



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

ПРИКЛАДНОЙ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В ОБОГАЩЕНИИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



**ИНСТИТУТ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ**

УДК 622.7(07)
ББК 33.4я73
П759

Рецензенты:

А. С. Романченко, кандидат химических наук, научный сотрудник
Института химии и химической технологии Сибирского отделения
Российской академии наук;

С. М. Маркосян, кандидат химических наук, научный сотрудник
Института химии и химической технологии Сибирского отделения
Российской академии наук

П759 **Прикладной системный анализ в обогащении полезных
ископаемых** : учеб. пособие / В. И. Брагин, Е. А. Бурдакова,
А. А. Плотникова, И. И. Бакшеева. – Красноярск : Сиб. федер.
ун-т, 2020. – 238 с.

ISBN 978-5-7638-4313-2

Рассмотрены принципы, методы и средства исследования сложных объектов на основе представления их в контексте системы, являющейся комплексом взаимосвязанных составных элементов и объединяющих их свойств и процессов. Показано использование системного анализа для решения задач в смежных областях знания, управления системами и принятия обоснованных решений в условиях неполноты априорной информации, ограниченности ресурсов и дефицита времени.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация 21.05.04.00.06 «Обогащение полезных ископаемых».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 622.7(07)
ББК 33.4я73

ISBN 978-5-7638-4313-2

© Сибирский федеральный
университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА И ТЕОРИИ СИСТЕМ	8
Глава 1. Основы теории систем.....	8
1.1. Понятие системы.....	9
1.2. Основные типы систем.....	14
1.3. Свойства систем	19
Контрольные вопросы и задания.....	29
Глава 2. Основы системного анализа.....	30
2.1. Постановка проблемы	31
2.2. Декомпозиция и анализ	34
2.3. Синтетический метод	44
Контрольные вопросы и задания.....	50
Глава 3. Возникновение и эволюция систем.....	51
3.1. Эволюция	51
3.2. Возникновение сложности.....	55
3.3. Обратная связь – положительная и отрицательная.....	59
3.4. Модель эволюционирующей системы	63
3.5. Направленность эволюции.....	65
3.6. Эволюция инженерной системы.....	71
3.7. Эволюция сырьевого комплекса	76
Контрольные вопросы и задания.....	84
РАЗДЕЛ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ.....	86
Глава 4. Моделирование систем	86
4.1. Моделирование как способ существования	88
4.2. Анализ и синтез как методы построения моделей.....	90
4.3. Разновидности моделей систем	92
4.4. Онтологическое исследование.....	100
4.5. Общая характеристика методов IDEF	102
Контрольные вопросы и задания.....	108
Глава 5. Эксперимент и статистика в системном анализе.....	109
5.1. Экспериментальные шкалы и переменные	109

5.2. Основные подходы к статистической оценке и моделированию. Понятие статистики	113
5.3. Методы анализа.....	117
Контрольные вопросы и задания.....	130
РАЗДЕЛ 3. ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА.....	131
Глава 6. Обоганительное производство как сложная система	131
6.1. Обогащение полезных ископаемых как система знаний	132
6.2. Морфология системы обоганительного производства	135
6.3. Эволюция технологической подсистемы.....	143
6.4. Минерально-сырьевая подсистема.....	146
6.5. Подсистема управления качеством сырья	150
6.6. Умная фабрика.....	154
Контрольные вопросы и задания.....	157
РАЗДЕЛ 4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА.....	158
Глава 7. Основной подход к анализу и работа с проблемой.....	158
7.1. Основные понятия	158
7.2. Общая схема и начало анализа	166
7.3. Составление списка стейкхолдеров	171
7.4. Выявление проблемного месива.....	178
Контрольные вопросы и задания.....	186
Глава 8. Выработка и реализация решения.....	188
8.1. Определение конфигуратора.....	188
8.2. Целевыявление	190
8.3. Определение критериев.....	196
8.4. Экспериментальное исследование систем.....	198
8.5. Построение и усовершенствование моделей	200
8.6. Генерирование альтернатив	202
8.7. Выбор, или принятие, решения	216
8.8. Реализация улучшающего вмешательства.....	222
Контрольные вопросы и задания.....	232
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	233
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	235

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Системный анализ» содержит в себе основные идеи научного направления, но его нельзя назвать исчерпывающим руководством по этой отрасли науки. Классический системный анализ – это в значительной степени математическая дисциплина, которая занимается разработкой математических методов исследования и управления системами. К настоящему времени эта наука продвинулась далеко и приобрела формально-математический облик, не всегда доступный для использования инженерами традиционных направлений инженерии. Однако есть направления системного анализа более гуманитарного плана, ориентированные преимущественно на технологии работы с людьми и входящие в менеджмент, социологию, политологию и тому подобные области знания. Это то, что объединяется термином «прикладной системный анализ». Есть системный анализ, приведенный к виду, если так можно выразиться, мировоззренческому. Его можно определить как системный подход, или системное мышление. Это система взглядов и подходов к изучению реальности, которая базируется больше на синтезе, чем на анализе явлений, что позволяет получать более адекватное представление о них. Наконец, есть общая теория систем, имеющая методологическую направленность.

В этом курсе сделана попытка соединить элементы этих направлений таким образом, чтобы предоставить будущему инженеру-обогабителю минимальный (в соответствии с выделенным объемом учебной работы) набор системных инструментов, необходимых в его деятельности. Надеемся также, что эти инструменты окажутся полезными не только в профессиональной деятельности, но и в обычной жизни, позволяя яснее увидеть «механику бытия». Основа курса – представление о системах, их устройстве и месте в реальном мире. Это то, что называют «системное мышление».

Системное мышление дает возможность проникнуть за пределы того, что представляется изолированными и независимыми событиями, и увидеть лежащие в их основе структуры. Благодаря этому получается распознавать связь между событиями и совершенствовать свою способность понимать их и влиять на них.

Что представляет собой система? Система – это нечто такое, что в результате взаимодействия своих частей поддерживает свое существование и функционирует как единое целое. Отличный пример – человеческое тело. Оно состоит из множества различных органов, и каждый действует отдельно, но при этом все они работают вместе и каждый влияет на все другие. Глаз не может видеть, а нога двигаться без снабжения кровью. Сокращение ножных мышц толкает кровь по венам к сердцу. На сердцебиение и пищеварение влияют наши мысли, а состояние пищеварения, в свою очередь, оказывает влияние на мысли, особенно после основательного обеда или, наоборот, в состоянии голода.

Тело – это сложная система, так же как и семья, бизнес, социальная группа, система убеждений или технологическая цепочка фабрики. Люди, призванные решать проблемы общества, экономики и производства, хотя и руководствуются добрыми намерениями, но часто делают ситуацию еще хуже. Объем информации непрерывно растет, но все труднее бывает найти полезную. А без этого дополнительная информация только сбивает с толку. Хочется упростить. Разумеется, правильный подход состоит в том, чтобы стремиться заглядывать вперед, планировать и предвидеть долгосрочные последствия наших действий. Но как именно это можно сделать? Даже в личной жизни или на работе, несмотря на все усилия, дела могут пойти совсем не так, как хотелось или было рассчитано. То, что казалось полностью управляемым, вдруг начинает жить собственной жизнью. Порой все становится настолько сложным, что хочется опустить руки. Системное мышление – это подход, который позволяет увидеть и понять смысл и закономерности в наблюдаемых событиях, так что можно подготовиться к будущему и в определенной степени повлиять на него. Это значит, что появляется возможность в некотором смысле управлять ситуацией.

Какую пользу может принести системное мышление, если говорить не только о профессиональной деятельности?

Вы получите возможность эффективнее выстроить свою жизнь, если научитесь видеть закономерности, управляющие происходящими в ней событиями. Это означает, что вы сможете контролировать свое здоровье, работу, финансы и личные взаимоотношения. Вы больше не будете беспомощны перед грядущим, а сможете предсказывать события и готовиться к ним.

Вы получите более эффективное средство для решения проблем и более действенные мыслительные стратегии. Будете не просто лучше решать проблемы, но и сумеете изменить порождающее их мышление.

Вы избавитесь от навязчивого и малопродуктивного образа мышления «чтобы понять, надо упростить». Системное видение позволит разбираться в реальном мире, не цепляясь за примитивные мыслительные схемы. Начнет формироваться привычка строить, усложнять и регулировать системы, вместо того, чтобы ломать и препарировать их.

Останутся в прошлом или, по крайней мере, станут более редкими дни, когда вам приходится «напрягаться изо всех сил». Решая проблемы, мы часто упорно «ломимся в открытые двери» и только потом выясняем, что нужно было всего лишь потянуть ручку на себя. Системное мышление как раз и заключается в том, чтобы знать, с какой стороны расположены петли и в какую сторону открывается дверь. Если вы это знаете, то достаточно легонько толкнуть ее.

Системное мышление – это основа четкости в мыслях и общении, это путь к тому, чтобы видеть больше и дальше. Очевидные объяснения иногда неверны, а правда не всегда на стороне большинства. Видя другую, более широкую и многогранную картину, вы сможете точнее понять происходящее и действовать так, чтобы в долгосрочной перспективе получать наилучшие результаты.

Системное мышление необходимо, чтобы более эффективно управлять собой и другими. В профессии оно поможет вам постичь сложность процессов, и вы сможете понять, как их улучшить. Системное мышление учит создавать команды и направлять групповую работу, потому что любая группа или команда действует как система.

РАЗДЕЛ 1

ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА И ТЕОРИИ СИСТЕМ

Изучение дисциплины системного анализа начинается с понимания основ, к которым можно отнести развернутые ответы на следующие три вопроса:

1. Что является системой, на что они похожи, чем отличаются от не-систем и почему это для нас важно?
2. Как можно изучать системы и чем это изучение отличается от обычных методов исследования?
3. Каковы причины и источники системной организации объектов реального мира?

В трех главах этого раздела предпринята попытка разобраться в этих вопросах.

Глава 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ

*Вот еще один принцип системного мышления:
будьте готовы к побочным эффектам.*

Джозеф О'Коннор

Объектом изучения системного анализа являются сложные системы. Понятие «системы» стало широко использоваться в XX в. Длительное время оно применялось в самом общем смысле. Не было строгого формализованного определения данного понятия. По мере развития дисциплин кибернетического направления, особенно в связи с развитием и внедрением в различные сферы человеческой деятельности вычислительной техники, появилась необходимость формализовать понятие сложной системы, попытаться дать его строгое определение.

1.1. Понятие системы

В повседневной жизни термин «система» используют в тех случаях, когда хотят охарактеризовать объект как нечто целое, сложное, о чем невозможно сразу дать представление. Предполагается, что для характеристики системы необходимо рассмотреть разные аспекты ее функционирования, проанализировать различные ее свойства. В литературе встречается большое количество определений системы. Все они отражают те или иные важные стороны данного объекта. Один философ собрал и опубликовал коллекцию из 45 разных определений!

Разные определения понятия «система» отражают взгляды на это представителем различных отраслей знания. Чтобы составить возможную картину того, чем нам предстоит заниматься дальше, дадим некоторые из них:

- совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях и связях между собой и образующих некоторое целостное единство;
- совокупность или множество связанных между собой элементов;
- упорядоченная совокупность материальных объектов (элементов), объединенных какими-либо связями (механическими, информационными), предназначенных для достижения определенной цели и достигающих ее наилучшим (по возможности) образом;
- совокупность частей или компонентов, связанных между собой организационно. При выходе из системы части ее продолжают испытывать на себе ее влияние и претерпевают изменения;
- набор взаимосвязанных и взаимозависимых частей, составленных в таком порядке, который позволяет воспроизвести целое;
- естественное соединение составных частей, самостоятельно существующих в природе, а также нечто абстрактное, порожденное воображением человека.

Приведенные формулировки позволяют выделить общие черты подходов к определению системы. Существенным считается не просто сложность в смысле значительного количества входящих в нее элементов, а *структурированность*, наличие связей между объектами. Связи достаточно значимы для того, чтобы изменять входящие в систему объекты. И наконец, важной чертой является *целесолагание*, т. е. система

создана в этом сложном виде (если она искусственная) либо возникла и усложнилась самостоятельно для выполнения некоторой функции, достижения определенной цели.

Такой «классический» подход к определению системы, т. е. составление краткого описания, оказывается не слишком продуктивным из-за многогранности явления системности. Поэтому более ценной оказывается другая тактика. Для простейших случаев пытаются сформулировать признаки, или необходимые условия, того, что явление следует рассматривать как систему; а для более развернутого изучения систем описывают их свойства, что и будет сделано далее.

Сущность системного подхода и системного анализа

Системный анализ как дисциплина сформировался в результате осознания необходимости исследовать и проектировать сложные системы, управлять ими в условиях неполноты информации, ограниченности ресурсов и дефицита времени. Системный анализ является дальнейшим развитием целого ряда дисциплин, таких как исследование операций, теория оптимального управления, теория принятия решений, экспертный анализ, теория организации эксплуатации систем и т. д. Таким образом, системный анализ – междисциплинарный курс, обобщающий методологию исследования сложных технических, природных и социальных систем.

Очень часто, рассуждая о системном анализе и системах, к слову «система» добавляют эпитет «сложная». Строго говоря, сложность не является необходимым свойством системы. Есть системы очень простые, которые тем не менее обладают всеми свойствами систем, в том числе важнейшими для характеристики явления как системы – *эмерджентными*. Но системный анализ, как и другие дисциплины, предназначенные для изучения и управления системами, ориентируется прежде всего на системы сложные. Объяснение этого факта очевидно: простую систему можно, при некоторой изобретательности, изучить уже имеющимися аналитическими методами. Насущная же необходимость в системной методологии возникает, когда хорошо освоенные средства изучения простых объектов перестают работать.

С системным анализом тесно связаны компьютерные методы. Сложность систем порождает большой объем данных, используемых

при их изучении и управлении ими. В этой связи некоторые из исследователей полагают, что системный анализ – это совокупность методов, основанных на использовании компьютеров и ориентированных на исследование сложных систем: технических, экономических, экологических и т. д.

Центральной проблемой системного анализа является проблема принятия решения. Применительно к задачам исследования, проектирования и управления сложными системами проблема принятия решения связана с выбором определенной альтернативы в условиях различного рода неопределенности. Неопределенность обусловлена многокритериальностью задач оптимизации, неопределенностью целей развития систем, неоднозначностью сценариев развития системы, недостаточностью априорной информации о системе, воздействием случайных факторов в ходе динамического развития системы и прочими условиями. Учитывая данные обстоятельства, системный анализ можно определить как дисциплину, занимающуюся проблемами принятия решений в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы.

История становления системных представлений

Следующим этапом в развитии системных представлений явились работы А. А. Богданова, который в начале XX в. начал создавать теорию организации (*тектологию*). Основная идея теории А. А. Богданова заключается в том, что все существующие объекты и процессы имеют определенный уровень организованности, который тем выше, чем сильнее свойства целого отличаются от простой суммы свойств комплекствующих элементов. Именно анализ свойств целого и его частей был впоследствии заложен в качестве основной характеристики понятия сложной системы. Заслугой А. А. Богданова является также то, что он изучал не только статическое состояние структур, а занимался исследованием динамического поведения объектов, уделял внимание вопросам развития организации, подчеркивал значение обратных связей, указывал на необходимость учета собственных целей организации, отмечал роль открытых систем. Он подчеркивал роль моделирования и математических методов как потенциальных методов решения задач теории организации.

Признаки системы

В каких случаях можно быть уверенным, что использование системных методов необходимо для понимания объекта или явления, а игнорирование их приведет к ошибочным выводам? Отчасти ответ содержится в определении системы: если разрыв или неучет каких-то связей в объекте делает понимание его невозможным, то это система. Но до того, как объект был изучен, можно и не знать, как он устроен. Именно поэтому нужны какие-то подсказки, узнаваемые черты системы, признаки, наблюдаемые еще до ее изучения.

Сравним два объекта, сходные по масштабу и сложности (количеству элементов), один из которых можно считать системой, а другой – нет. Этот второй объект будем называть, в противоположность системе, нагромождением. Для наглядности можно представить нагромождение как груду строительного камня, а систему – как построенное из него каменное здание (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Отличие системы от нагромождения

Система	Нагромождение
Взаимосвязанные части функционируют как целое	Представляет совокупность разрозненных частей
Изменяется, если что-либо убрать или добавить. Разделив систему надвое, можно получить не две меньшие системы, а поврежденную и, вероятнее всего, нефункционирующую систему	Основные свойства не изменятся, если что-либо добавить или убрать. Разделив надвое, можно получить два нагромождения поменьше
Компоновка, взаимное расположение частей имеют решающее значение	Расположение частей не имеет значения
Части взаимосвязаны и работают вместе	Части не связаны между собой и могут функционировать отдельно
Поведение зависит от структуры. При изменении структуры меняется поведение	Поведение (если оно есть) зависит от размера или от числа предметов, составляющих нагромождение

Таким образом, характерные *признаки системы* те, которые проявляются одновременно: наличие множества элементов; единая цель для всех элементов; наличие связей между ними; целостность, определенная структура и иерархичность; относительная самостоятельность элементов.

Системы в реальном мире

В настоящее время среди специалистов сложилось практически общее мнение, что свойство системности является всеобщим свойством материи. Современные научные данные и системные представления позволяют говорить о мире как о бесконечной иерархической совокупности систем (системе систем). Причем части системы находятся в развитии, на разных стадиях эволюционирования, на различных уровнях системной иерархии и организации. Системность как всеобщее свойство материи проявляется через следующие составляющие: системность практической деятельности, системность познавательной деятельности и системность среды, окружающей человека.

Практическая деятельность человека, т. е. его целенаправленное воздействие на окружающую среду, обладает обязательными *признаками системности*: структурированность системы, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели. По отношению к человеческой деятельности эти признаки очевидны. Всякое осознанное действие преследует определенную цель. Во всяком действии достаточно просто увидеть его составные части, более мелкие действия. При этом легко убедиться, что эти составные части должны выполняться не в произвольном порядке, а в определенной их последовательности. Это и есть та самая определенная, подчиненная цели взаимосвязанность составных частей, которая и является признаком системности. Такое построение деятельности может быть названо *алгоритмичностью*.

Системным является само человеческое мышление. Успешное решение задачи зависит от того, насколько системно подходит специалист к ее анализу. Неудачи в решении тех или иных проблем обычно связаны с отходом от системности, с игнорированием части существенных взаимосвязей компонентов системы, с неоправданным упрощением исследовательской модели. Разрешение возникшей проблемы, наоборот, обычно осуществляется путем перехода на новый, более высокий уровень системности. С системностью мышления сталкивается каждый человек в процессе обучения. Каждому студенту знакомо состояние, когда все «разложено по полочкам», т. е. новые знания приведены в систему, взаимно согласованы между собой и с имеющимся профессиональным и жизненным опытом.

Свойство системности вообще присуще процессу познания. Системны знания, накопленные человечеством. В качестве особенности процесса познания отметим существование двух основных подходов: аналитического и синтетического. *Анализ* – это подход, основанный на разделении изучаемого явления на части, на представлении сложного в виде совокупности более простых объектов, с неизбежным разрывом имеющихся связей. *Синтез* – противоположный подход, основанный на сборе целого из частей, с одновременным выяснением внутренних взаимосвязей системы.

Аналитичность человеческого знания находит свое отражение в существовании различных наук, в их дифференциации, во все более глубоком изучении все более узких вопросов. Вместе с тем идет и обратный процесс синтеза знаний. Процесс синтеза проявляется в возникновении междисциплинарных наук, таких как физическая химия, биофизика, биохимия и т. п. Дробление и специализация наук с одновременным междисциплинарным перемешиванием – форма существования человеческого знания как системы. Именно этим образом обеспечивается развитие науки.

Свойство системности присуще результатам познания. В технических науках это реализуется в построении адекватных моделей, являющихся отражением исследуемых объектов, моделей, описывающих динамическое поведение материальных объектов.

Системна также среда, окружающая человека. Свойство системности является естественным свойством природы. Как уже отмечалось выше, окружающий нас мир есть бесконечная система систем, иерархическая организация все более сложных объектов. Причем как в живой, так и неживой природе действуют свои законы организации, являющиеся объективными биологическими или физическими законами.

1.2. Основные типы систем

Простейшим описанием разнообразия систем являются их классификации. Подходы к классификации систем могут быть самыми разными, классификационный признак отражает какую-либо одну важную характеристику систем (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Классификация систем

Классификационный признак	Типы систем
Природа объектов	Технические, биологические, социальные, экономические
Характер поведения	Детерминированные, вероятностные, игровые
Тип целеустремленности	Открытые и закрытые
Сложность структуры и поведения	Простые и сложные
Вид научного направления, используемого для их моделирования	Математические, физические, химические и др.
Степень организованности	Хорошо организованные, плохо организованные, самоорганизующиеся

Рассмотрим некоторые из представленных классификаций.

Классификация по характеру поведения

Детерминированной называется система, состояние которой в будущем однозначно определяется ее состоянием в настоящий момент времени и законами, описывающими переходы элементов и системы из одних состояний в другие. Составные части в детерминированной системе взаимодействуют точно известным образом. Примером детерминированной системы может служить механический арифмометр. Установка соответствующих чисел на валике и задание порядка вычисления однозначно определяют результат работы устройства. То же самое можно сказать о калькуляторе, если считать его абсолютно надежным.

Вероятностные, или *стохастические*, системы – это системы, поведение которых описывается законами теории вероятностей. Для вероятностной системы знание текущего состояния и особенностей взаимной связи элементов недостаточно для предсказания будущего поведения системы со всей определенностью. Для такой системы имеется ряд направлений возможных переходов из одних состояний в дру-

гие, т. е. имеется группа сценариев преобразования состояний системы и каждому сценарию поставлена в соответствие своя вероятность. Примером стохастической системы может служить мастерская по ремонту электронной аппаратуры и радиотехники. Срок выполнения заказа по ремонту конкретного изделия зависит от количества аппаратуры, поступившей в ремонт до поступления рассматриваемого изделия, от характера повреждений каждого из находящихся в очереди объектов, от количества и квалификации обслуживающего персонала и т. п.

Игровой является система, осуществляющая разумный выбор своего поведения в будущем. В основе выбора лежат оценки ситуаций и предполагаемых способов действий, выбираемых на основе заранее сформированных критериев, а также с учетом соображений неформального характера. Руководствоваться этими соображениями может только человек. Примером игровой системы может служить организация, выполняющая некоторые работы в качестве исполнителя. Исполнитель вступает в отношения с заказчиком. Интересы исполнителя и заказчика противоположны. Исполнитель старается продать свою работу как можно выгоднее. Заказчик, наоборот, пытается сбить цену и соблюсти свои интересы. В данном торге между ними проявляется игровая ситуация.

Классификация по данному признаку (характеру поведения системы) условна, как и многое другое, касающееся характеристики сложных систем. Она допускает разные толкования принадлежности той или иной системы к сформированным классам. Так в детерминированной системе можно найти элементы стохастичности. В то же время детерминированную систему можно считать частным случаем стохастической системы, если допускать вероятности переходов из состояния в состояние, соответственно, равными нулю (перехода нет) и единице (переход имеет место). Точно так же стохастическую систему можно рассматривать как частный случай игровой, когда идет игра с природой.

Классификация по типу целеустремленности

По типу целеустремленности выделяют открытые и закрытые системы. По данному признаку классификации системы характеризуются различной степенью взаимодействия с внешней средой. *Открытые системы* обладают способностью обмениваться с внешней средой массой,

энергией, информацией. *Замкнутые* (или *закрытые*) *системы* изолированы от внешней среды. Предполагается, что разница между открытыми и замкнутыми системами определяется с точностью до принятой чувствительности модели.

Классификация по сложности структуры и поведения

По степени сложности системы бывают простые, сложные и очень сложные. Деление в известной степени условное и определяется нашими возможностями учесть многообразие внешних и внутренних связей системы. Количество элементов, входящих в систему, и количество связей этих элементов обуславливают число возможных состояний, в которых может находиться система.

Простые системы характеризуются небольшим количеством возможных состояний, их поведение легко описывается в рамках той или иной математической модели даже при возникновении эмерджентных свойств. Часто эффект дают простые методы симуляции.

Сложные системы отличаются разнообразием внутренних связей, но допускают их описание существующими математическими и программными средствами. Набор методов, привлекаемых для описания сложных систем, намного более сложен, чем в случае простых систем, т. е. для построения модели сложной системы применяются комбинации подходов и разные разделы математики.

Очень сложные системы характеризуются значительной разветвленностью связей большого числа элементов, что исключает возможность моделирования их прямыми методами. Здесь на первый план выступают эмерджентные свойства систем и, соответственно, методы моделирования этих свойств.

Простыми системами можно считать различные механические устройства, даже довольно сложные с точки зрения механики. Простота этой системы обусловлена тем, что она почти исчерпывающе описывается системой уравнений механики. Технологические схемы переработки руд простого минерального состава магнитными и особенно гравитационными методами также можно считать простыми системами. Сложными системами являются компьютер, автоматизированная система управления предприятием. Технологическая схема флотационного обогащения даже монометалльной руды также считается сложной си-

стемой из-за сложного поведения флотационных систем вообще. Очень сложными являются общественные и экономические системы. Даже относительно небольшие социальные группы характеризуются высокой сложностью.

Классификация по признаку организованности систем

Под *хорошо организованной системой* понимается система, у которой определены все элементы, их взаимосвязь, правила объединения в более крупные компоненты, связи между всеми компонентами и целями системы, ради достижения которых создается или функционирует система. При этом подразумевается, что все элементы системы с их взаимосвязями между собой, а также с целями системы можно отобразить в виде аналитических зависимостей. При формулировании задачи принятия решения для хорошо организованной системы проблемная ситуация описывается в виде математического выражения, критерия эффективности, критерия функционирования системы, который может быть представлен сложным уравнением, системой уравнений, сложными математическими моделями, включающими в себя и уравнения, и неравенства и т. п. Важно, что решение задачи при представлении ее в виде хорошо организованной системы осуществляется аналитическими методами с использованием моделей формализованного представления системы.

Примером хорошо организованной системы может служить сложное электронное устройство. Описание его работы производят с помощью системы уравнений, учитывающих условия функционирования, в том числе наличие шумов, нестабильность электропитания и т. д.

При представлении объекта в виде *плохо организованной системы* не ставится задача определить все учитываемые компоненты, их свойства и связи между собой, а также с целями системы. Для плохо организованной системы формируется набор макропараметров и функциональных закономерностей, которые будут ее характеризовать. Определение этих параметров и восстановление функциональных зависимостей осуществляется на основании некоторой выборочной информации, характеризующей исследуемый объект или процесс. Далее полученные оценки характеристик распространяют на поведение системы в целом. При этом предполагается, что полученный результат обладает ограни-

ченной достоверностью и его можно использовать с некоторыми оговорками. Так, например, если результат получен на основании статистических наблюдений за функционированием системы на ограниченном интервале времени, т. е. на основании выборочных наблюдений, то его можно использовать с некоторой доверительной вероятностью.

Примером использования подхода к отображению объектов в виде плохо организованной системы можно считать оценивание характеристик надежности системы с множеством компонентов. В данном случае характеристики надежности группы однотипных элементов устанавливаются на основании выборочной информации, полученной в результате наблюдений за их работой на ограниченном отрезке времени при определенных уровнях воздействующих факторов. Затем полученные оценки распространяются на весь период эксплуатации объекта. Данные оценки используются при проведении расчетов характеристик надежности всей системы.

Самоорганизующиеся системы – это системы, обладающие свойством адаптации к изменению условий внешней среды, способные изменять структуру при взаимодействии со средой, сохраняя при этом свойства целостности; системы, способные формировать возможные варианты поведения и выбирать из них наилучшие. Эти особенности обусловлены наличием в структуре системы активных элементов, которые, с одной стороны, обеспечивают возможность адаптации, приспособления системы к новым условиям существования, с другой стороны, вносят элемент неопределенности в поведение системы, чем затрудняют проведение анализа системы, построение ее модели, формальное ее описание и в конечном счете управление такими системами. Примерами самоорганизующихся систем могут служить биологические системы, предприятия и их системы управления, городские структуры управления и т. д.

1.3. Свойства систем

Описание свойств систем может быть объемным и детальным. Требуемая детальность определяется тем, насколько подробно нужно описать феномен системности. Несколько ранее была поставлена задача дать определение системам через описание их свойств. Для это-

го уже близкого, но все-таки поверхностного знакомства ограничимся двенадцатью свойствами, разделенными на три группы. Числа 12 и 3 выбраны совершенно произвольно и не несут никакого сакрального смысла. С тем же успехом можно перечислить и 17, и 28 свойств. Тем не менее есть некоторая логика в выделении трех групп свойств – в порядке усложнения. Первая группа – статические свойства, самые простые и базисные. Вторая группа учитывает дополнительную переменную – время, оценивает динамику системы, ее движение во времени. Третья группа – самая сложная, отражает специфические системные свойства, присущие исключительно системам – синтетические.

Статические свойства

Статическими свойствами назовем особенности конкретного состояния системы: то, что можно было бы разглядеть на мгновенной фотографии системы; то, чем обладает система в любой, но фиксированный момент времени.

Целостность. Всякая система выступает как нечто единое, целое, обособленное, отличающееся от всего остального. Это свойство позволяет отделить систему от окружающей среды. Оно дает возможность «увидеть» систему в реальном мире. Статические свойства, в том числе целостность, присущи любому объекту, не только системному. Но часто даже не приходит в голову расчленять несистемный объект на составляющие, поскольку он уже есть некоторый монолит по определению. Для системы же это свойство целостности очень критично. Если нечто не пытается сохранить целостность в окружающем мире, мы не можем назвать это системой. Это, скорее, нагромождение.

Открытость. Выделяемая, отличимая от всего остального система не изолирована от окружающей среды, они связаны между собой и обмениваются потоками вещества, энергии, информации, других сущностей. Степень открытости системы может быть различной. Оценить ее можно по соотношению мощности потоков, пересекающих границу системы, и мощности потоков, циркулирующих внутри нее. В некоторых случаях степень открытости системы имеет принципиальное значение. Например, экономика, основанная на натуральном хозяйстве, и рыночная экономика представляют собой системы хозяйств различной степени открытости. При натуральном способе каждое хозяйство

представляет собой систему крайне низкой открытости, почти все потоки сырья и продуктов замкнуты внутри него. В рыночной экономике, наоборот, хозяйства характеризуются высокой открытостью: большая часть потоков сырья и продуктов пересекает границу хозяйства, выходя на рынок. Это различие в степени открытости хозяйств оказывает радикальное влияние на характер как экономических, так и социальных отношений.

Связи системы со средой имеют направленный характер: по одним среда влияет на систему (их называют *входами системы*), по другим система оказывает влияние на среду (такие связи называют *выходами системы*). Перечень входов и выходов системы, а также передаточная характеристика между входом и выходом называются *функциональной моделью системы* или *моделью черного ящика*. В этой модели отсутствует информация о внутренних особенностях системы. Несмотря на лаконичность модели черного ящика, она часто вполне достаточна для успешной работы. Например, при проектировании схем обогащения принято описывать обогатительные аппараты (сепараторы) сепарационной характеристикой, которая показывает, с какой вероятностью различные зерна минералов извлекаются в концентрат. При этом имеет значение не физика процесса сепарации, а две числовые характеристики модели – граница разделения и ошибка разделения, а общий вид сепарационной характеристики остается одинаковым для сепараторов различной физической природы.

Внутренняя неоднородность: различимость частей. Если заглянуть внутрь черного ящика, то выяснится, что система неоднородна, немонолитна; можно обнаружить, что разные качества в разных местах отличаются. Описание внутренней неоднородности системы сводится к обособлению относительно однородных участков, проведению границ между ними. Так появляется понятие о *частях системы*. При более детальном рассмотрении оказывается, что выделенные крупные части тоже неоднородны, что требует выделения еще более мелких частей. В результате получается иерархический список частей системы, который можно называть *моделью состава системы*.

Структурированность. Свойство заключается в том, что части системы не независимы, не изолированы друг от друга; они связаны между собой, взаимодействуют друг с другом. При этом свойства си-

стемы в целом существенно зависят от того, как именно взаимодействуют ее части. Поэтому так часто важна информация о связях частей. Перечень существенных связей между элементами системы называется *моделью структуры системы*. Наделенность любой системы определенной структурой будем называть четвертым статическим свойством систем – *структурированностью*. Понятие структурированности дальше углубляет наше представление о целостности системы: связи как бы скрепляют части, удерживают их как целое. Целостность, отмеченная ранее как внешнее свойство, получает подкрепляющее объяснение изнутри системы – через структуру.

Динамические свойства

К динамическим свойствам относятся функциональность, стимулируемость, изменчивость во времени и существование в изменяющейся среде.

Функциональность. Процессы, происходящие на выходах системы, рассматриваются как ее функции.

Функции системы – это ее поведение во внешней среде; изменения, производимые системой в окружающей среде; результаты ее деятельности; продукция, производимая системой.

Из множественности выходов следует множественность функций, каждая из которых может быть кем-то и для чего-то использована. Поэтому одна и та же система может служить для разных целей.

Субъект, использующий систему в своих целях, будет, естественно, оценивать ее функции и упорядочивать их по отношению к своим потребностям. Так появляется понятие главной, второстепенной, нейтральной, нежелательной, лишней функции и т. п. Снова обратим внимание на то, что все эти термины оценочные, субъективные, относительные. Так, главной функцией лампы считается давать свет; но при выборе светильника из десятков прочих продаваемых в магазине на первый план выходят его декоративные качества, согласованность с интерьером помещения, его стоимость и пр.

Итак, выделим два момента данного свойства систем: объективную многофункциональность и субъективную упорядоченность функций.

Стимулируемость. На входах системы тоже происходят определенные процессы, воздействующие на систему, которые превращаются

(после ряда преобразований в системе) в функции. Назовем входящие воздействия *стимулами*, а саму подверженность любой системы воздействиям извне и изменение ее поведения под этими воздействиями – *стимулируемостью*.

Изменчивость системы со временем. В любой системе происходят изменения, которые надо учитывать: предусматривать и закладывать в проект будущей системы; способствовать или противодействовать им, ускоряя или замедляя их при работе с существующей системой. Изменяться в системе может что угодно, но в терминах моделей можно дать наглядную классификацию изменений: изменяться могут значения внутренних переменных, состав и структура системы и любые их комбинации.

Существование в изменяющейся среде. Изменяется не только данная система, но и все остальные. Для данной системы это выглядит как непрерывное изменение окружающей среды. Необходимость существования в постоянно изменяющемся окружении имеет множество последствий для самой системы, начиная с необходимости ее приспособления к внешним переменам, чтобы не погибнуть, до различных других реакций системы. При рассмотрении конкретной системы с конкретной целью внимание сосредоточивается на некоторых конкретных особенностях ее реакции.

В качестве примера рассмотрим вопрос о том, как должна соотноситься скорость изменений внутри системы со скоростью изменений в окружающей среде – быть медленнее, совпадать или идти быстрее. Это определяется в зависимости от природы системы или ее предназначности. Например, системы, предназначенные для переноса информации во времени (книги, памятники, произведения искусства, видео- и аудиозаписи, триангуляционные метки и т. п.), тем лучше выполняют свою функцию, чем медленнее они меняются при изменениях в окружающей среде. Другой пример этого – сохранение своего состояния автоматами и живыми организмами (гомеостат, стабилизация, стационарность). Иная реакция живых организмов идет практически одновременно с изменениями среды, например адаптация зрачка при изменениях освещения. Существуют системы, функции которых могут выполняться, только если изменения в системе опережают изменения в среде. Типичный пример – управление: перебор и сравнение различных вариантов управляющего воздействия должны происходить в ускоренном темпе.