоря, это заблуждение. При более внимательном рассмотрении выясняется, что такие «промежуточные» показатели эффективности представляют собой комбинацию результативности с одним из двух других частных показателей эффективности. К примеру показатель «производительность» есть не что иное, как результативность в единицу времени, показатель «экономичность» есть комбинация результативности и ресурсоемкости и т.п.

Обратим внимание на еще одно, крайне неприятное заблуждение. В современной практике управления «эффективность менеджмента» нередко оценивается непосредственно после принятия недостаточно извещенного решения, т.е. задолго до достижения цели. Впоследствии же выясняется, что результат оказался провальным: время затрачено, ресурсы израсходованы, но цель «немножко» не достигнута. Недаром в российском разговорном жанре словосочетание «эффективные менеджеры» приобрело ироничное звучание.

Для принятия управленческого решения в каждом цикле управления ЛПР руководствуется сообщением о текущем состоянии ОУ, полученным по контуру обратной связи с нижних уровней иерархии. Качество этого решения (степень его соответствия реальному состоянию ОУ), принимаемого в соответствии с целью управления, определяет состояние, в которое будет переведен ОУ. Очевидно, что для обеспечения эффективности управления ЛПР следует принимать оптимальные решения в каждом цикле управления. Одно существенно не оптимальное решение может привести к невозможности достижения цели.

11.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЦЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрим ситуацию, в которой ЛПР на основе сообщения, полученного от ОУ принимает решение о выборе управляющего воздействия и его адекватного доведения до ОУ посредством передачи сообщения $S_{\text{упр}}$. Формально модель такой задачи принятия решения можно представить в виде:

$$S_{\text{упр}} = \langle F_{\text{upr}}, T_{\text{дел}}, S_{\text{upr}}, M_{\text{пew}}, R, S_{\phi}, K \rangle, \quad (11.3)$$

где F_{upr} – цель принятия решения (перевод ОУ в требуемое состояние), $T_{\text{дел}}$ – допустимый промежуток времени на принятие решения, S_{upr} – исходные сведения для генерации альтернативных вариантов решения (сообщение из ОУ и данные относительно обстановки), $M_{\text{пew}}$ – множество порожденных ЛПР альтернатив, R – выбранное решение, S_{ϕ} – сообщение, формируемое ЛПР для передачи в ОУ управляющего воздействия, K – критерии, на основе которых ЛПР выбирает конкретное решение.

Действия ЛПР состоят в преобразовании исходных сведений S_{np} в управленческое решение R :

$$R = K \{F(S_{np}) \rightarrow \exists R \in M_{pre}\}, \quad (11.4)$$

где F — оператор преобразования.

Предварительная оценка качества управленческого решения формируется на стадии его принятия, однако реальный результат принятия решения, как правило, может быть измерен только после выполнения операции контроля достигнутого состояния ОУ, в которое он был переведен соответствующим управляющим воздействием. Окончательно качество совокупности решений можно определить только по результатам оценивания (измерения) эффективности завершенного процесса управления.

Естественным критерием достижения цели управления является сам факт приведения ОУ в состояние, определенное при целеполагании как конечное (целевое). В случае количественной цели критерием ее достижения может служить область допустимых значений в пространстве состояний ОУ.

Качество решений зависит от квалификации и опыта ЛПР, от устойчивости ЛПР к факторам внешнего воздействия, от его умения принимать решение в условиях ограничения времени на принятие решения. ЛПР принимает решение, руководствуясь полученными из ОУ сообщениями, в которых, в общем случае содержится не только информация, но также информационный шум и дезинформация.

Очевидно, что в общем случае разные индивиды, потенциально выступающие в роли ЛПР, по-разному декодируют и интерпретируют одно и то же сообщение, что приводит к принятию различных решений относительно целесообразности использования по назначению сведений, которые это сообщение содержит.

В принципе, практически любое сообщение конечного объема, переданное на естественном или формализованном языке и принятое без искажений в канале связи, содержит некоторую *остаточную неопределенность*. Иными словами, принятое сообщение в общем случае содержит в определенных соотношениях:

- информацию (достоверные сведения);
- информационный шум (исходную неопределенность сообщения, не декодируемые и тривиальные сведения);
- дезинформацию (умышленно и (или) неумышленно внесенные недостоверные сведения).

Поэтому, как уже отмечалось выше (см. параграф 3.5) следует стремиться к *антидемонической интерпретации семантики сообщения*, поскольку цель ЛПР состоит в извлечении из него исключительно достоверных сведений (информации), в то время как наличие в сообщении шума и недостоверных сведений (дезинформации) играет роль ограничений для достижения этой цели.

Таким образом, особое значение для ЛПР приобретает наличие критерия ценности информации, извлеченной им из принимаемых сообщений от ОУ относительно его состояния. Следует подчеркнуть, что степень ценности информации, извлекаемой из получаемых сообщений, определяется совокупностью их существенных свойств, в том числе синтаксисом (содержанием) и семантикой (смыслом).

Ценность (полезность) информации принято, как известно, оценивать по тому эффекту, который она оказывает на результат управления (степень достижения целевого эффекта). Определение ценности информации процесс, во многом субъективный, и нередко ЛПР не располагает объективными критериями ее оценивания. В частности, в концепции А. А. Харкевича (см. параграф 3.3) ценность используемой в процессе управления информации определяется приращением вероятности достижения цели:

$$Iq = \log P_1 - \log P_0 = \log (P_1 / P_0), \quad (11.5)$$

где P_0 — априорная вероятность достижения цели, P_1 — апостериорная вероятность достижения цели.

При этом, как известно, возможны три ситуации ($P_1 > P_0$; $P_1 < P_0$ и $P_1 = P_0$).

Следует отметить, что такой критерий ценности информации был сформулирован А. А. Харкевичем еще в 1960 году, когда считалось, что любое сообщение содержит исключительно информацию. Поэтому даже в современной литературе при интерпретации возникающих ситуаций нередко встречаются противоречивые дефиниции типа: «такая информация называется дезинфекцией» или «такая информация называется информационным шумом».

Поскольку в общем случае используемое сообщение, наряду с информацией, содержит шумовой и дезинформационный компоненты, представляется целесообразным интерпретировать три вышеуказанных ситуации следующим образом.

Если $P_1 > P_0$, то, следовательно, ЛПР в ходе интерпретации полученного сообщения извлек из него ценную (полезную) информацию, использование которой (по назначению) позволило в данном цикле управления приблизить ОУ к цели ($\Delta P > 0$).

Если $P_1 < P_0$, то, следовательно, ЛПР в данном цикле управления использовал дезинформацию, принесенную недостоверной составляющей сообщения, и, как следствие, вероятность достижения ОУ цели уменьшилась ($\Delta P < 0$).

Если $P_1 = P_0$, то $\Delta P = 0$, следовательно, использованное ЛПР для перевода ОУ в очередное состояние сообщение несло информационный шум и, как следствие, вероятность достижения цели не изменилась.

Принято считать, что в последнем случае (при $P_1 = P_0$) ситуация не меняется, поскольку вероятность достижения цели остается неизменной. Однако рассмотрение процесса управления с позиции теории эффективности показывает, что использование ЛПР сообщения, несущего информационный шум и не меняющего вероятность достижения цели в определенном цикле управления, ухудшает показатель оперативности управления Y_o . Затраты времени на выполнение бесполезного управляемого воздействия и на оценивание его результата может послужить еще и причиной потерь от упущеных возможностей. Кроме того, в каждом цикле управления неизбежна затрата ресурсов управления, что, естественно, сказывается на показателе ресурсоемкости Y_p процесса управления.

Следовательно, использование информационного шума, несомого тривиальными, несвоевременными и неактуальными сообщениями для формирования управляющих воздействий, отнюдь не безобидно и гарантированно снижает эффективность управления в целом. В сравнении с информационным шумом, влияние дезинформации носит еще более пагубный характер, отражаясь и на оперативности, и на ресурсоемкости, и на результативности, что существенно снижает эффективность управления вплоть до ухода ОУ с траектории, ведущей к цели.

Таким образом, представляется целесообразным ввести понятие **ценности сообщения**, имея в виду, что именно его информационный компонент составляет ценность для принятия решений, а дезинформация и информационный шум порождают риск принятия неадекватного (неоптимального) решения и связанный с ним ущерб, обусловленный ухудшением показателей эффективности управления. Отметим, что риск такого рода принято называть информационным риском или риском сообщения.

11.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ МИНИМУМА ЭВРИСТИК

Привлечем для оценивания качества решений и эффективности управления концепцию принципа необходимого разнообразия Эшиби (см. гл. 4). Будем считать максимальной энтропией ОУ и обозначим $H_{\text{одных}}$ степень исходной неопределенности для ЛПР УС относительно

ожидаемого состояния ОУ в очередном цикле управления. Будем считать максимальной энтропией УС и обозначим $H_{y_{\text{max}}}$ степень исходной неопределенности ЛПР УС относительно предстоящего решения о выборе управляющего воздействия после получения сообщения из УС.

Представим множество возможных состояний ОУ в виде кортежа

$$S = \langle s_1, s_2, \dots, s_n \rangle \quad (11.6)$$

и множество возможных решений в виде кортежа

$$R = \langle r_1, r_2, \dots, r_n \rangle. \quad (11.7)$$

Тогда показатель качества (полезности) i -го решения k_i будет определяться степенью его соответствия j -му состоянию ОУ, т.е. k_i — полезность (качество) i -го решения для j -го состояния ОУ.

Качество всех решений можно будет характеризовать матрицей полезности K_S , где

$$K_S = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix} \quad (11.8)$$

Критерием качества решения при этом может служить степень его пригодности для использования по назначению — для перевода ОУ в требуемое состояние в данном цикле управления. Факт перехода ОУ в точности в требуемое состояние будет свидетельствовать о выборе оптимального решения. Однако на практике, как правило, можно вести речь лишь о той или иной степени близости решения к его оптимальному значению.

Обозначим $H_{y_{\text{rest}}}$ степень остаточной неопределенности для ЛПР УС относительно состояния ОУ после получения соответствующего сообщения из УС. Обозначим также $H_{y_{\text{rest}}}$ степень остаточной неопределенности для ЛПР УС, обусловленную неполным соответствием полученного сообщения реальному состоянию УС. Тогда:

$$H_{y_{\text{rest}}} = H_{y_{\text{max}}} - (H_{y_{\text{rest}}} - H_{y_{\text{rest}}}) = H_{y_{\text{rest}}} - \Delta I, \quad (11.9)$$

где ΔI — информационный компонент (достоверные сведения) сообщения, принятого ЛПР УС из ОУ.

Таким образом, остаточная неопределенность ситуации принятия решения для ЛПР УС будет детерминирована величиной $H_{\text{остат}}$.

Если принять, что управляющее воздействие полностью определяется принятым решением, то $H_{\text{остат}}$ можно рассматривать как степень несоответствия качества решения реальному состоянию ОУ. Отметим, что величина $H_{\text{остат}}$ обусловлена множеством управляющих воздействий, которым априори располагает ЛПР УС, т.е. его ресурсом управления. Эта неопределенность, как правило, полностью снимается при поступлении в ОУ очередного управляющего воздействия.

Наиболее важную роль с точки зрения принятия ЛПР УС оптимального решения в каждом цикле управления играет степень соответствия сообщения, получаемого от ЛПР ОУ, его текущему состоянию, т.е. необходимым условием для принятия ЛПР УС оптимального решения является равенство $H_{\text{остат}} = 0$. Однако выполнение этого условия лимитируется не только остаточной неопределенностью сообщения из ОУ, но и ограниченным промежутком времени, которым ЛПР УС располагает для принятия решения. В частности, это относится к задачам принятия решений (выбора стратегий) в условиях статистической неопределенности (см. гл. 8).

Таким образом, мы приходим к известному критерию минимума эвристик (см. параграф 10.2), который связывает качество решений с долей эвристических (интуитивных) процедур, использованных ЛПР в процессе выбора решения:

$$\exists R \in M_{\text{реш}} : H_{\text{остат}} = \min H_{\text{ср}} \text{ при } T_{\text{реш}} \leq T_{\text{доп}}, \quad (11.10)$$

где $H_{\text{ср}}$ — остаточная неопределенность сообщения, обусловленная вынужденным применением ЛПР эвристических процедур, $T_{\text{доп}}$ — допустимый промежуток времени для принятия решения.

Отсюда можно сделать вывод о том, что среди критериев, на основе которых ЛПР выбирает оптимальное решение, наиболее существенными выглядят критерий ценности сообщений и критерий минимума эвристик.

В современных условиях проблема обеспечения эффективности экономики, науки и производства становится, пожалуй, наиболее актуальной для человечества, вступающего в эпоху информационного общества на фоне нарастающих экологических, социальных и политических проблем. Поэтому использование некорректных, а порой и произвольных трактовок ключевых понятий теории эффективности становится категорически недопустимым.

Управление сколько-нибудь значимыми процессами в современном обществе может осуществляться только качественно подготовленными профессионалами.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Какие компоненты могут присутствовать в структуре сообщения, которое ЛПР предполагает использовать по назначению?
2. Какой компонент сообщения позволяет повысить вероятность достижения цели?
3. Какие компоненты сообщения не позволят повысить вероятность достижения цели?
4. Сформулируйте критерий ценности информации и прокомментируйте возможные последствия применения сообщения по назначению.
5. Каковы источники остаточной неопределенности сообщения?
6. Какие мыслительные процедуры, выполняемые ЛПР, могут создать риск выбора неоптимального решения?
7. Дайте определение эвристической процедуры.
8. В чем состоит критерий минимума эвристик?
9. Как связан выбор эвристического решения с допустимым промежутком времени на принятие решения?
10. Почему использование ЛПР информационного шума, не меняя вероятности достижения цели, приводит к уменьшению эффективности управления?

ГЛАВА 12

ОБЩАЯ ЗАДАЧА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ И ФЕНОМЕН НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

12.1. ПРОБЛЕМАТИКА ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Процессы формирования информационного общества, базирующегося на экономике знаний, с необходимостью требуют разработки инновационных стратегий управления сложными и очень сложными организационными и организационно-техническими системами. В этих условиях существенно возрастает и сложность задач, выполняемых ЛПР, поскольку обстановка меняется качественно и во все более высоком темпе, а это все более ограничивает лимит времени, отпущенный на выбор оптимальных решений. В то же время последствия принятых решений оказываются не всегда предсказуемыми.

В рамках системного подхода, как уже отмечалось, любой объект, явление или процесс целесообразно рассматривать как сложную систему, движущуюся к заранее поставленной или объективно существующей цели. Это в полной мере относится к задачам принятия решений по управлению сложными системами, направленному на достижение определенной цели, а именно перевода объекта управления (ОУ) в заданное конечное состояние. При этом на каждом шаге движения к цели т.е. в каждом цикле управления ЛПР выбирает в условиях ограниченного времени решение о переводе ОУ в новое состояние, соответствующее заданному целенаправленному характеру его поведения (см. приложение ниже).

Моделирование процесса управления как сложной системы последовательных событий с необходимостью требует принимать во внимание особенности сложных систем, в частности неизбежное присутствие в них неоднородных (векторных) связей. Собственно, наличие неоднородных (векторных) связей является, наряду с эмерджентностью и робастностью, отличительным признаком сложной системы и ее неотъемлемым свойством.

Влияние неоднородных связей на принимаемые решения по выбору оптимальной альтернативы состоит в том, что улучшение одних характеристик системы неизбежно сопровождается ухудшением других. Иными словами, при анализе сложной системы обнаруживаются определенные пары существенных характеристик, для которых оказывается невозможным их одновременное улучшение.

Это обстоятельство накладывает серьезные ограничения на процессы моделирования сложных систем, в частности, отсюда вытекает принцип компромисса между точностью и сложностью синтезируемой модели. Этот принцип отражает тот факт, что стремление построить точную модель посредством учета как можно большего количества свойств прототипа приводит к неограниченному нарастанию ее сложности. В полной мере с наличием неоднородных связей в системе связана известная проблема корректности критерия превосходства.

Возрастание сложности модели неотъемлемо связано с нарастанием степени неопределенности ситуации принятия решения. Универсальное множество альтернатив в условиях неопределенности принимается как однозначно не определенное т.е. может пополняться и видоизменяться в процессе выбора. Кроме того, принцип выбора оптимальной альтернативы также остается не формализованным.

Очевидно, что в случае, если оптимальную альтернативу не удалось априори включить в универсальное множество, то никакими приемами ее там выявить не удается, и процесс пополнения универсального множества может продолжаться длительное время. Собственно говоря, это характерно для эволюции науки, когда от возникновения познавательной проблемы до генерации хотя бы удовлетворительной гипотезы проходят годы и десятилетия.

Универсальное множество альтернатив по определению может пополняться и видоизменяться с целью включения в него объективно оптимальной альтернативы. ЛПР выступает при этом в качестве так называемого «рационального оптимизатора», рассматривающего все возможные гипотезы и готового ограничиться эвристическим принципом разумной достаточности, т.е. остановиться на первом варианте, удовлетворяющем или превосходящем ожидания.

В связи с феноменом неопределенности обратим внимание на следующее обстоятельство. Характеризуя наиболее высокую степень неопределенности на начальном этапе решения познавательной (исследовательской) проблемы, можно утверждать, что модель ситуации у нас отсутствует, т.е. об объекте исследования ничего не известно. Однако это эквивалентно противоположному утверждению о необходимости принятия к рассмотрению априори неограниченного множества альтернативных моделей.

12.2. ПОСТАНОВКА ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим процесс управления, в ходе которого ЛПР на основе сведений о текущем состоянии объекта управления (ОУ) и обстановки (окружающей среды) принимает в каждом цикле управления решение о выборе управляющего воздействия и его адекватного доведения до ОУ посредством передачи соответствующего сообщения. Формально модель такой задачи принятия решения можно представить в виде кортежа (см. выражение 11.3):

$$S_{\text{зр}} = \langle F_u, S_{\text{акс}}, M_{\text{сн}}, A_{\text{пзв}}, R, K \rangle, \quad (12.1)$$

где $S_{\text{зр}}$ — символическое обозначение задачи принятия решения, F_u — цель принятия решения, $T_{\text{дл}}$ — допустимый промежуток времени на принятие решения, $S_{\text{акс}}$ — исходные сведения для порождения альтернативных вариантов решения (данные относительно состояний ОУ и обстановки), $A_{\text{пзв}}$ — множество порожденных ЛПР альтернатив решения относительно применения к ОУ конкретного управляющего воздействия, R — выбранное решение, K — критерий (правило, на основе которого ЛПР выбирает оптимальное с его точки зрения решение).

Следует отметить, что в литературе, как правило, непосредственно вводится в рассмотрение множество альтернативных вариантов решения, предъявляемое для выбора, однако по существу каждый из них ориентирован на одну из множества моделей, генерируемых ЛПР для описания ситуации принятия решения. Поэтому представляется целесообразным дополнить кортеж (12.1) существенным элементом $M_{\text{сн}}$ — множеством альтернативных моделей, отображающих ситуацию принятия решения. Задача ЛПР в каждом цикле управления как раз и состоит в преобразовании синтезированной им модели ситуации в очередное управление решение.

Сопоставим компоненты кортежа (12.1) с известными аксиомами теории управления (см. параграф 4.2), постулирующими наличие *цели управления, наблюдаемости и управляемости ОУ, ресурсов управления, свободы выбора решения и критерия эффективности управления*.

В зависимости от конкретной ситуации возникает относительно широкий спектр частных задач принятия решения. В частности, ОУ может представлять собой техническую либо организационную систему, он может быть изолирован от окружающей среды либо находиться под ее воздействием, это воздействие может быть контролируемым или неконтролируемым со стороны ЛПР, ОУ может функционировать, развиваться и эволюционировать в условиях определенности, риска или неопределенности, допустимое время на принятие решения может изменяться в широких пределах в зависимости от выполняемой функции управления (оперативное управление, планирование либо прогнозирование) и т.д.

12.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Целью принятия решения может быть: перевод ОУ в заданную точку траектории в реальном или фазовом пространстве, его удержание на траектории, целенаправленное изменение структуры и (или) поведения ОУ, его адаптация к условиям обстановки и др. Общее требование к процессу целеполагания состоит в том, что цель принятия решения должна быть определена предельно четко и конкретно. Очевидно, что расплывчатая, неопределенная дефиниция цели безусловным образом приводит к снижению эффективности управления.

Однако указанное требование носит общий, декларативный характер, и в каждом конкретном случае может быть выполнено с той или иной степенью соответствия желаемому. Действительно, цель, как модель будущего состояния ОУ и обстановки принято определять, как ситуацию или область ситуаций, которая должна быть достигнута к определенному моменту времени в результате выполнения процесса управления. Однако в силу фундаментальной неупорядоченности природы (окружающей среды) условия движения к цели, как правило, оказываются не полностью определенными. Достижение же в точности заданной ситуации (цели) возможно только в условиях полной определенности, когда процесс управления можно уверенно считать детерминированным на макроскопическом уровне.

Это означает, что в реальной практике управления выполняемая ЛПР процедура целеполагания должна априори предусматривать не полную определенность условий движения к цели и возникающие при этом риски.

При этом в случае качественной цели, для которой зафиксированы конкретный целевой эффект и оптимальный промежуток времени для его достижения, необходимо учитывать еще и ресурсные ограничения. В случае же количественной цели ЛПР, задавая численные характеристики целевого эффекта, в том числе, требуемую эффективность процесса управления, ориентируется на выполнение критерия оптимальности, однако допускает возможность ограничиться удовлетворением критерия пригодности (см. параграф 7.2).

Конкретно же в условиях возникающего при неполной определенности риска ЛПР будет выбирать стратегию, сопоставляя синтезированную им модель исходной ситуации с моделью, отражающую его видение целевой ситуации. Возникает характерная задача «игры с природой», в которой ЛПР перебирает широкий спектр критериев оптимальности в соответствии со своей системой предпочтений и отношением к риску.

12.4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАБЛЮДАЕМОСТИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В общем случае исходные данные для порождения альтернатив складываются из двух составляющих: данные относительно текущего состояния ОУ и данные относительно состояния обстановки. В совокупности они характеризуют *ситуацию принятия решения* в каждом цикле управления. Следовательно, исходные данные можно записать как кортеж — двойку:

$$S_{\text{иск}} = \langle S_{\text{об}}, S_{\text{об}} \rangle, \quad (12.2)$$

где $S_{\text{об}}$ и $S_{\text{об}}$ — данные о состоянии ОУ и обстановки соответственно к моменту принятия очередного решения.

Полнота и точность этих данных отражают степень *наблюдаемости* ОУ.

Поскольку ОУ «отрабатывает» как управляемые воздействия ЛПР, так и неуправляемые воздействия окружающей среды, его внутреннее состояние в очередном цикле управления будет функцией этих воздействий. Обозначим X — множество управляемых воздействий и N — множество неуправляемых воздействий. В совокупности они образуют множество управляющих (входных) воздействий $X^* = \langle X, N \rangle$. В общем случае множество управляющих воздействий порождает в каждом цикле управления ОУ множество его внутренних состояний Z , которое, в свою очередь, порождает множество выходных сигналов Y . По тем или иным причинам для ЛПР наблюдаемым оказывается некоторое подмножество Y^* выходных сигналов, поскольку некоторые выходные сигналы для ЛПР могут оказаться не наблюдаемыми, а некоторые из них ЛПР может при анализе счесть несущественными и исключить из рассмотрения.

Модель, отображающая поведение ОУ как системы, может быть представлена кортежем из шести объектов (см. параграф 2.3):

$$S_x = \langle x, n, y, z, f, g \rangle, \quad (12.3)$$

где $x = x(t)$ — управляемый входной сигнал как конечное множество функций времени; $n = n(t)$ — неуправляемый входной сигнал (внешнее воздействие) как конечное множество функций времени;

$y = y(t)$ — выходной сигнал как конечное множество функций времени;

$z = z(t)$ — переменная внутреннего состояния — множество функций, определяющих значения выходных сигналов $y(t)$;

f и g — функционалы, задающие текущие значения выходных характеристик и внутреннего состояния ОУ.

С помощью этих функционалов записываются в инвариантной форме уравнение наблюдения и уравнение состояния объекта управления соответственно:

$$y(t) = g(x(t), u(t), z(t)); \quad (12.4)$$

$$z(t) = f(z(t_0), x(\tau)); \tau = [t_0, t], \quad (12.5)$$

где $z(t_0)$ — начальное состояние ОУ, а $[t_0, t]$ означает весь интервал времени, прошедший от момента начала управления к моменту принятия очередного решения.

Состояние ОУ в каждый момент времени характеризуется множеством переменных z , меняющихся вследствие внутренних возмущений (флуктуаций), управляемых и неуправляемых воздействий. При этом переменные состояния $z(t)$ в общем случае могут быть неизвестны, и судить об их физической природе и величине оказывается затруднительным. Выходные же переменные $y(t)$ являются конкретными физическими величинами, они, как правило, наблюдаются и измеряются. Поэтому определение состояния ОУ в каждом цикле управления в большинстве случаев оказывается осуществимым именно в пространстве выходных переменных.

Формально определение произвольного внутреннего состояния ОУ возможно только в том случае, если в результате измерения выходных переменных $y(t)$ при известных значениях управляемых входных переменных $x(t)$ может быть получена достоверная оценка любого внутреннего состояния $z(t)$.

Таким образом, необходимое и достаточное условие полной наблюдаемости ОУ состоит в том, что каждый элемент $y(t)$ при фиксированных значениях t и $x(t)$ имеет в качестве прообраза единственный элемент $z(t)$. Это означает, что каждому состоянию ОУ должно соответствовать одно и только одно значение выходной переменной. Следовательно, должно существовать отображение, обратное уравнению наблюдения (12.4), которое позволяет воспроизводить внутренние состояния объекта управления по наблюдаемым выходным характеристикам, порождаемым этими внутренними состояниями:

$$g^{-1}: y(t) \rightarrow z(t). \quad (12.6)$$

Благодаря наличию такого обратного преобразования выходные переменные могут быть использованы в качестве характеристики наблюдаемого текущего состояния объекта управления. Иными словами, при полной наблюдаемости объекта управления всегда имеется возможность определения внутреннего состояния ОУ по результатам измерения его

выходных характеристик. В этом и состоит решение обратной задачи управления.

На практике весьма важным для обеспечения полной наблюдаемости ОУ является определение необходимого и достаточного набора элементов (контрольных точек), в которых производится измерение существенных выходных характеристик. В технических системах функция контроля, включающая операции наблюдения, классификации и идентификации состояний ОУ, обеспечивается соответствующими измерительными приборами и устройствами. В организационных системах ответственность за достоверность, полноту и точность данных о состоянии системы с управлением лежит на ЛПР объекта управления.

В случае, если ОУ изолирован от воздействий среды, задача ЛПР существенно упрощается. Действительно в этом случае ЛПР, в принципе, известны структура и поведение ОУ, т.е. закон его функционирования:

$$y(t) = g(x(t), z(t)). \quad (12.7)$$

Если при этом решена обратная задача управления, и ОУ можно считать полностью наблюдаемым, то ЛПР известен также алгоритм (механизм) функционирования ОУ, т.е. способ обеспечения наблюдаемого закона функционирования. Это означает, что ЛПР владеет уже не только *данными*, но и *знанием* закономерности функционирования (поведения) ОУ, позволяющим обеспечить высокую вероятность выбора оптимальных решений в каждом цикле управления вплоть до достижения цели.

При этом поведение ОУ можно считать детерминированным с точностью до его внутренних флуктуаций и рассматривать задачу управления ОУ в условиях *определенности*.

В общем случае, когда влиянием обстановки на состояние ОУ пренебречь невозможно, а также, когда объектом управления является сложная организационная или организационно-техническая система, ОУ нельзя считать полностью наблюдаемым, и задача управления переходит в условия *riska*.

12.5. РИСК КАК ХАРАКТЕРИСТИКА СИТУАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Как видим, решение задачи наблюдаемости ОУ непосредственным образом зависит от того, в каких условиях (определенности, риска или неопределенности) ЛПР будет искать оптимальное решение в каждом цикле управления. Поэтому в общем случае кортеж (12.1) следует дополнить компонентом, характеризующим риск N , порождаемый реализацией выбранного решения и неопределенным состоянием самого ОУ и обстановки.

Тогда:

$$S_{\text{сп}} = \langle F_{\text{р}}, S_{\text{свт}}, M_{\text{свт}}, N, A_{\text{пew}}, R_i, K \rangle, \quad (12.8)$$

При этом интегральный риск можно рассматривать как кортеж из четырех компонентов:

$$N = \langle N_{\text{пew}}, N_{\text{свт}}, N_{\text{акт}}, N_{\text{пр}} \rangle, \quad (12.9)$$

где $N_{\text{пew}}$ — риск решения, который введен как характеристику ситуации принятия решения, определяющую вероятность и величину возможных потерь (ущерба) вследствие реализации выбранного решения;

$N_{\text{свт}}$ — риск, обусловленный статистической неопределенностью обстановки (природы), который можно рассматривать как независимый от принятого решения;

$N_{\text{акт}}$ — риск, порождаемый сознательным активным противодействием со стороны других ЛПР и косвенно связанный с решениями, принятьими в предыдущих шагах управления;

$N_{\text{пр}}$ — риск упущеных благоприятных возможностей.

Очевидно, что риск решения $N_{\text{пew}}$ обусловлен главным образом неполной наблюдаемостью ОУ и обстановки, т.е. неполным соответствием данных, которыми располагает ЛПР относительно состояния ситуации принятия решения, его реальному состоянию. При этом риск решения может полностью или частично представлять собой риск потерь от упущенных благоприятных возможностей.

Для каждого из компонентов кортежа (12.9), как, впрочем, и для интегрального риска можно составить кортеж — двойку:

$$N_i = \langle P_i, M_i \rangle, \quad (12.10)$$

где P_i — вероятность наступления рисковых событий, M_i — масштаб негативных последствий.

Как следует из практики управления риском, масштаб негативных последствий наступления рискового события оказывается тем выше, чем меньше его вероятность, т.е. можно считать, что $P_i M_i = \text{const}$.

Для определенного класса ситуаций принятия решения интегральный риск может быть сведен к значению вероятности не достижения цели P^* при заданном промежутке времени и имеющихся ресурсах. Тогда вероятность достижения цели при тех же начальных условиях $P_{\text{дк}} = 1 - P^*$.

Очевидно, что риск тем выше, чем больше неопределенность состояния обстановки. Для уменьшения степени риска ЛПР стремится получить за ограниченный промежуток времени как можно больше информации, т.е. достоверных сведений о состоянии обстановки и при

этом исключить использование для принятия решения ложной информации и информационного шума. Для этого, естественно, необходимы ресурсы.

12.6. ПРОБЛЕМА НАЛИЧИЯ РЕСУРСОВ УПРАВЛЕНИЯ

С точки зрения оценивания экономической эффективности управления кортеж (12.8) следует дополнить компонентом, характеризующим ресурсы, которыми располагает ЛПР для поиска решения и, в конечном итоге, для достижения цели

В качестве отдельного самостоятельного ресурса выступает время, которым располагает ЛПР для принятия решения. Естественно, чем больше времени отпущено на принятие решения, тем большие шансов, что будет найдено наиболее удачное, т.е. оптимальное решение. При этом неизбежно возникает оптимизационная задача, в которой целевой характеристикой является качество решения, т.е. степень его соответствия реальному состоянию ОУ и обстановки, а лимит времени играет роль ограничения.

Время, которым располагает ЛПР на принятие решения T_{dec} , характеризует оперативность управления и выделяется в самостоятельный ресурс, поскольку, в силу неоднородной (векторной) связи между оперативностью и ресурсоемкостью, оптимизация соотношения время/ресурсы представляет собой непременную задачу обеспечения эффективности процесса управления в зависимости от целей и предпочтений ЛПР.

Очевидно, что значение T_{dec} существенным образом зависит от выполняемой ЛПР функциональной задачи управления. Задача оперативного управления, как правило, выполняется в реальном времени, когда решение должно приниматься незамедлительно с изменением обстановки.

Задача планирования, имеющая целью снятие неопределенности относительно структуры и поведения ОУ, а также состояния обстановки, возникает при существенных изменениях условий функционирования ОУ, препятствующих продолжению оперативного управления. Как функцию управления, планирование принято делить на тактическое и стратегическое. Поэтому значение T_{dec} при выполнении планирования может находиться в широких пределах, оставляя, тем не менее ЛПР возможность обстоятельный анализа ситуации принятия решения.

Функция прогнозирования имеет целью получение научно обоснованного суждения о возможных состояниях ОУ и обстановки в достаточно отдаленном будущем, а также об альтернативных вариантах и сроках достижения предполагаемого целевого состояния. Очевидно, что ценность достоверного прогноза, как и цена ошибочного, чрезвычайно велика. Поэтому для получения важных прогнозов нередко

используются такие особо трудоемкие и дорогостоящие процедуры коллективной экспертизы, как метод Дельфи.

Остальные ресурсы P_{rec} , необходимые для принятия решения, часто рассматриваются в интегральном виде. В случае необходимости производится декомпозиция ресурсов на отдельные составляющие: материальные, финансовые, человеческие (трудовые), интеллектуальные, информационные, расчетные, вычислительные и др.

В принципе, ресурсы P_{rec} необходимы как для обеспечения функционирования ОУ, мотивации и стимулирования персонала организационных систем (материальные, технические, финансовые административные), так и для получения извне дополнительной информации об обстановке, в том числе, для управления рисками, в частности, для предотвращения рисковых событий или снижения ущерба от их наступления.

$$S_{rec} = \langle F_{ref}, T_{dec}, P_{rec}, N_{rec}, S_{rec}, M_{rec}, A_{rec}, R, K \rangle. \quad (12.11)$$

Экономический смысл принятия и продвижения инновационных решений заключается в снижении рисков неудачи при выходе на рынок, что отражается известной формулой: произведение величин инвестиций и риска есть величина постоянная:

$$P_{rec} N_{rec} = \text{const}. \quad (12.12)$$

Затраты ресурсов при этом можно рассматривать как плату за увеличение шансов на успешный результат (увеличение вероятности достижения цели).

Следует отметить, что в условиях инновационной экономики в качестве ресурсов рассматриваются в первую очередь интеллектуальные ресурсы (знания ЛПР) вкупе с вычислительными ресурсами информационных систем поддержки принятия решений (СППР) и лишь во вторую — финансовые ресурсы, которые могут быть направлены, в частности, для оплаты работы эксперта (коллегии экспертов) или команды системного аналитика.

В конечном итоге качество сведений, используемых ЛПР для принятия решения (в первую очередь, их достоверность, полнота и точность) определяет ценность сообщения, выражавшего суть принятого решения, с точки зрения его использования по назначению, т.е. для реализации управляющего воздействия по переводу ОУ в очередное требуемое состояние.

12.7. ПРОБЛЕМА СВОБОДЫ ВЫБОРА РЕШЕНИЯ

Одна из базовых аксиом теории управления определяет обязательную необходимость наличия у ЛПР свободы выбора решения (управляющего воздействия) на множестве допустимых альтернатив. Обычно рассматривается два аспекта проблемы. Прежде всего утверждается, что чем меньше это множество, тем ниже эффективность управления, поскольку в условиях действия ограничений оптимальные альтернативы (решения) часто оказываются за пределами области адекватности. С другой стороны, подчеркивается, что отсутствие (или исчерпание) ресурсов управления эквивалентно отсутствию свободы выбора решения.

Однако, если учитывать имеющийся у ЛПР ограниченный ресурс времени, возникает определенное противоречие. С одной стороны, действительно, целесообразно расширять генеральное множество альтернатив, повышая тем самым вероятность включения в него объективно оптимальной альтернативы. Однако с другой стороны, необходимо обеспечить условие $T_{\text{реш}} \leq T_{\text{дл}}$, т.е. принять решение и довести его до ОУ до исчерпания отведенного ресурса времени. В частности, в условиях оперативного управления, как уже отмечалось, этот ресурс крайне ограничен. В условиях выполнения функций планирования и прогнозирования он тоже не безграничен.

Следовательно, мы возвращаемся к оптимизационной задаче, решая которую ЛПР стремится всемерно пополнить генеральное множество альтернатив, а лимит времени вынуждает его это множество ограничивать. Впрочем, возможны ситуации, когда ЛПР предпочтет предельно сократить промежуток времени на формирование множества альтернатив, а снижение вероятности выявления оптимальной альтернативы будет его в этом стремлении ограничивать.

Следует обратить внимание на еще один немаловажный аспект этой проблемы. Дело в том, что в условиях риска и неопределенности свобода выбора решения для ЛПР оказывается теснейшим образом связана с его отношением к риску. Выбор критерия K — см. кортеж (12.11) определяется, таким образом, индивидуальной системой предпочтений конкретного ЛПР. Кроме того, при выборе критерия ЛПР учитывает цель и значимость выполняемой операции, имея в виду, что в одних ситуациях необходим гарантированный результат, а в других — допустим определенный риск.

В частности, практика принятия решений в условиях статистической неопределенности базируется на возможности выбора критериев оптимальности в широком интервале отношений оптимизм-пессимизм. При этом свобода выбора решения на множестве альтернатив, как правило,

сводится к свободе выбора того или иного критерия оптимальности, в частности, критерия Гурвица.

Из практического опыта поиска информации для принятия решений в условиях неполной определенности следует, что выявление и накопление необходимых (актуальных) данных происходит, как правило, с экспоненциальным замедлением. Поэтому в силу наличия лимита времени во многих случаях решение приходится принимать задолго до перевода задачи в условия определенности. Как следствие, ЛПР оказывается вынужденным к моменту принятия решения (выбора стратегии) использовать, наряду с детерминированными сведениями, вероятностные оценки и интуитивные соображения. Естественным образом возникает задача оценивания (измерения) качества решений и связанной с ним эффективности процесса управления.

12.8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Под управляемостью ОУ принято понимать его способность передвигаться в пространстве состояний под действием управляющих воздействий из любого текущего состояния в требуемое для данного цикла управления состояние. Тем самым предполагается, что в отношении ресурсов управления ЛПР должен выполняться принцип необходимого разнообразия Эшби (см. параграф 4.4) в том смысле, что ЛПР не должен допустить потери управляемости вследствие отсутствия в той или иной ситуации необходимого управляющего воздействия.

При этом имеется в виду не только возможность рационального изменения существенных параметров функционирования ОУ для его удержания на траектории, ведущей к цели в условиях дестабилизирующих внутренних и внешних случайных событий (задача слежения). В процессе достижения цели, особенно в условиях неполной определенности может потребоваться изменение структуры и поведения ОУ, механизма и алгоритмов его функционирования, развития и эволюции.

Один из важных аспектов проблемы управляемости связан с управлением сложными организационными и организационно-техническими системами, обладающими разветвленной иерархией. В таких системах управляемость ОУ различных уровней иерархии в значительной степени связана с решениями оперативного характера, принимаемыми на нижних уровнях иерархии при выполнении стратегических и тактических решений, поступающих с верхних уровней. Поэтому на первый план выдвигаются такие функции управления, как организация и координа-

ция, а также функции управления, связанные с учетом человеческого фактора, в частности, мотивация и стимулирование персонала.

При этом возникает проблема определения ценности информации, точнее сообщений, которыми обмениваются субъекты информационных процессов. Для ЛПР верхних уровней иерархии критически важно использовать для принятия решений достоверные сведения (ценную информацию), отсеивая компоненты сообщений, несущие информационный шум и дезинформацию. В противном случае возникает положительная (усиливающая) обратная связь, приводящая к нарастанию степени несоответствия принимаемых решений реальному состоянию обстановки.

Выбор решений, связанных с реализацией таких управленческих функций, особенно в случаях, требующих оперативного решения, заставляет ЛПР применять эвристические процедуры, что и приводит к снижению вероятности нахождения оптимального решения.

12.9. МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ УПРАВЛЕНИЯ

В рамках рассмотрения этой проблемы принимаются следующие определения ключевых понятий теории эффективности (см. параграф 6.1)

Качество системы — совокупность ее существенных свойств, определяющая степень ее *пригодности* для использования по *назначению*.

Эффективность процесса, выполняемого системой — ее комплексное операционное свойство, определяющее степень ее *приспособленности* к достижению цели.

Отметим еще раз, что понятие процесса как упорядоченного множества событий подпадает под понятие системы как упорядоченного множества элементов.

Анализ принятых определений показывает, что качество и эффективность системы отнюдь не являются эквивалентными понятиями. Качество, как множество существенных свойств системы, представляет собой априорное условие обеспечения ее эффективности при условии использования ее по назначению. Некачественная система не может быть эффективной. Качественная система окажется незэффективной в случае ее использования не по назначению.

Отметим, что в случае, когда, пусть даже тщательно продуманное, решение реализуется по истечении допустимого промежутка времени, оно окажется неоптимальным именно по причине использования не по назначению — применительно к изменившейся ситуации.

Очевидно, что постановка задачи оценивания эффективности ОУ требует дополнить кортеж (12.11) критерием эффективности достижения цели, который обозначим \bar{K} . Тогда:

$$S_{mp} = \langle F_u, T_{des}, P_{per}, N_{per}, S_{act}, M_{con}, A_{per}, R, K, \bar{K} \rangle. \quad (12.13)$$

Эффективность системы является операционной характеристикой ее функционирования, и ее обобщенный показатель интегрирует три частных показателя: результативность Y_{per} , оперативность Y_{on} и ресурсоемкость Y_{per} :

$$Y_{eff} = \langle Y_{per}, Y_{on}, Y_{per} \rangle. \quad (12.14)$$

В силу указанных различий между понятиями качества и эффективности целесообразно относить характеристику качества к принятому решению с учетом совокупности его существенных свойств, а характеристику эффективности — к завершенному процессу управления при условии достижения цели.

Качество решения, определяется величиной (количеством) снимаемой неопределенности (энтропии) относительно ситуации принятия решения. При этом оно существенно зависит от таких частных характеристик исходных данных, как актуальность, своевременность, полнота, избыточность, точность, готовность к применению по назначению и др.

Предварительная оценка качества (потенциальной эффективности) управленческого решения может быть сформирована на стадии его принятия, однако реальный результат принятия решения, как правило, может быть измерен только после выполнения операции контроля достигнутого состояния ОУ, в которое он был переведен соответствующим управляющим воздействием. Окончательно качество совокупности решений можно определить только по результатам оценивания (изменения) эффективности завершенного процесса управления.

Естественным критерием достижения цели управления является сам факт приведения ОУ в состояние, определенное при целеполагании как конечное (целевое). В случае количественной цели критерием ее достижения может служить достижение области допустимых значений в пространстве состояний ОУ.

Оценивание качества решений и эффективности управления требует наличия соответствующих критериев. В условиях определенности традиционно используются хорошо известные критерии пригодности, оптимальности и превосходства — в предположении о детерминированном характере ситуации и выполняемых процессов.

В случае вероятностных операций, т.е. в условиях риска процедуры оценивания эффективности основаны на использовании понятия вероятности достижения цели. При этом операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по обобщенному показателю эффективности равна вероятности достижения цели с оптимальным значением этого показателя (см. параграф 7.3):

$$P_{\text{дл}}(Y_{\text{эфф}}) = P_{\text{дл}}(Y_{\text{эффопт}}). \quad (12.15)$$

В условиях полной определенности ЛПР, ориентируясь на выполнение критерия оптимальности по обобщенному показателю эффективности, как правило, допускает возможность ограничиться выполнением критерия пригодности, согласно которому операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по обобщенному показателю эффективности окажется не меньше допустимой вероятности достижения цели по этому показателю:

$$P_{\text{дл}}(Y_{\text{эфф}}) \geq P_{\text{дл}}(Y_{\text{эффдопт}}). \quad (12.16)$$

При этом следует иметь в виду, что, в силу существования неоднородной связи между такими частными показателями эффективности, как оперативность и ресурсоемкость, оптимизация по обобщенному показателю эффективности в основном будет направлена на достижение их наилучшего с точки зрения ЛПР соотношения (оптимального компромисса) при непременном условии достижения цели.

В случае качественной цели заданный показатель результативности однозначно определяется как зафиксированный факт достижения цели. Тогда значение $P_{\text{дл}}(Y_{\text{эффопт}})$ определяется оптимальным соотношением достигнутых показателей оперативности и ресурсоемкости в зависимости от того, какой из них определен как целевой, а какой выступает в качестве ограничения.

В случае количественной цели результативность целесообразно оценивать по степени достижения целевого эффекта. При этом естественным образом ЛПР, как правило, априори (на этапе целеполагания), устанавливает минимально допустимую степень достижения цели.

Тем самым задача оценивания эффективности автоматически сводится к ситуации применения критерия пригодности к этому, безусловно приоритетному показателю эффективности. Что же касается показателей оперативности и ресурсоемкости, то, в зависимости от задачи управления, к одному из них тоже автоматически будет применяться критерий

оптимальности при условии, что второй не должен будет выходить за пределы допустимого значения. Тогда условия оптимальности будут выглядеть следующим образом:

$$Y_{\text{эффектив}} = \langle Y_{\text{результат}}, Y_{\text{оценка}}, Y_{\text{ресурс}} \rangle; \quad (12.17)$$

$$Y_{\text{эффектив}} = \langle Y_{\text{результат}}, Y_{\text{оценка}}, Y_{\text{ресурс}} \rangle, \quad (12.18)$$

где $Y_{\text{результат}}, Y_{\text{оценка}}, Y_{\text{ресурс}}$ — показатели соответственно допустимых значений результативности, оперативности и ресурсоемкости, а $Y_{\text{оценка}}, Y_{\text{ресурс}}$ — оптимальных значений ресурсоемкости соответственно.

Совершенно очевидно, что нет никакого смысла оптимизировать обобщенный показатель ожидаемой эффективности по оперативности либо ресурсоемкости в случае, если цель окажется не достигнутой.

Итак, согласно (12.15) вероятностная (не детерминированная) операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по обобщенному показателю эффективности равна вероятности достижения цели с оптимальным значением этого показателя. Однако это требование носит общий характер. На практике же разные ЛПР, реализуя принцип свободы выбора решения, в одной и той же ситуации будут принимать решения о выборе управляющих воздействий в соответствии со своими оценками степени допустимого риска решений в конкретных ситуациях.

Как уже отмечалось, эффективность процесса управления может быть достоверно оценена только после его полного завершения, т.е. достижения целевого эффекта. Однако следствием реализованного решения может оказаться заранее неизвестный побочный эффект, в том числе, «отложенный» на заранее неизвестный промежуток времени. Следовательно, риск решения может быть обусловлен не только вероятностью наступления ожидаемого рискового события, но также и неустранимой неопределенностью относительно возможности, срока проявления и масштаба негативных последствий проявления побочных эффектов, вызванных реализацией решений.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. В чем состоит проблематика общей задачи принятия решения?
2. Как формализуется общая задача принятия решения?
3. Какие аксиомы теории управления определяют постановку общей задачи принятия решения?
4. Перечислите возможные цели принятия решения.

5. С какими ограничениями сталкивается ЛПР при постановке задача принятия решения?
6. Как задача принятия решения связана с проблемой корректности критерия превосходства?
7. Что понимается под наблюдаемостью объекта управления?
8. Как требование наблюдаемости объекта управления связана с обратной задачей управления?
9. Какова природа риска, характеризующего ситуацию принятия решения?
10. Перечислите основные виды риска решения и их происхождение.
11. Как проявляется связь между риском решения и ресурсами, которыми располагает ЛПР для поиска оптимального решения?
12. Почему свобода выбора является существенным условием задачи?
13. Как ЛПР может реализовать свободу выбора решения?
14. В чем состоит основная проблема оценивания эффективности процесса реализации выбранного решения?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение остановимся на важном, обстоятельстве, связанном с феноменом неопределенности. Ситуацию принятия решения в условиях неопределенности обстановки, можно ассоциировать с фундаментальной неупорядоченностью природы, заложенной в нее принципом неопределенности квантовой механики.

Согласно этому принципу у квантовой системы (частицы) отсутствует определенная траектория (когнитагенская интерпретация квантовой механики). Альтернативная трактовка Р.Фейнмана, напротив, предполагает наличие сколь угодно большого количества траекторий, вероятности реализации которых лежат в чрезвычайно широком интервале значений (так называемая сумма по историям).

Подобным же двояким образом можно трактовать ситуацию неопределенности относительно структуры и поведения априори неизвестной наблюдателю (ЛПР) макроскопической системы (объекта познаваемого материального мира). Действительно, познающий субъект может говорить об отсутствии у него какой-либо модели такой системы, но, с другой стороны, это означает, что, в принципе, может быть принято к рассмотрению сколь угодно большое количество альтернативных пробных моделей (гипотез) для описания этой системы.

Развивая эту аналогию, можно утверждать, что что априорная сложность познавательной задачи отражает неопределенность относительно искомого полного и точного описания (моделирования) структуры и поведения исследуемого объекта. Для снятия этой неопределенности необходим некоторый (нередко весьма продолжительный) промежуток времени. Дело в том, что генеральное множество альтернативных гипотез должно, как отмечалось выше, непременно содержать оптимальную (ключевую) гипотезу, которая нередко длительное время находится «за пределами досягаемости». Сошлемся, в частности, на историю открытия и объяснения природы фотозиффекта.

Поэтому можно утверждать, что чем меньше промежуток времени исследования, тем большая остаточная неопределенность для ЛПР, т.е. тем меньшей точностью будет обладать синтезируемая наблюдателем модель исследуемого объекта. Аналогия с одним из основных соотношений неопределенности Гейзенберга (промежуток времени — точность измерения энергии) нам представляется вполне уместной.

Приведенные аналогии *не зависят от природы неопределенности* и могут представлять интерес с точки зрения дальнейшего развития теории и методологии принятия решения в условиях риска и неопределенности. Практика применения системного анализа демонстрирует широкий круг оптимизационных задач, при решении которых принципиально невозможно одновременно улучшать две неоднородно связанные характеристики системы. В этом, в частности, состоит проблема корректности критерия превосходства.

Принцип неопределенности отражает фундаментальное свойство нашей Вселенной, состоящее в том, что события в ней не могут быть предсказаны с абсолютной точностью. Казалось бы, это касается только процессов, происходящих на уровне микромира. Однако мы начинаем понимать, что возможность наблюдения строго детерминированных процессов в масштабах макромира на практике нереализуема, поскольку с течением времени, затрачиваемым на получение максимально полной информации, энтропия окружающей среды неумолимо возрастает.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А. В. Системный анализ: учебник. — М. : Высшая школа, 2004.— 454 с.
2. Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении : учеб. пособие.— М. : Финансы и статистика, 2007.— 368 с.
3. Бережная Е. В., Бережной В. И. Математические методы моделирования экономических систем: учеб. пособие. — М. : Финансы и статистика, 2006.— 432 с.
4. Волкова В. Н., Денисов А. А. Основы теории систем и системного анализа : учебник.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 520 с.
5. Джексонто К., Уилмер Э. Управление знаниями. Руководство по разработке и внедрению корпоративной стратегии управления знаниями : пер. с англ.— М. : Добрая книга, 2005.—192 с.
6. Драгобрыцкий И. Н. Системный анализ в экономике : учеб. пособие.— М. : Финансы и статистика, 2009.— 508 с.
7. Каплан Р., Нортон Д. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию : пер. с англ.— М. : Олимп-Бизнес, 2005.— 320 с.
8. О'Коннор Дж., Макдермотт И. Искусство системного мышления: необходимые знания о системах и творческом подходе к решению проблем : пер. с англ.— М. : Альпина Бизнес Букс, 2006.— 256 с.
9. Лабскер Л. Г. Теория критериев оптимальности и экономические решения.— М. : КНОРУС, 2012. — 744с.
10. Протасов И. Д. Теория игр и исследование операций.— М. : Гелиос АРВ, 2003.— 368 с.
11. Сенге П. Пятая дисциплина: искусство и практика самообучающейся организации : пер. с англ.— М. : Олимп-Бизнес, 2003.— 406 с.
12. Системный анализ и принятие решений : словарь-справочник, под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. М. : Высшая школа, 2004.— 616 с.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов А. В. Системный анализ: учебник. — М. : Высшая школа, 2004.— 454 с.
2. Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении : учеб. пособие.— М. : Финансы и статистика, 2007.— 368 с.
3. Бережная Е. В., Бережной В. И. Математические методы моделирования экономических систем: учеб. пособие. — М. : Финансы и статистика, 2006.— 432 с.
4. Волкова В. Н., Денисов А. А. Основы теории систем и системного анализа : учебник.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 520 с.
5. Джексонто К., Уилмер Э. Управление знаниями. Руководство по разработке и внедрению корпоративной стратегии управления знаниями : пер. с англ.— М. : Добрая книга, 2005.—192 с.
6. Драгобрыцкий И. Н. Системный анализ в экономике : учеб. пособие.— М. : Финансы и статистика, 2009.— 508 с.
7. Каплан Р., Нортон Д. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию : пер. с англ.— М. : Олимп-Бизнес, 2005.— 320 с.
8. О'Коннор Дж., Макдермотт И. Искусство системного мышления: необходимые знания о системах и творческом подходе к решению проблем : пер. с англ.— М. : Альпина Бизнес Букс, 2006.— 256 с.
9. Лабскер Л. Г. Теория критериев оптимальности и экономические решения.— М. : КНОРУС, 2012. — 744с.
10. Протасов И. Д. Теория игр и исследование операций.— М. : Гелиос АРВ, 2003.— 368 с.
11. Сенге П. Пятая дисциплина: искусство и практика самообучающейся организации : пер. с англ.— М. : Олимп-Бизнес, 2003.— 406 с.
12. Системный анализ и принятие решений : словарь-справочник, под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. М. : Высшая школа, 2004.— 616 с.

ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Формульные обозначения и их интерпретация

Обозначение	Интерпретация
$a \in A$	Элемент a принадлежит множеству A
$A \ni a$	Множество A содержит элемент a
$A = \{a, b, c\}$	Множество A состоит из элементов a, b, c
$A = \{a_i\}$	Множество A состоит из элементов $a_i; i = 1, 2, \dots, n$
$A = \{a; \dots\} A = \{a \mid \dots\}$	Множество A состоит из элементов a , обладающих свойством, указанным после двоеточия (черты)
$A = \emptyset$	Множество A пусто
$ x $	Абсолютное значение числа x
$A \cup B$	Объединение множеств A и B
$A \cap B$	Пересечение множеств A и B
$A \setminus B$	Разность множеств A и B
$A \times B$	Произведение (лекартоно) A и B
$A \rightarrow B$	Из A следует B (A — необходимое условие B , B — достаточное условие A)
$\forall x$	Для любого x
$\exists x$	Существует такое x , что...
\vee и \wedge	Символы дизъюнкции и конъюнкции
$f: X \rightarrow Y$	Отображение множества X в (на) множество Y
$y = f(x)$	Переменная y — функция переменной x
$a > b$	Альтернатива a предпочтительнее альтернативы b
$a < b$	Альтернатива a менее предпочтительна, чем b
$a \approx b$	Альтернативы a и b эквивалентны
$x = f^{-1}(y)$	Функция, обратная к функции $y = f(x)$
$[a, b]$	Отрезок с концами в точках a и b

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

- Агрегирование** — объединение компонентов системы в рамках общей функциональной задачи.
- Анализ** — выявление действующего в системе алгоритма функционирования по установленному закону функционирования.
- Адаптация** — приспособление системы к обстановке, в ходе которого она может изменять свою структуру и поведение.
- Адекватность модели** — соответствие модели прототипу по выбранному множеству свойств.
- Альтернатива** — один из вариантов принятия решения из множества возможных.
- Асимптотическое приближение** — формула, приближенно связывающая некоторую сложную функцию с более простой при больших (или, наоборот, малых) значениях аргумента.
- Выбор** — решение, придающее целенаправленность динамике исследования системы.
- Выполнение программы** — перевод системы в требуемое состояние в условиях, когда значения управляемых параметров изменяются по известным детерминированным законам.
- Гомеостазис** — сохранение системой постоянных значений своих существенных характеристик.
- Данные** — отдельные факты, характеризующие объекты и явления предметной области, а также их свойства
- Декомпозиция** — расчленение системы (материальной или абстрактной) на подсистемы и элементы.
- Делегирование полномочий** — передача части функций и прав принятия решений нижестоящим системам управления
- Дерево целей** — иерархическая структура, полученная путем разделения (декомпозиции) целей на подцели.
- Детерминированный процесс** — упорядоченное во времени множество событий, каждое из которых однозначно предсказуемо.

Знания — закономерности предметной области, полученные в результате практической деятельности, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в этой области.

Измерение — алгоритмическая операция, которая ставит в соответствие каждой наблюдаемой характеристике эмпирической системы, процесса или явления определенное обозначение.

Измерительная шкала — знаковая система с отношением, являющаяся отображением эмпирической системы в виде некоторой числовой системы, соответствующей измеряемой эмпирической системе.

Информация — мера снятия априорной неопределенности в процессе исследования произвольной системы.

Информационный процесс — любое преобразование сообщений и содержащейся в них информации.

Информационная система — совокупность средств информационной техники и персонала, объединенных для достижения определенных целей, связанных с преобразованием информации.

Качество — совокупность существенных свойств системы, определяющих степень ее пригодности для использования по назначению.

Классификация — декомпозиция множества на подмножества по выбранному признаку.

Компромисс — решение, основанное на взаимных уступках.

Критерий — мера и способ осуществления выбора.

Критерий качества — показатель существенных свойств системы и правило его оценивания.

Критерий эффективности — обобщенный показатель и правило выбора лучшей системы.

Конфигуратор — совокупность языков описания системы (проблемы) при ее всестороннем рассмотрении.

Конфликт — проблемная ситуация, не допускающая компромиссного разрешения.

Лицо, принимающее решение (ЛПР) — индивид или группа индивидов, наделенных правом принятия окончательных решений по выбору одного из множества альтернативных управляющих воздействий.

Моделирование — процесс исследования реальной системы, включающий построение (синтез) модели, изучение ее свойств и перенесение свойств модели на исследуемую систему.

Модель — система, связанная отношениями подобия с системой — прототипом и служащая средством описания, объяснения и прогнозирования ее поведения.

Множество Парето — множество несравнимых альтернатив.

Наблюдаемость — свойство системы, состоящее в том, что по ее выходным сигналам можно однозначно судить о ее внутренних состояниях.

Непосредственная оценка — присвоение объектам числовых значений в интервальной шкале.

Несравнимые альтернативы — любая группа альтернатив, среди которых любая альтернатива превосходит другую по одной группе показателей, но уступает ей по другой группе показателей.

Норма управляемости — количество непосредственных подчиненных, которыми может эффективно управлять один руководитель.

Обратная связь — связь между управляющей системой и объектом управления, при которой выходные сигналы объекта управления подаются на вход управляющей системы.

Обстановка — состояние окружающей среды к определенному моменту времени.

Оптимизация — достижение наилучшего результата при действующих условиях и ограничениях.

Организация — установление постоянных и временных связей между всеми элементами системы, определение порядка и условий их функционирования.

Параметр — количественная характеристика системы.

Парное сравнение — процедура установления предпочтения альтернатив при сравнении всех возможных пар.

Подсистема — компонент системы, выделенный по определенному признаку, обладающий некоторой самостоятельностью и допускающий разложение на элементы в рамках данного рассмотрения.

Полезность исхода операции — действительное число, присваиваемое исходу операции и характеризующее его предпочтительность по сравнению с другими альтернативными исходами относительно цели.

Помехоустойчивость — способность системы без искажений принимать и передавать информационные потоки (сообщения).

Предикат — высказывание, описывающее определенное свойство, которым может обладать или не обладать набор элементов множества.

Проблема — противоречие между существующим и требуемым состоянием системы при данном состоянии среды в определенный момент времени.

Проблематическая надсистема — совокупность внешних систем, так или иначе заинтересованы в разрешении проблемы.

Проблемная система — система, для которой обнаружено, что ее состояние находится в противоречии с состоянием обстановки.

Прогноз — научно обоснованное суждение о возможных состояниях системы в будущем и (или) об альтернативных путях достижения целевого состояния.

- Прогнозирование** — снятие неопределенности относительно структуры, свойств и закона функционирования системы в будущем.
- Проект** — комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленных на достижение поставленных целей в течение ограниченного периода и при ограниченном бюджете.
- Ранжирование** — процедура упорядочивания объектов (альтернатив), выполняемая экспертом.
- Риск** — обобщенная характеристика ситуации принятия решений, отражающая возможность появления и значимость для ЛПР ущерба как последствий принятого решения.
- Робастность** — способность системы сохранять частичную работоспособность при отказе отдельных элементов или подсистем.
- Самоорганизация** — способность системы изменять свою структуру, алгоритмы функционирования, параметры с целью повышения эффективности.
- Связь** — вид отношений между элементами, которое проявляется себя как некоторое взаимодействие.
- Система** — множество взаимодействующих компонентов, обладающее свойством функциональной эмерджентности.
- Системный анализ** — методология разрешения проблем, основанная на структурировании систем и количественном сравнении альтернатив.
- Ситуация** — совокупность состояний системы и окружающей среды в один и тот же момент времени.
- Сложная система** — система, характеризуемая наличием неоднородных связей, свойствами робастности и эмерджентности.
- Структура** — совокупность образующих систему элементов и связей между ними.
- Тезаурус** — словарь, отражающий между словами или иными элементами определенного языка, предназначенный для поиска слов по их смыслу.
- Теория эффективности** — научное направление, предметом которого является количественное оценивание качества и эффективности функционирования сложных систем.
- Управление** — процесс формирования целенаправленного поведения системы посредством информационных воздействий, вырабатываемых ЛПР или устройством.
- Управляемость** — способность системы переходить за конечное заданное время в требуемое состояние под влиянием управляющих воздействий.

Устойчивость — способность системы возвращаться в равновесное состояние при выходе из него под влиянием внешних воздействий.

Управление — процесс формирования целенаправленного поведения системы посредством управляющих воздействий.

Функция управления — устойчивая упорядоченная совокупность операций, выделенная при разделении труда в управляющей системе.

Целеполагание — Определение состояния системы, которое должно быть достигнуто к окончанию управляемого периода.

Цель — ситуация или область ситуаций, которая должна быть достигнута при функционировании системы за определенный промежуток времени.

Ценность информации — изменение вероятности достижения цели при использовании полученного сообщения.

Цикл управления — совокупность функций управления, выполняемых в системе при каждом изменении состояния обстановки

Черный ящик — модель системы, относительно которой известно поведение, но неизвестен способ реализации этого поведения (внутреннее состояние).

Эвристика — метод решения задач, основанный на неформализованных правилах, выполняемых экспертами, обеспечивающий получение результата в случаях, когда аналитические и алгоритмические методы оказываются бесполезными.

Экстраполирование — процесс вычисления значения функции, находящегося за пределами ряда заданных значений

Элемент системы — компонент системы, обладающий рядом важных свойств и реализующий в системе определенную функцию, внутренняя структура которого не рассматривается.

Эмерджентность — целостное свойство системы, которое принципиально не сводится к сумме свойств ее элементов и подсистем

Энтропия — мера беспорядка в системе.

Энтропия информационная — мера неопределенности сообщений.

Энтропия объекта управления — мера первоначальной (априорной) неопределенности состояния объекта управления.

Энтропия остаточная — неопределенность решения, принятого с использованием эвристических процедур

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

A

Автоматизация 4, 185
Агрегирование 103
Адаптация 78
Алекватность 46
Аксиомы
 теории полезности 154
 теории управления 80
 аддитивности 128
 рефлексивности 128
 симметричности 128
 транзитивности 128
 эквивалентности
Альтернатива 74
Алгоритм
функционирования 12
Анализ 101

Б

База данных 185
База знаний 186
Байт 59

В

Взаимодействие 17
Виды моделирования 41, 42
Выбор 112

Г

Гомеостазис 26
Гомоморфизм 37, 127

Д

Данные 185
Декомпозиция 101, 103
 структурная 102
 функциональная 102
Делегирование полномочий 93
Дерево целей 109
Децентрализация 93

З

Задачи
принятия решения 73
управления 78
наблюдения 81
Зашумленность данных 138
Знания 69, 186
 неформализованные 186
 формализованные 187
Звено иерархии 93

И

Избыточность 148
Измерение 126
Измерительная шкала 127
 абсолютная 133
 интервальная 131
 номинальная 128
 отношений 133
 разностей 133
 ранговая 129
Иерархия 91
Информационный объект 60
Информационный процесс 65
Информационный шум 69
Информация 54, 88
Информационное общество 7, 9

К

Качество 20, 125
Качественная характеристика 18
Качественная цель 109
Количественная цель 110
Кибернетика 56
Классификация 21, 25, 140
Кластеризация 140
Компромисс 177
Конфигуратор 192
Конфликт 111, 178
Критерий 145, 147

- Гурвица 172
качества 143
Лапласа 171
максимина 172
Свонджа 173
Вальда 172
оптимальности 146
превосходства 147
пригодности 145
среднего выигрыша 172
эффективности 150
- Л**
Лицо, принимающее решение 165, 182
- М**
Метод (методы)
группового выбора 117
Дельфи 118
качественного оценивания 113
«мозгового штурма» 114
Монте-Карло 45
морфологический 115
последовательных уступок 116
свертки критериев 161
сценариев 114
экспертный 117
- Механизм
функционирования 38
- Множество
альтернатив 168
Парето 157
Множественные сравнения 122
- Моделирование 34, 39, 207
аналитическое 44
аналоговое 42
гипотетическое 42
детерминированное 41
имитационное 46
комбинированное 46
математическое 44
натуралистическое 42
стохастическое 41
Модель 36,
аналитическая 45, 52
- динамическая 52
имитационная 46
информационная 40
концептуальная 40
ментальная 24
состава 49
структурная 51
функциональная 40
функции контроля 208
функции оперативного управления 211
функции планирования 215
«черного ящика» 48,
- Н**
Неопределенность 59
Несравнимые альтернативы 157
Непосредственная оценка 122
Норма управляемости 93
Нормирование 143
Нормированный показатель 144
- О**
Объект управления 78, 204
Область достижимости 107
Обратная связь 27, 31
 упреждающая 31
 управновешивающая 28
 усиливающая 29
Оперативное управление 82
Оператор 36
Оптимизация 78,
 многокритериальная 161
 однокритериальная 163
Организационная структура 91
Организация 90
Оценивание 125
Оценка состояния 205
- П**
Память системы 36
Параметрическое пространство 38
Парное сравнение 120
Передача 205
Планирование

- стратегическое 217
 тактическое 216
 Подсистема 18
 Показатели 143
 исхода операции 147
 качества 144
 обобщенные 146
 частные 145
 эффективности 147
 Постановка задачи 232
 Правило
 выбора 71
 порождения альтернатив 72
 Пределы управления 92
 Предикаты 37
 Предикат целостности 38
 Предметная область 185
 Преобразование 36
 Признак 22
 Принцип
 децентрализации 93
 единства 100
 иерархии 94
 конечной цели 99
 необходимого разнообразия 84
 неопределенности 100
 покрытия 21
 разбиения 21
 развития 100
 связности 100
 функциональности 100
 эквифинальности 100
 Природа случайности 137
 Проблема 71, 103
 Проблематика 190
 Проблемная система 192
 Проблематическая надсистема 193
 Прогноз 205
 Прогнозирование 206, 230
 Проект 95
 Пропускная способность 64
 Пространство состояний 38
 Противоречие 98
 Протокол наблюдений 139
 Пронедура
- выбора 71
 сравнения 71
 принятия решения 72
 Процесс 61, 73,
- Р**
- Равновесие 26
 Разнообразие 84
 Ранговая шкала 129
 Ранжирование 119
 Рациональное решение 72
 Регулирование 83
 Ресурсоемкость 126
 Решение 70, 232
 задачи идентификации 214
 задачи классификации 213
 задачи наблюдения 211
 Риск 238
 Робастность 24,
- С**
- Самоорганизация 235
 Сбор данных 204
 Связь 26,
 Сигнал 55
 Синтез 102
 Система 17, 26
 большая 23
 естественного происхождения 22
 знаковая 127
 искусственного
 происхождения 22
 кодирования 57
 организационная 23
 организационно-техническая 23
 открытая 23,
 связи 78
 сложная 23
 Событие 56
 Сообщение 55
 Состояние системы 20,
 Степень свободы 90
 Стратегия игры 178
 Структура системы 77, 91, 96
 Существенность 39

Т

- Тезаурус 63
Теория
 информации 54
 измерений 127
 полезности 153
 принятия решений 70, 232
 шкалирования 134
 эффективности 125
Траектории 50

У

- Управление 27, 82
 комбинированное 214
 по возмущениям 212
 по обстановке 213
 по состоянию 213
 программное 212
Уровень иерархии 93
Уровни качества систем 145
Условия
 неопределенности 73
 определенности 73
 риска 73
Устойчивость 26

Ф

- Фазовое пространство 50
Формализация 45
Формирование сообщения 83
Функции управления 82, 207
Функционирование системы 52

Ц

- Целеполагание 78

Целостность 24

- Цель 19, 106
 качественная 107
 количественная 107
 конечная 108, 110
Цена игры 179
Ценность информации 60
Централизация управления 93
Цикл управления 83

III

- Шкала
 сильная 133
 слабая 133
 нечеткая 135
 строгого порядка 137
 нестрогого порядка 137

Э

- Эвристика 75
Эвристические процедуры 67
Эвристика остаточная 228
Эквивалентность 20,
 Эквифинальность 100
Эксперт 185
Экспертные методы 185
Экспертные системы 186
Экстраполирование 218
Элемент 17
Эмдерджентность 24,
Энтропия 57, 84
 информационная 89
 истаточная 228
 термодинамическая 89
объекта управления 87
Эффективность 20, 125