

## **Тема 1. Возникновение и развитие системных представлений**

Перед специалистами любого профиля часто возникают вопросы: как решить реальную проблему и не создать при этом новых; как уменьшить сложность возникшей ситуации; как правильно организовать исследование существующей системы или проектирование новой? На все эти вопросы отвечает современный прикладной системный анализ. Знакомство с методами системного анализа необходимо практически всем специалистам, и его элементы вошли в учебные планы многих вузов.

### **1.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ**

В современном обществе системные представления уже достигли такого уровня, что мысль о полезности и важности системного подхода к решению возникающих в практике проблем вышла за рамки специальных научных истин и стала привычной, общепринятой. Уже не только ученые, но и инженеры, педагоги, организаторы производства, деятели культуры обнаружили системность собственной деятельности и стараются осуществлять свою работу осознанно системно. Широко распространилось понимание того, что наши успехи связаны с тем, насколько системно мы подходим к решению проблем, а наши неудачи вызваны отступлениями от системности.

Было бы неверным считать, что "мышление стало системным" только во второй половине 20 века. Мышление системно всегда и другим быть не может. Системность—это не такое качество, которым можно обладать или не обладать. Однако системность имеет разные уровни. Сигналом о недостаточности системности существующей деятельности является появление проблемы; разрешение возникшей проблемы осуществляется путем перехода на новый, более высокий уровень системности в нашей деятельности. Поэтому системность не столько состояние, сколько процесс.

Иллюстрацией этого может служить состояние знаний тех, кому только что сказанное представляется расплывчатым, не очень ясным: что означает слово "система", что означает "действовать системно", почему "несистемного знания не бывает? Налицо проблема понимания сказанного (кстати, совсем не уникальная, а типичная для обучения). Эту проблему мы будем решать, постепенно повышая уровень системности знаний, в чем и состоит цель данного курса. Пока же нам достаточно тех ассоциаций, которые возникают, когда мы употребляем в обыденной речи слово "система" в сочетании со словами "общественно–политическая", "Солнечная", "нервная", "отопительная" или "уравнений", "показателей", "взглядов и убеждений", –ведь эти словосочетания обозначают (наряду с различием) и нечто общее: системность.

В данной лекции мы покажем, что хотя осознание системности мира пришло с трудом и не сразу, оно не могло не прийти: системные представления возникли по объективным причинам и развиваются под действием объективных факторов.

### **1.2. РОЛЬ СИСТЕМНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Человек – активная часть природы. Добиваясь своих целей, человек использует природу, воздействует на нее, преобразует ее и себя. Без преувеличения можно сказать, что самым важным и самым интересным для человечества кругом вопросов являются вопросы о возможностях человека в его отношениях с природой, о способах реализации этих возможностей, о факторах,

способствующих и препятствующих расширению этих возможностей. К этому же кругу вопросов принадлежит и философская проблема соотношения материи и сознания.

Начнем с рассмотрения практической деятельности человека, т.е. его активного и целенаправленного воздействия на окружающую среду. Наша первая задача – показать, что человеческая практика системна. Впоследствии мы будем подробно и всесторонне рассматривать признаки системности, а сейчас отметим только самые очевидные и обязательные из них: структурированность системы, взаимосвязанность составляющих ее частей, подчиненность организации всей системы определенной цели. По отношению к человеческой деятельности эти признаки и в самом деле очевидны, поскольку каждый из нас легко обнаружит их в своем собственном практическом опыте. Всякое наше осознанное действие преследует определенную цель (пока оставим в стороне неосознанные действия). Во всяком действии легко 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.

### СИСТЕМНОСТЬ И АЛГОРИТМИЧНОСТЬ

Другое название для такого построения деятельности – алгоритмичность. Понятие алгоритма возникло сначала в математике и означало задание точно определенной последовательности операций над числами или другими математическими объектами. В последние годы стала осознаваться алгоритмичность любой деятельности, и уже всерьез говорят не только об алгоритмах принятия управленческих решений, об алгоритмах обучения, алгоритмах игры в шахматы, но и об алгоритмах изобретательства [3], алгоритмах композиции музыки. Подчеркнем, что при этом делается отход от математического понимания алгоритма: сохраняя логическую принудительность последовательности действий, мы допускаем, что в алгоритме данной деятельности могут присутствовать и такие действия, которые не формализованы; важно лишь, чтобы этот этап алгоритма успешно выполнялся человеком, хотя и не осознанно. Здесь важными являются следующие моменты. Во-первых, всякая деятельность алгоритмична. Во-вторых, не всегда алгоритм реальной деятельности осознается (композитор сочиняет музыку, шофер мгновенно реагирует на изменения дорожной обстановки, вратарь ловит в броске мяч – "не думая"). В-третьих, в случае неудовлетворенности результатом деятельности возможную причину неудачи следует искать в несовершенстве алгоритма. Это означает – пытаться выявить алгоритм, исследовать его, искать "слабые места", устранять их, т.е. совершенствовать алгоритм и, следовательно, повышать системность деятельности. Таким образом, явная алгоритмизация любой практической деятельности является важным средством ее развития.

Перейдем теперь к другой задаче – показать, что роль системных представлений в практике постоянно увеличивается, что растет сама системность человеческой практики. Последнее можно проиллюстрировать многими примерами, но поучительно сделать это на несколько схематизированном примере проблемы повышения производительности труда.

Одна из важнейших особенностей общественного производства состоит в непрерывном росте его эффективности, и прежде всего в повышении

производительности труда. Подчеркнем, что этот процесс роста очень сложен, многогранен, но его итог выражается, овеществляется в развитии средств труда и методов его организации.

### МЕХАНИЗАЦИЯ

Успешность всякой деятельности тем более вероятна, чем выше уровень ее системности; неудачи вызваны недостаточной системностью. Можно выделить три уровня системности труда: механизация, автоматизация, кибернетизация. Возможности механизации ограничены участием человека. Автоматизировать можно только алгоритмизованные процессы. Кибернетизация состоит во включении в технологический процесс интеллекта – естественного или искусственного.

Простейший и исторически первый способ повышения эффективности труда – механизация. Человек вооружается механизмами – от простейших орудий и приспособлений, приводимых в действие мускульной силой, до сложнейших машин со встроенными в них двигателями. С помощью механизмов и машин один человек выполняет физическую работу, которую без них пришлось бы выполнять многим людям.

Механизация позволяет решать многие проблемы. Например, по подсчетам акад. А.И. Берга, если бы механизация строительных работ у нас оставалась на уровне строительства Днепрогэса, то для сооружения только электростанций уже в прошлом десятилетии потребовалось бы все трудоспособное население Советского Союза. В строительстве электростанций этого не произошло благодаря механизации. Но в целом в народном хозяйстве страны еще весьма высок процент работ, выполняемых вручную: в промышленности – несколько меньше половины, в сельском хозяйстве и в сфере обслуживания – значительно выше. Таким образом, возможности механизации еще далеко не исчерпаны.

Однако механизация имеет естественный предел: работой механизмов управляет человек, а его возможности ограничены физиологически. Нельзя делать лопату слишком широкой – поднимать ее придется человеку. Машина не должна иметь слишком много приборов–индикаторов и рычагов управления: у человека всего два глаза и две руки. Скорость реакции человека ограничена, поэтому механизация очень быстрых процессов бессмысленна. Короче говоря, сам человек является "узким местом" механизации.

### АВТОМАТИЗАЦИЯ

Решение проблемы состоит в том, чтобы вообще исключить участие человека из конкретного производственного процесса, т.е. возложить на машины не только выполнение самой работы, но и выполнение операций по регулированию хода, течения процесса работы. Технические устройства, объединившие эти две функции, называются автоматами.

В соответствии с этим второй способ повышения производительности труда (он же второй этап по времени и второй уровень системности общественного производства) получил название автоматизации.

Автоматы полностью освобождают человека от выполнения данной работы. Они могут иметь разную сложность и выполнять разнообразные работы. В быт вошли торговые и игровые автоматы, автоматическая телефонная связь, в промышленности уже существуют целые автоматические линии, цеха и заводы, развивается промышленная и транспортная робототехника. Расширенные возможности представляют перестраиваемые, многофункциональные автоматы,

среди которых особое место занимают ЭВМ. Автоматизации поддаются все более сложные работы, в том числе такие, которые прежде выполнялись только в виде мыслительной деятельности. Это опять-таки вызывается объективной необходимостью. Если бы плановые, экономические и финансовые органы нашей страны обрабатывали всю информацию по-старому, на счетах и арифмометрах, то сейчас все трудоспособное население страны должно было бы работать "в бухгалтериях". Этого не произошло – благодаря автоматизации с помощью ЭВМ.

Однако очень важно понять, что автоматизировать, т.е. полностью возложить на машину, можно только те работы, которые детально изучены, подробно и полно описаны, в которых точно известно, что, в каком порядке и как надо делать в каждом случае, и точно известны все возможные случаи и обстоятельства, в которых может оказаться автомат. Т.е. автоматизировать можно только те работы, для которых существует полностью формализованный алгоритм. Только при таких условиях можно сконструировать соответствующий автомат, и только в этих условиях он может успешно выполнять работу, для которой предназначен. Пользуясь уже знакомой нам терминологией, можно сказать, что автомат реализует некоторый алгоритм, и если алгоритм в какой-то своей части неправилен или неточен, либо встретилась ситуация, не предусмотренная алгоритмом, то поведение автомата не может соответствовать целям его создания.

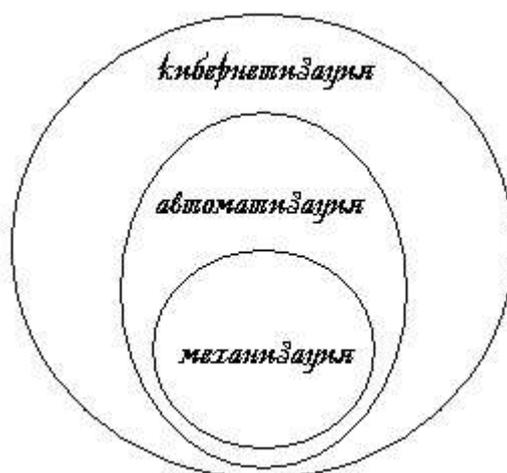
Итак, автоматизация является мощным средством повышения производительности труда: по мере совершенствования наших знаний о тех или иных производственных процессах последние могут быть автоматизированы во все большей степени. Однако и у автоматизации в свою очередь существует естественный предел: в реальной жизни часто приходится сталкиваться с непредвиденными условиями и с невозможностью полной формализации многих практических действий.

### КИБЕРНЕТИЗАЦИЯ

Наиболее остро такие проблемы возникают в процессе руководства человеческими коллективами, при управлении производственными системами, при проектировании и эксплуатации крупных технических комплексов, при вмешательстве (например, медицинском или исследовательском) в жизнедеятельность человеческого организма, при воздействии человека на природу, т.е. в тех случаях, когда приходится взаимодействовать со сложными системами \*. Повышение эффективности такого взаимодействия является как объективной, так и субъективной необходимостью, и, естественно, человечество вырабатывает способы решения возникающих при этом проблем.

Совокупность таких способов представляет собой третий уровень системности практической деятельности человека. Этот уровень можно назвать кибернетизацией, поскольку кибернетика первой среди других подходов стала претендовать на научное решение проблем управления сложными системами.

Соотношение между тремя рассмотренными уровнями организации труда



иллюстрирует рис. 1.1.

Рис.1.1. Схема этапов повышения производительности труда

Основная идея разрешения проблем, связанных со сложными системами состоит в том, чтобы в тех случаях, когда автоматизация (т.е. формальная алгоритмизация) невозможна, использовать ту человеческую способность, которая именно в таких случаях проявляется и которая называется интеллектом: способность ориентироваться в незнакомых условиях и находить решение слабо формализованных задач (сказочный герой мог решать даже такую задачу: "Пойди туда, не знаю куда. принеси то, не знаю что"). При этом человек выполняет именно те операции в общем алгоритме, которые не поддаются формализации (например, экспертная оценка или сравнение многомерных и неколичественных вариантов, принятие управленческих решений, взятие на себя ответственности). Именно на этом принципе строятся автоматизированные (в отличие от автоматических) системы управления, в которых

формализованные операции выполняют автоматы и ЭВМ, а неформализованные (и, возможно, неформализуемые) операции – человек. Этот путь, следовательно, состоит в разумном использовании естественного человеческого интеллекта.

Однако на этом возможности кибернетизации не кончаются, а, скорее, лишь начинаются. Вполне логично, в духе лучших научных традиций, возникает вопрос: нельзя ли смоделировать интеллектуальные возможности человека – хотя бы в той части, которая необходима для выполнения конкретных, пусть частных, интеллектуальных операций? Здесь опыт науки и техники подсказывает два пути: "подглядеть" у природы алгоритмы интеллектуальной деятельности (т.е. изучать естественный интеллект) либо "изобрести" эвристически алгоритм предположительно с интеллектуальными свойствами и исследовать, что это даст (т.е. конструировать интеллект искусственно).

По ходу изложения мы еще не раз будем возвращаться к проблемам и результатам кибернетизации. Пока же отметим, что техническими средствами для этого служат автоматы и ЭВМ. Их совершенствование и использование для самых разнообразных нужд, создание алгоритмов и программных систем для ЭВМ приобрели исключительно важное значение. Настолько важное, что все связанное с использованием ЭВМ стали выделять в отдельную область науки и техники, названную информатикой.

Но не менее важная сторона процесса кибернетизации связана с изучением самих систем, созданием методов организации и управления сложными системами, развитием системных представлений, системных теорий.

Подведем итог

Проследив этапы повышения производительности труда, мы увидели, что процесс труда с каждым этапом становится все сложнее (состоит из большего числа элементарных действий), усложняется взаимосвязанность составляющих его частей, поставленная цель достигается все эффективней. Таким образом, мы доказали возрастание системности человеческой практики.

Природная системность человеческой практики является одним из объективных факторов возникновения и развития системных понятий и теорий. Естественный, спонтанный рост системности человеческой деятельности сопровождается, дополняется осознанием этой системности, а затем ускоряется ее сознательным повышением. Роль знания и соблюдения принципов системности в практике возрастает. Алгоритмичность любого вида деятельности – важный способ повышения ее системности.

## **Тема 2. Закономерности функционирования и развития систем**

Различные подходы к определению системы: число элементов, способ описания. Выбор определения понятия “система” на различных этапах системного представления объекта. Характерные признаки системы. Классификация систем: физические и абстрактные системы, естественные и искусственные, живые и неживые, статические и динамические. Дискретные, непрерывные и импульсные системы; ограниченные и неограниченные, закрытые и открытые. Технические, организационно-технические и социальные системы. Общие системы, или системы в целом. Информационно-измерительные системы.

Понятия, определяющие строение и функционирование систем. Элементы. Классификация элементов. Компоненты и подсистемы. Связи. Цель. Структура. Внешняя среда. Надсистема. Подведомственные системы. Система в целом. Состояние. Поведение. Равновесие. Устойчивость. Развитие.

Элементы и подсистемы. Входные элементы, ресурсы и затраты.

Выходные элементы, результаты и прибыль. Установление границ системы: система в целом, полная система и подсистемы. Окружающая среда.

Назначение и функция. Признаки, характеризующие элементы системы. Задачи и цели. Классификация целей: общественные цели; цели, связанные с результатами работы; цели системы; цели, связанные с характеристиками продукции и услуг; производственные цели; цели организации и личные цели.

Меры эффективности (критерии достижения целей). Компоненты, программы, задания (работы). Руководители, ЛПР и исполнители. Принятие решений в системах. Структура системы. Состояния и потоки. Поведение системы.

Уровень анализа. Деятельность системы. Организация системы.

Примеры применения системного подхода к изучению систем различной природы: информационно-измерительных, экономических, управленческих.

Свойства систем. Общие свойства систем. Структурные свойства. Динамические свойства. Свойства, характеризующие описание и управление. Свойства организационно-технических систем. Инерционность систем. Оценка свойств систем.

Сложность систем. Сложность при решении системных задач и ее оценка.

Три степени сложности. Меры сложности систем. Многоаспектность понятия сложности: структурная сложность, динамическая сложность, вычислительная сложность. Основные принципы оценки сложности системы: описательная (дескриптивная) сложность, неполнота информации о системе. Классификация задач по сложности. Экономическая оценка исследования системы.

### **Функционирование и развитие системы**

Рассматриваются основные понятия, касающиеся поведения систем - функционирование и развитие (эволюция), а также саморазвитие систем, необходимые для их изучения понятия теории отношений и порядка.

**Цель лекции:** введение в основы деятельности систем - функционирование и развитие, саморазвитие, необходимый математический аппарат для их рассмотрения - алгебру отношений. Деятельность (работа) системы может происходить в двух основных режимах: развитие (эволюция) и функционирование.

Функционированием называется деятельность, работа системы без смены (главной) цели системы. Это проявление функции системы во времени.

Развитием называется деятельность системы со сменой цели системы.

При функционировании системы явно не происходит качественного изменения инфраструктуры системы; при развитии системы ее инфраструктура качественно изменяется.

Развитие - борьба организации и дезорганизации в системе, она связана с накоплением и усложнением информации, ее организации.

Пример. Информатизация страны в ее наивысшей стадии - всемерное использование различных баз знаний, экспертных систем, когнитивных методов и средств, моделирования, коммуникационных средств, сетей связи, обеспечение информационной а, следовательно, любой безопасности и др.; это революционное изменение, развитие общества. Компьютеризация общества, региона, организации без постановки новых актуальных проблем, т.е. "навешивание компьютеров на старые методы и технологии обработки информации" - это функционирование, а не развитие. Упадок моральных и этических ценностей в обществе, потеря цели в жизни могут также привести к "функционированию" не только отдельных людей, но и социальных слоев.

Любая актуализация информации связана с актуализацией вещества, энергии и наоборот.

Пример. Химическое развитие, химические реакции, энергия этих реакций в организмах людей приводят к биологическому росту, движению, накоплению биологической энергии; эта энергия - основа информационного развития, информационной энергии; последняя определяет энергетику социального движения и организации в обществе.

Пример. Классически принято считать, что в процессе фотосинтеза выделяется кислород и поглощается углекислота (в растениях, водорослях и некоторых микроорганизмах) и одновременно под воздействием света выделяется углекислота и поглощается кислород, - происходит дыхание (или, точнее, фотодыхание). Биоэнергетическое уравнение фотосинтеза и дыхания растений (организмов) имеет вид



аналитической, таким образом, имелась некоторая неустойчивость, так как задание лишь первых четырех членов этого ряда могло привести к неверным выводам о поведении системы.

Основные признаки развивающихся систем:

самопроизвольное изменение состояния системы;  
противодействие (реакция) влиянию окружающей среды (другим системам), приводящее к изменению первоначального состояния среды;  
постоянный поток ресурсов (постоянная работа по их перетоку "среда-система"), направленный против уравнивания их потока с окружающей средой.

Если развивающаяся система эволюционирует за счет собственных материальных, энергетических, информационных, человеческих или организационных ресурсов внутри самой системы, то такие системы называются саморазвивающимися (самодостаточно развивающимися). Это форма развития системы - "самая желанная" (для поставленной цели).

Пример. Если на рынке труда повысится спрос на квалифицированный труд, то появится стремление к росту квалификации, образования, что приведет к появлению новых образовательных услуг, качественно новых форм повышения квалификации, например, дистанционных. Развитие фирмы, появление сети филиалов может привести к новым организационным формам, в частности, к компьютеризованному офису, более того, - к высшей стадии развития автоматизированного офиса - виртуальному офису или же виртуальной корпорации. Нехватка времени для шоппинга, например, у занятых и компьютерно грамотных молодых людей с достаточным заработком ("яппи") повлияло на возникновение и развитие интернет-торговли.

Для оценки развития, развиваемости системы часто используют не только качественные, но и количественные оценки, а также оценки смешанного типа.

Пример. В системе ООН для оценки социально-экономического развития стран используют индекс HDI (Human Development Index - индекс человеческого развития, потенциала), который учитывает 4 основных параметра, изменяемых от минимальных до максимальных своих значений:

1. ожидаемая продолжительность жизни населения (25-85 лет);
2. уровень неграмотности взрослого населения (0-100 %);
3. средняя продолжительность обучения населения в школе (0-15 лет);
4. годовой доход на душу населения (200-40000 \$).

Эти сведения приводятся к общему значению HDI, по которому все страны делятся ООН на высокоразвитые, среднеразвитые и низкоразвитые. Страны с развивающимися (саморазвивающимися) экономическими, правовыми, политическими, социальными, образовательными институтами характерны высоким уровнем HDI. В свою очередь, изменение уровня HDI (параметров, от которых он зависит) влияет на саморазвиваемость указанных институтов, в первую очередь - экономических, в частности, саморегулируемость спроса и предложения, отношений производителя и потребителя, товара и стоимости, обучения и стоимости обучения. Уровень HDI, наоборот, также может привести к переходу страны из одной категории (развитости по данному критерию) в другую, в частности, если в 1994 году Россия стояла на 34 месте в мире (из 200 стран), то в 1996 году - уже на 57-м месте; это приводит к изменениям и во

взаимоотношениях с окружающей средой (в данном случае - в политике).

Гибкость системы будем понимать как способность к структурной адаптации системы в ответ на воздействия окружающей среды.

Пример. Гибкость экономической системы - способность к структурной адаптации к изменяющимся социально-экономическим условиям, способность к регулированию, к изменениям экономических характеристик и условий.

Траектория системы определяется ее структурой, элементами, окружением. Для простых систем (будем понимать такие системы как системы не свободные в выборе поведения) траекторию можно изменить, лишь изменив элементы, структуру, окружение. Для непростых (сложных - ниже о них подробнее идет речь) систем изменение траектории может произойти и по другим причинам.

Под регулированием (системы, поведения системы, траектории системы) понимается коррекция управляющих параметров по наблюдениям за траекторией поведения системы с целью возвращения системы в нужное состояние, на нужную траекторию поведения. Под траекторией системы понимается последовательность принимаемых при функционировании системы состояний, которые рассматриваются как некоторые точки во множестве состояний системы. Для физических, биологических и других систем - это фазовое пространство.

### **Тема 3. Моделирование систем**

Моделирование как метод научного познания. Методологические основы моделирования систем. Общая характеристика проблемы моделирования систем. Характеристики моделей систем. Цели моделирования систем.

Основные проблемы теории систем. Проблема анализа. Алгоритм анализа. Проблема синтеза. Алгоритм синтеза. Проблема оценки внешней среды. Проблема «черного ящика».

Некоторые задачи исследования операций: задача планирования производства, транспортная задача, задача составления расписаний. Типы ограничений, используемых в задаче составления расписаний: ограничения, описывающие взаимную зависимость работ: ограничения на объемы ресурсов для выполнения работ.

Модели и моделирование. Принципы отбора, используемые при моделировании на разных уровнях организации систем. Физические и критериальные ограничения. Механизмы поддержания равновесия в системах: энтропийный, гомеостатический, морфогенетический. Роль обратной связи и информации для поддержания стабильности систем. Управляемые системы рефлексивного типа. Моделирование поведения организационно-технических и социальных систем. Кибернетические системы. Модели без управления. Оптимизационные системы. Модели для анализа конфликтных ситуаций. Взаимосвязь модели структуры, модели программы и модели поведения. Отношение изоморфизма как основа определения понятия модели. Методы описания поведения систем: структурно-параметрические, функционально-операторные, информационные, целевого управления.

Методы моделирования систем. Моделирование сложных систем и проблема принятия решения. Формирование критериальных функций на основе многоуровневого представления. Классификация методов моделирования сложных систем.

Количественные методы формализованного представления систем. Аналитические методы, статистические методы, методы дискретной математики,

методы, основанные на теоретико-множественном представлении систем, логические методы, лингвистические представления, графические методы.

Качественные методы формализованного представления систем. Методы экспертных оценок, методы типа Делфи, методы типа деревьев целей, морфологические методы, методы типа сценариев, методы коллективной генерации идей.

Специальные методы моделирования систем. Системно-структурное моделирование. Ситуационное моделирование. Имитационное моделирование. Машинные методы моделирования систем.

*Модель и моделирование* - универсальные понятия, атрибуты одного из наиболее мощных методов познания в любой профессиональной области, познания системы, процесса, явления.

Вид *моделей* и методы ее исследования больше зависят от информационно - логических связей элементов и подсистем моделируемой системы, ресурсов, связей с окружением, а не от конкретного наполнения системы.

**У моделей, особенно математических, есть особенность - развитие модельного стиля мышления, позволяющего вникать в структуру и внутреннюю логику моделируемой системы.**

Построение *моделей* - системная задача, требующая анализа и синтеза исходных данных, гипотез, теорий, знаний специалистов. Системный подход позволяет не только построить *модель* реальной системы, но и использовать эту *модель* для оценки (например, эффективности управления, функционирования) системы.

***Модель* - это объект или описание объекта, системы для замещения одной системы (оригинала) другой системой для лучшего изучения оригинала или воспроизведения каких-либо его свойств.**

Например, отображая физическую систему на математическую систему, получим математическую *модель* физической системы. Любая *модель* строится и исследуется при определенных допущениях, гипотезах.

Пример. Рассмотрим физическую систему: тело массой  $m$  скатывающееся по наклонной плоскости с ускорением  $a$ , на которое воздействует сила  $F$ .

Исследуя такие системы, Ньютон получил математическое соотношение:

$$F = m \cdot a.$$

Это физико-математическая *модель* системы или математическая *модель* физической системы.

При описании этой системы приняты следующие гипотезы:

1. поверхность идеальна (т.е. коэффициент трения равен нулю);
2. тело находится в вакууме (т.е. сопротивление воздуха равно нулю);
3. масса тела неизменна;
4. тело движется с одинаковым постоянным ускорением в любой точке.

Пример. Физиологическая система (система кровообращения человека) - подчиняется некоторым законам термодинамики. Описывая эту систему на физическом (термодинамическом) языке балансовых законов, получим физическую, термодинамическую *модель* физиологической системы. Если записать эти законы на математическом языке, т.е. соответствующие термодинамические уравнения, то уже получаем математическую *модель* системы кровообращения.

Пример. Совокупность предприятий функционирует на рынке, обмениваясь товарами, сырьем, услугами, информацией. Если описать экономические законы, правила их взаимодействия на рынке с помощью математических соотношений, например, системы алгебраических уравнений, где неизвестными будут величины прибыли, получаемые от взаимодействия предприятий, а коэффициентами уравнения будут значения интенсивностей таких взаимодействий, то получим экономико-математическую *модель* системы предприятий на рынке.

Если банк выработал стратегию кредитования, смог описать ее с помощью экономико - математических *моделей* и прогнозирует свою тактику кредитования, то он имеет большую устойчивость и жизнеспособность.

Слово "*модель*" (лат. modelium) означает "мера", "способ", "сходство с какой-то вещью".

**Моделирование** базируется на математической теории подобия, согласно которой абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим точно таким же.

При *моделировании* большинства систем абсолютное подобие невозможно, и основная цель *моделирования* - модель достаточно хорошо должна отображать функционирование моделируемой системы.

По уровню, "глубине" моделирования модели бывают:

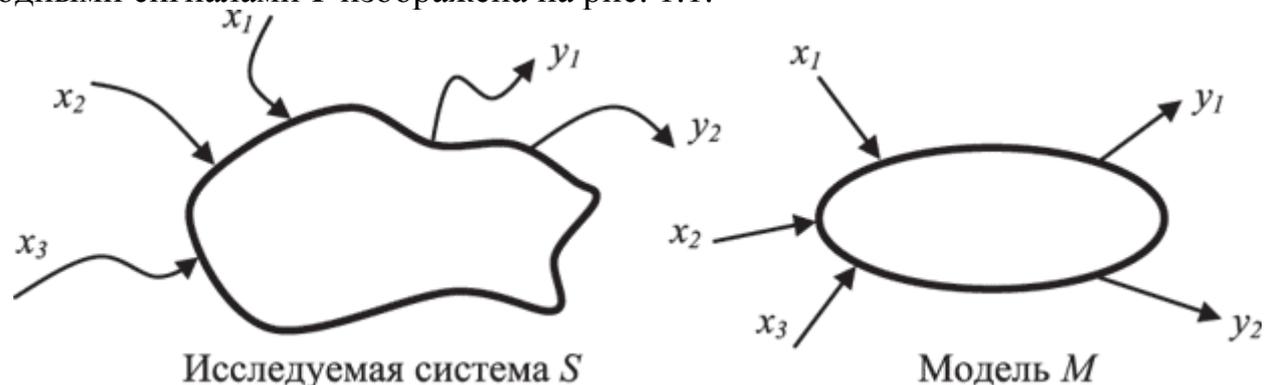
1. эмпирические - на основе эмпирических фактов, зависимостей;
2. теоретические - на основе математических описаний;
3. смешанные, полуэмпирические - на основе эмпирических зависимостей и математических описаний.

Проблема моделирования состоит из трех задач:

1. построение *модели* (эта задача менее формализуема и конструктивна, в том смысле, что нет алгоритма для построения *моделей*);
2. исследование *модели* (эта задача более формализуема, имеются методы исследования различных классов *моделей*);
3. использование *модели* (конструктивная и конкретизируемая задача).

*Модель*  $M$ , описывающая систему  $S(x_1, x_2, \dots, x_n; R)$ , имеет вид:  $M = (z_1, z_2, \dots, z_m; Q)$ , где  $z_i \in Z$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $Q, R$  - множества отношений над  $X$  - множеством входных, выходных сигналов и состояний системы,  $Z$  - множество описаний, представлений элементов и подмножеств  $X$ .

Схема построения модели  $M$  системы  $S$  с входными сигналами  $X$  и выходными сигналами  $Y$  изображена на рис. 1.1.



**Рис. 1.1.** Схема построения модели

Если на вход  $M$  поступают сигналы из  $X$  и на выходе появляются сигналы  $Y$ , то задан закон (правило  $f$  функционирования модели) системы.

**Моделирование** - это универсальный метод получения описания функционирования объекта и использования знаний о нем. Моделирование используется в любой профессиональной деятельности

Классификацию *моделей* проводят по различным критериям.

*Модель* называется **статической**, если среди параметров, участвующих в ее описании, нет временного параметра.  $\wedge$  *Статическая модель* в каждый момент времени дает лишь "фотографию" системы, ее срез.

Пример. Закон Ньютона  $F=a*m$  - это *статическая модель* движущейся с ускорением  $a$  материальной точки массой  $m$ . Эта *модель* не учитывает изменение ускорения от одной точки к другой.

$\wedge$  *Модель динамическая*, если среди ее параметров есть временной параметр, т.е. она отображает систему (процессы в системе) во времени.

Пример. *Динамическая модель* закона Ньютона будет иметь вид:

$$F(t)=a(t)*m(t).$$

*Модель дискретная*, если она описывает поведение системы только в дискретные моменты времени.

Пример. Если рассматривать только  $t=0, 1, 2, \dots, 10$  (сек), то *модель*  $S_t=gt^2/2$  или числовая последовательность  $S_0=0, S_1=g/2, S_2=2g, S_3=9g/2, \dots, S_{10}=50g$  может служить *дискретной моделью* движения свободно падающего тела.

*Модель непрерывная*, если она описывает поведение системы для всех моментов времени некоторого промежутка времени.

Пример. *Модель*  $S=gt^2/2, 0 < t < 100$  непрерывна на промежутке времени  $(0;100)$ .

*Модель имитационная*, если она предназначена для испытания или изучения возможных путей развития и поведения объекта путем варьирования некоторых или всех параметров *модели*.

Пример. Пусть *модель* экономической системы производства товаров двух видов 1 и 2, в количестве  $x_1$  и  $x_2$  единиц и стоимостью каждой единицы товара  $a_1$  и  $a_2$  на предприятии описана в виде соотношения:

$$a_1x_1 + a_2x_2 = S,$$

где  $S$  - общая стоимость произведенной предприятием всей продукции (вида 1 и 2). Можно ее использовать в качестве *имитационной модели*, по которой можно определять (варьировать) общую стоимость  $S$  в зависимости от тех или иных значений объемов производимых товаров.

*Модель детерминированная*, если каждому входному набору параметров соответствует вполне определенный и однозначно определяемый набор выходных параметров; в противном случае - *модель недетерминированная, стохастическая* (вероятностная).

Пример. Приведенные выше физические *модели* - детерминированные. Если в *модели*  $S = gt^2/2, 0 < t < 100$  мы учли бы случайный параметр - порыв ветра с силой  $p$  при падении тела:

$$S(p) = g(p) t^2/2, 0 < t < 100,$$

то мы получили бы *стохастическую модель* (уже не свободного!) падения.

*Модель функциональная*, если она представима в виде системы каких-либо функциональных соотношений.

**Модель теоретико-множественная**, если она представима с помощью некоторых множеств и отношений принадлежности им и между ними.

*Пример.* Пусть задано множество  $X = \{\text{Николай, Петр, Николаев, Петров, Елена, Екатерина, Михаил, Татьяна}\}$  и отношения: Николай - супруг Елены, Екатерина - супруга Петра, Татьяна - дочь Николая и Елены, Михаил - сын Петра и Екатерины, семьи Михаила и Петра дружат друг с другом. Тогда множество  $X$  и множество перечисленных отношений  $Y$  могут служить *теоретико-множественной моделью* двух дружественных семей.

**Модель логическая**, если она представима предикатами, логическими функциями.

Например, совокупность двух логических функций вида:

$$z = x \wedge y \vee x \wedge \neg y, p = x \wedge y$$

может служить математической моделью одноразрядного сумматора.

**Модель игровая**, если она описывает, реализует некоторую игровую ситуацию между участниками игры (лицами, коалициями).

*Пример.* Пусть игрок 1 - добросовестный налоговый инспектор, а игрок 2 - недобросовестный налогоплательщик. Идет процесс (игра) по уклонению от налогов (с одной стороны) и по выявлению сокрытия уплаты налогов (с другой стороны). Игроки выбирают натуральные числа  $i$  и  $j$  ( $i, j \leq n$ ), которые можно отождествить, соответственно, со штрафом игрока 2 за неуплату налогов при обнаружении факта неуплаты игроком 1 и с временной выгодой игрока 2 от сокрытия налогов. Рассмотрим матричную игру с матрицей выигрышей порядка  $n$ . Каждый элемент этой матрицы  $A$  определяется по правилу  $a_{ij} = |i - j|$ . *Модель* игры описывается этой матрицей и стратегией уклонения и поимки. Эта игра - антагонистическая.

**Модель алгоритмическая**, если она описана некоторым алгоритмом или комплексом алгоритмов, определяющим ее функционирование, развитие.

Нужно помнить, что не все *модели* могут быть исследованы или реализованы алгоритмически.

*Пример.* Моделью вычисления суммы бесконечного убывающего ряда чисел может служить алгоритм вычисления конечной суммы ряда до некоторой заданной степени точности. Алгоритмической *моделью* корня квадратного из числа  $x$  может служить алгоритм вычисления его приближенного сколь угодно точного значения по известной рекуррентной формуле.

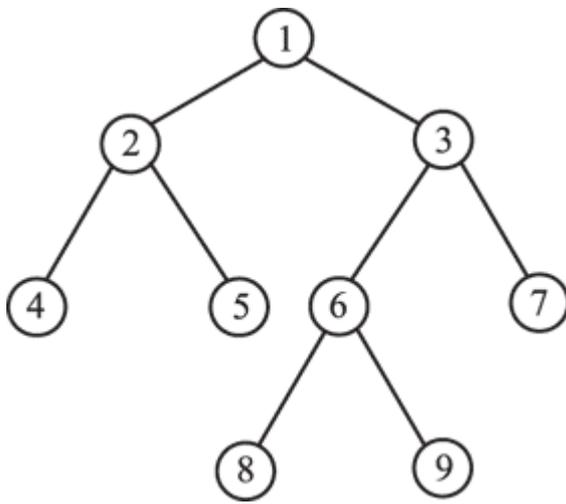
**Модель структурная**, если она представима структурой данных или структурами данных и отношениями между ними.

Например, *структурной моделью* может служить описание (табличное, графическое, функциональное или другое) структуры экосистемы.

**Модель графовая**, если она представима графом или графами и отношениями между ними.

**Модель иерархическая** (древовидная), если представима некоторой иерархической структурой (деревом).

*Пример.* Для решения задачи нахождения маршрута в дереве поиска можно построить, например, *древовидную модель* (рис. 1.2):



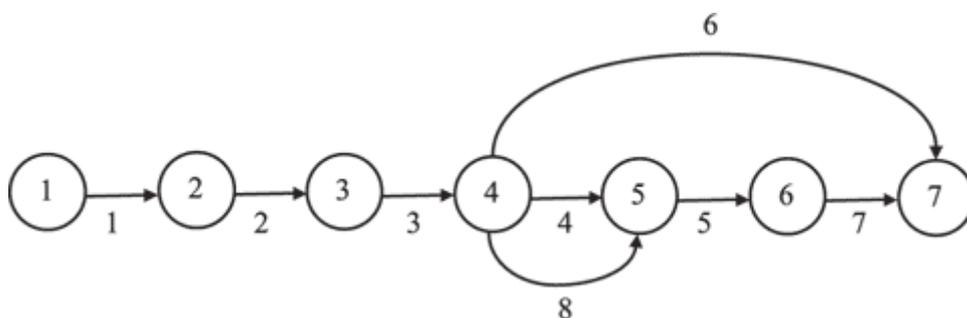
**Рис. 1.2.** Модель иерархической структуры

*Модель сетевая*, если она представима некоторой сетевой структурой.

Пример. Строительство нового дома включает операции, приведенные в нижеследующей таблице.

^ Таблица работ при строительстве дома			
Операция	Время выполнения (дни)	^ Предшествующие операции	Дуги графа
Расчистка участка	1	нет	-
2 Закладка фундамента	4	Расчистка участка (1)	1-2
3 Возведение стен	4	Закладка фундамента (2)	2-3
4 Монтаж электропроводки	3	Возведение стен (3)	3-4
5 Штукатурные работы	4	Монтаж электропроводки (4)	4-5
6 Благоустройство территории	6	Возведение стен (3)	3-6
7 Отделочные работы	4	Штукатурные работы (5)	5-7
8 Настил крыши	5	Возведение стен (3)	3-8

*Сетевая модель* (сетевой график) строительства дома дана на рис. 1.3.



**Рис. 1.3.** Сетевой график строительства работ

Две работы, соответствующие дуге 4-5, параллельны, их можно либо заменить одной, представляющей совместную операцию (монтаж электропроводки и настил крыши) с новой операцией длительностью  $3 + 5 = 8$ , либо ввести на одной дуге фиктивное событие.

*Модель языковая, лингвистическая*, если она представлена некоторым лингвистическим объектом, формализованной языковой системой или структурой.

Иногда такие *модели* называют вербальными, синтаксическими.

Например, правила дорожного движения - языковая, *структурная модель* движения транспорта и пешеходов на дорогах.

Пусть  $B$  - множество производящих основ существительных,  $C$  - множество суффиксов,  $P$  - прилагательных, " " - операция конкатенации слов, " := " - операция присваивания, " => " - операция вывода (выводимости новых слов),  $Z$  - множество значений (смысловых) прилагательных. Языковая *модель*  $M$  словообразования:  $\langle r_i \rangle = \langle b_i \rangle \langle c_i \rangle$ . При  $b_i$  - "рыб(а)",  $c_i$  - "н(ый)", получаем по этой *модели*  $r_i$  - "рыбный",  $z_i$  - "приготовленный из рыбы".

*Модель визуальная*, если она позволяет визуализировать отношения и связи моделируемой системы, особенно в динамике.

Например, на экране компьютера часто пользуются *визуальной моделью* того или иного объекта, например, клавиатуры в программе - тренажере по обучению работе на клавиатуре.

*Модель натурная*, если она есть материальная копия объекта *моделирования*.

Например, глобус - натурная географическая *модель* земного шара.

*Модель геометрическая, графическая*, если она представима геометрическими образами и объектами.

Например, макет дома является натурной *геометрической моделью* строящегося дома. Вписанный в окружность многоугольник дает *модель* окружности. Именно она используется при изображении окружности на экране компьютера. Прямая линия является *моделью* числовой оси, а плоскость часто изображается как параллелограмм.

*Модель клеточно-автоматная*, если она представляет систему с помощью клеточного автомата или системы клеточных автоматов.

Клеточный автомат - дискретная динамическая система, аналог физического (непрерывного) поля. Клеточно-автоматная геометрия - аналог евклидовой геометрии. Неделимый элемент евклидовой геометрии - точка, на основе ее строятся отрезки, прямые, плоскости и т.д.

Неделимый элемент клеточно-автоматного поля - клетка, на основе её строятся кластеры клеток и различные конфигурации клеточных структур. Представляется клеточный автомат равномерной сетью клеток ("ячеек") этого поля. Эволюция клеточного автомата разворачивается в дискретном пространстве

- клеточном поле.

Смена состояний в клеточно-автоматном поле происходит одновременно и параллельно, а время идет дискретно. Несмотря на кажущуюся простоту их построения, клеточные автоматы могут демонстрировать разнообразное и сложное поведение.

В последнее время они широко используются при *моделировании* не только физических, но и социально-экономических процессов.

#### 4. Классификация систем

Системы: конкретные и абстрактные; естественные и искусственные; вещественные, энергетические и информационные; целенаправленные, нецеленаправленные и целеустремлённые; простые, сложные и очень сложные; большие и малые; динамические и статические. Смешанные и адаптивные системы. «Предметные» классификации систем. Классификация систем на основе атрибутивных системных параметров.

Рассматриваются основные типы и классы систем, понятия большой и сложной системы, типы сложности систем, примеры способов определения (оценки) сложности.

**Цель лекции:** введение в способы классификации систем, большие и сложные системы.

Классификацию систем можно осуществить по разным критериям. Проводить ее жестко - невозможно, она зависит от цели и ресурсов. Приведем основные способы классификации (возможны и другие критерии классификации систем).

По отношению системы к окружающей среде:

- открытые (есть обмен ресурсами с окружающей средой);
- закрытые (нет обмена ресурсами с окружающей средой).

По происхождению системы (элементов, связей, подсистем):

- искусственные (орудия, механизмы, машины, автоматы, роботы и т.д.);
- естественные (живые, неживые, экологические, социальные и т.д.);
- виртуальные (воображаемые и, хотя реально не существующие, но функционирующие так же, как и в случае, если бы они существовали);
- смешанные (экономические, биотехнические, организационные и т.д.).

По описанию переменных системы:

- с качественными переменными (имеющие лишь содержательное описание);
- с количественными переменными (имеющие дискретно или непрерывно описываемые количественным образом переменные);
- смешанного (количественно-качественное) описания.

По типу описания закона (законов) функционирования системы:

- типа "Черный ящик" (неизвестен полностью закон функционирования системы; известны только входные и выходные сообщения);
- не параметризованные (закон не описан; описываем с помощью хотя бы неизвестных параметров; известны лишь некоторые априорные свойства закона);
- параметризованные (закон известен с точностью до параметров и его возможно отнести к некоторому классу зависимостей);

- типа "Белый (прозрачный) ящик" (полностью известен закон).

По способу управления системой (в системе):

- управляемые извне системы (без обратной связи, регулируемые, управляемые структурно, информационно или функционально);
- управляемые изнутри (самоуправляемые или саморегулируемые - программно управляемые, регулируемые автоматически, адаптируемые - приспособляемые с помощью управляемых изменений состояний, и самоорганизующиеся - изменяющие во времени и в пространстве свою структуру наиболее оптимально, упорядочивающие свою структуру под воздействием внутренних и внешних факторов);
- с комбинированным управлением (автоматические, полуавтоматические, автоматизированные, организационные).

Пример. Рассмотрим экологическую систему "Озеро". Это открытая, естественного происхождения система, переменные которой можно описывать смешанным образом (количественно и качественно, в частности, температура водоема - количественно описываемая характеристика), структуру обитателей озера можно описать и качественно, и количественно, а красоту озера можно описать качественно. По типу описания закона функционирования системы, эту систему можно отнести к не параметризованной в целом, хотя возможно выделение подсистем различного типа, в частности, различного описания подсистемы "Водоросли", "Рыбы", "Впадающий ручей", "Вытекающий ручей", "Дно", "Берег" и др. Система "Компьютер" - открытая, искусственного происхождения, смешанного описания, параметризованная, управляемая извне (программно). Система "Логический диск" - открытая, виртуальная, количественного описания, типа "Белый ящик" (при этом содержимое диска мы в эту систему не включаем!), смешанного управления. Система "Фирма" - открытая, смешанного происхождения (организационная) и описания, управляемая изнутри (адаптируемая, в частности, система).

Система называется большой, если ее исследование или моделирование затруднено из-за большой размерности, т.е. множество состояний системы  $S$  имеет большую размерность. Какую же размерность нужно считать большой? Об этом мы можем судить только для конкретной проблемы (системы), конкретной цели исследуемой проблемы и конкретных ресурсов.

Большая система сводится к системе меньшей размерности использованием более мощных вычислительных средств (или ресурсов) либо разбиением задачи на ряд задач меньшей размерности (если это возможно).

Пример. Это особенно актуально при разработке больших вычислительных систем, например, при разработке компьютеров с параллельной архитектурой или алгоритмов с параллельной структурой данных и с их параллельной обработкой.

Почти во всех учебниках можно встретить словосочетания "сложная задача", "сложная проблема", "сложная система" и т.п. Интуитивно, как правило, под этими понятиями понимается какое-то особое поведение системы или процесса, делающее невозможным (непреодолимая сложность) или особо трудным (преодолимая сложность) описание, исследование, предсказание или оценку поведения, развития системы.

Определения сложности - различны.

Система называется сложной, если в ней не хватает ресурсов (главным образом, информационных) для эффективного описания (состояний, законов

функционирования) и управления системой - определения, описания управляющих параметров или для принятия решений в таких системах (в таких системах всегда должна быть подсистема принятия решения).

Сложной считают иногда такую систему, для которой по ее трем видам описания нельзя выявить ее траекторию, сущность, и поэтому необходимо еще дополнительное интегральное описание (интегральная модель поведения, или конфигуратор) - морфолого-функционально-инфологическое.

Пример. Сложными системами являются, например, химические реакции, если их исследовать на молекулярном уровне; клетка биологического образования, взятая на метаболическом уровне; мозг человека, если его исследовать с точки зрения выполняемых человеком интеллектуальных действий; экономика, рассматриваемая на макроуровне (т.е макроэкономика); человеческое общество - на политико-религиозно-культурном уровне; ЭВМ (особенно пятого поколения) как средство получения знаний; язык - во многих аспектах его рассмотрения.

В сложных системах результат функционирования не может быть задан заранее, даже с некоторой вероятностной оценкой адекватности. Причины такой неопределенности - как внешние, так и внутренние, как в структуре, так и в описании функционирования, эволюции. Сложность этих систем обусловлена их сложным поведением. Сложность системы зависит от принятого уровня описания или изучения системы - макроскопического или микроскопического. Сложность системы может определяться не только большим количеством подсистем и сложной структурой, но и сложностью поведения.

Сложность системы может быть внешней и внутренней.

Внутренняя сложность определяется сложностью множества внутренних состояний, потенциально оцениваемых по проявлениям системы и сложности управления в системе.

Внешняя сложность определяется сложностью взаимоотношений с окружающей средой, сложностью управления системой, потенциально оцениваемых по обратным связям системы и среды.

Сложные системы бывают разных типов сложности:

- структурной или организационной (не хватает ресурсов для построения, описания, управления структурой);
- динамической или временной (не хватает ресурсов для описания динамики поведения системы и управления ее траекторией);
- информационной или информационно-логической, инфологической (не хватает ресурсов для информационного, информационно-логического описания системы);
- вычислительной или реализации, исследования (не хватает ресурсов для эффективного прогноза, расчетов параметров системы, или их проведение затруднено из-за нехватки ресурсов);
- алгоритмической или конструктивной (не хватает ресурсов для описания алгоритма функционирования или управления системой, для функционального описания системы);
- развития или эволюции, самоорганизации (не хватает ресурсов для устойчивого развития, самоорганизации).

Чем сложнее рассматриваемая система, тем более разнообразные и более сложные внутренние информационные процессы приходится актуализировать для

того, чтобы была достигнута цель системы, т.е. система функционировала или развивалась.

Пример. Поведение ряда различных реальных систем (например, соединенных между собой проводников с сопротивлениями  $x_1, x_2, \dots, x_n$  или химических соединений с концентрациями  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , участвующих в реакции химических реагентов) описывается системой линейных алгебраических уравнений, записываемых в матричном виде:

$$X = AX + B$$

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ b_n \end{pmatrix}$$

Заполнение матрицы  $A$  (ее структура) будет отражать сложность описываемой системы. Если, например, матрица  $A$  - верхнетреугольная матрица (элемент, расположенный на пересечении  $i$ -ой строки и  $j$ -го столбца всегда равен 0 при  $i > j$ ), то независимо от  $n$  (размерности системы) она легко исследуется на разрешимость. Для этого достаточно выполнить обратный ход метода Гаусса. Если же матрица  $A$  - общего вида (не является ни симметричной, ни ленточной, ни разреженной и т.д.), то систему сложнее исследовать (так как при этом необходимо выполнить более сложную вычислительно и динамически процедуру прямого хода метода Гаусса). Следовательно, система будет обладать структурной сложностью (которая уже может повлечь за собой и вычислительную сложность, например, при нахождении решения). Если число  $n$  достаточно велико, то неразрешимость задачи хранения матрицы  $A$  верхнетреугольного вида в оперативной памяти компьютера может стать причиной вычислительной и динамической сложности исходной задачи. Попытка использовать эти данные путем считывания с диска приведет к многократному увеличению времени счета (увеличит динамическую сложность - добавятся факторы работы с диском).

Пример. Пусть имеется динамическая система, поведение которой описывается задачей Коши вида

$$y'(t) = ky(t), y(0) = a$$

Эта задача имеет решение:

$$y(t) = ae^{-kt}$$

Отсюда видно, что  $y(t)$  при  $k=10$  изменяется на порядок быстрее, чем  $y(t)$  при  $k=1$ , и динамику системы сложнее будет отслеживать: более точное предсказание для  $t \rightarrow 0$  и малых  $k$  связано с дополнительными затратами на вычисления. Следовательно, алгоритмически, информационно, динамически и структурно "не очень сложная система" (при  $a, k \neq 0$ ) может стать вычислительно и, возможно, эволюционно сложной (при  $t \rightarrow 0$ ), а при больших  $t$  ( $t \rightarrow \infty$ ) - и непредсказуемой. Например, для больших  $t$  значения накапливаемых погрешностей вычислений решения могут перекрыть значения самого решения. Если при этом задавать нулевые начальные данные  $a \neq 0$ , то система может перестать быть, например, информационно несложной, особенно, если  $a$  трудно априорно определить.

Пример. Упрощение технических средств работы в сетях, например, научные достижения, позволяющие подключать компьютер непосредственно к сети, "к розетке электрической сети", наблюдается наряду с усложнением самих сетей, например, с увеличением количества абонентов и информационных потоков в интернет. Наряду с усложнением самой сети интернет, упрощаются (для пользователя!) средства доступа к ней, увеличиваются ее вычислительные возможности.

Структурная сложность системы оказывает влияние на динамическую, вычислительную сложность. Изменение динамической сложности может привести к изменениям структурной сложности, хотя это не является обязательным условием. Сложной системой может быть и система, не являющаяся большой системой; существенным при этом может стать связность (сила связности) элементов и подсистем системы (см. вышеприведенный пример с матрицей системы линейных алгебраических уравнений).

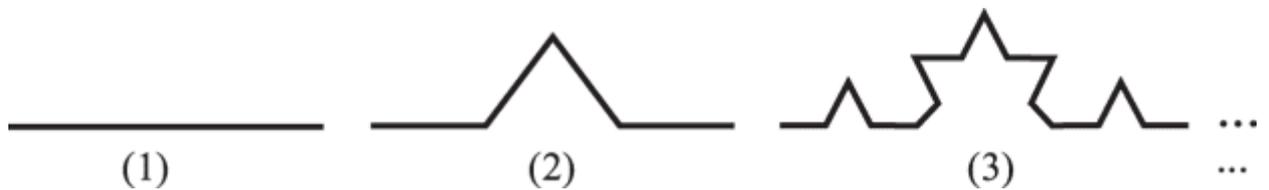
Сложность системы определяется целями и ресурсами (набором задач, которые она призвана решать).

Пример. Сложность телекоммуникационной сети определяется:

- необходимой скоростью передачи данных;
- протоколами, связями и типами связей (например, для селекторного совещания необходима голосовая телеконференция);
- необходимостью видеосопровождения.

Само понятие сложности системы не является чем-то универсальным, неизменным и может меняться динамически, от состояния к состоянию. При этом и слабые связи, взаимоотношения подсистем могут повышать сложность системы.

Пример. Рассмотрим процедуру деления единичного отрезка  $[0; 1]$  с последующим выкидыванием среднего из трех отрезков и достраиванием на выкинутом отрезке равностороннего треугольника (рис. 4.1); эту процедуру будем повторять каждый раз вновь к каждому из остающихся после выкидывания отрезков. Этот процесс является структурно простым, но динамически сложным, более того, образуется динамически интересная и трудно прослеживаемая картина системы, становящейся "все больше и больше, все сложнее и сложнее". Такого рода структуры называются фракталами, или фрактальными структурами (фрактал - от fraction - "дробь" и fracture - "излом", т.е. изломанный объект с дробной размерностью). Его отличительная черта - самоподобие, т.е. сколь угодно малая часть фрактала по своей структуре подобна целому, как ветка - дереву.



**Рис. 4.1.** Фрактальный объект (кривая Коха)

Уменьшив сложность системы, часто можно увеличить ее информативность, исследуемость.

Пример. Выбор рациональной проекции пространственного объекта (т.е. более оптимальная визуализация связей и отношений его частей) делает чертеж более информативным. Используя в качестве устройства эксперимента микроскоп, можно рассмотреть некоторые невидимые невооруженным глазом свойства объекта.

Система называется связной, если любые две подсистемы обмениваются ресурсом, т.е. между ними есть некоторые ресурсоориентированные отношения, связи.

При определении меры сложности системы важно выделить инвариантные свойства систем или информационные инварианты и вводить меру сложности систем на основе их описаний.

Здесь приводится математический аппарат, позволяющий формализовать понятие сложности, хотя отметим, что понятие сложности - "сложное".

Мерой ниже будем называть некоторую непрерывную действительную неотрицательную функцию, определенную на множестве событий (систем, множеств) и являющуюся аддитивной, т.е. мера конечного объединения событий (систем, множеств) равна сумме мер каждого события.

Как же определять меру сложности для систем различной структуры? Ответ на этот не менее сложный вопрос не может быть однозначным и даже вполне определённым.

Сложность связывается с мерой  $\mu(S)$  - мерой сложности или числовой неотрицательной функцией (критерием, шкалой) заданной (заданным) на некотором множестве элементов и подсистем системы  $S$ .

Возможны различные способы определения меры сложности систем. Сложность структуры системы можно определять топологической энтропией - сложностью конфигурации структуры (системы):

$$S = k \ln W,$$

где  $k=1,38 \times 10^{-16}$  (эрг / град) - постоянная Больцмана,  $W$  - вероятность состояния системы. В случае разной вероятности состояний эта формула будет иметь вид (мы ниже вернемся к детальному обсуждению этой формулы и ее различных модификаций):

$$S = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

Пример. Определим сложность иерархической системы как число уровней иерархии. Увеличение сложности при этом требует больших ресурсов для достижения цели. Определим сложность линейной структуры как количество подсистем системы. Определим сложность сетевой структуры как максимальную из сложностей всех линейных структур, соответствующих различным стратегиям достижения цели (путей, ведущих от начальной подсистемы к конечной). Сложность системы с матричной структурой можно определить количеством подсистем системы. Усложнение некоторой подсистемы системы приведет к

усложнению всей системы в случае линейной структуры, и, возможно, в случае иерархической, сетевой и матричной структур.

Пример. Для многоатомных молекул число межъядерных расстояний (оно определяет конфигурацию молекулы) можно считать оценкой сложности топологии (геометрической сложности) молекулы. Из химии и математики известна эта оценка:  $3N-6$ , где  $N$  - число атомов в молекуле. Для твердых растворов можно считать  $W$  равной числу перестановок атомов разных сортов в заданных позициях структуры; для чистого кристалла  $W=1$ , для смешанного -  $W>1$ . Для чистого кристалла сложность структуры  $S=0$ , а для смешанного -  $S>0$ , что и следовало ожидать.

Пример. В эколого-экономических системах сложность системы может часто пониматься как эволюционируемость, сложность эволюции системы, в частности, мера сложности - как функция изменений, происходящих в системе в результате контакта с окружающей средой, и эта мера может определяться сложностью взаимодействия между системой (организмом, организацией) и средой, ее управляемости. Эволюционную сложность эволюционирующей системы можно определить как разность между внутренней сложностью и внешней сложностью (сложностью полного управления системой). Решения в данных системах должны приниматься (для устойчивости систем) таким образом, чтобы эволюционная сложность равнялась нулю, т.е. чтобы совпадали внутренняя и внешняя сложности. Чем меньше эта разность, тем устойчивее система, например, чем более сбалансированы внутрирыночные отношения и регулирующие их управляющие государственные воздействия - тем устойчивее рынок и рыночные отношения.

Пример. В математических, формальных системах сложность системы может пониматься как алгоритмизируемость, вычислимость оператора системы  $S$ , в частности, как число операции и операндов, необходимых для получения корректного результата при любом допустимом входном наборе. Сложность алгоритма может быть определена количеством операций, осуществляемых командами алгоритма для самого "худшего" (самого длительного по пути достижения цели) тестового набора данных.

Пример. Сложность программного комплекса  $L$  может быть определена как логическая сложность и измерена в виде  $L = L_1 / L_2 L_3 L_4 L_5$ , где  $L_1$  - общее число всех логических операторов,  $L_2$  - общее число всех исполняемых операторов,  $L_3$  - показатель сложности всех циклов (определяется с помощью числа циклов и их вложенности),  $L_4$  - показатель сложности циклов (определяется числом условных операторов на каждом уровне вложенности),  $L_5$  - определяется числом ветвлений во всех условных операторах.

Пример. Аналогично примеру, приведенному в книге Дж. Касти, рассмотрим трагедию В. Шекспира "Ромео и Джульетта". Выделим и опишем 3 совокупности: А - пьеса, акты, сцены, мизансцены; В - действующие лица; С - комментарии, пьеса, сюжет, явление, реплики. Определим иерархические уровни и элементы этих совокупностей.

А:

уровень N 2 - Пьеса;

уровень N 1 - Акты  $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ ;

В:

уровень N - Действующие лица  $\{c_1, c_2, \dots, c_{25}\} = \{\text{Ромео, Джульетта, } \dots\}$ .

С:

уровень N 3 - Пролог (адресован непосредственно зрителю и лежит вне действий, разворачивающихся в пьесе);

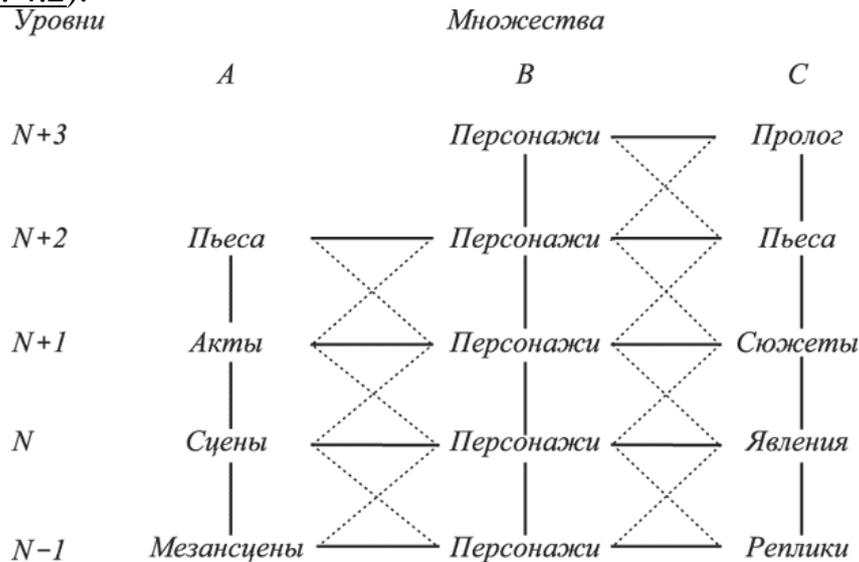
уровень N 2 - Пьеса;

уровень N 1 - Сюжетные линии  $\{p_1, p_2, p_3, p_4\} = \{\text{Вражда семейств Капулетти и Монтеки в Вероне, Любовь Джульетты и Ромео и их венчание, Убийство Тибальда и вражда семейств требует отмщения, Ромео вынужден скрываться, Сватовство Париса к Джульетте, Трагический исход}\}$ ;

уровень N - Явления  $\{u_1, u_2, \dots, u_8\} = \{\text{Любовь Ромео и Джульетты, Взаимоотношения между семейством Капулетти и Монтеки, Венчание Ромео и Джульетты, Схватка Ромео и Тибальда, Ромео вынужден скрываться, Сватовство Париса, Решение Джульетты, Гибель влюблённых}\}$ ;

уровень N-1 - Реплики  $\{r_1, r_2, \dots, r_{104}\} = \{\text{104 реплики в пьесе, которые определяются как слова, обращённые к зрителю, действующему лицу и развивающие неизвестный пока зрителю сюжет}\}$ .

Отношения между этими совокупностями на различных уровнях иерархии определяемы из этих совокупностей. Например, если Y - сюжеты, X - действующие лица, то естественно определить связь I между X, Y так: действующее лицо из совокупности X уровня N 1 участвует в сюжете Y уровня N 1. Тогда связность структуры трагедии можно изобразить следующей схемой (рис. 4.2):



**Рис. 4.2.** Схема структурных связей пьесы

В этом комплексе  $K(Y, X)$  все три сюжета становятся отдельными компонентами только на уровне связности  $q=8$ . Это означает, что сюжетные линии могут быть различны только для зрителей, следящих за 9 действующими лицами. Аналогично, при  $q=6$  имеются всего 2 компонента  $\{p_1, p_2\}$ ,  $\{p_3\}$ . Следовательно, если зрители могут отслеживать только 7 персонажей, то они видят пьесу, как бы состоящую из двух сюжетов, где  $p_1, p_2$  (мир влюбленных и вражда семейств) объединены. В комплексе  $K(Y, X)$  при  $q=5$  имеются 3 компонента. Следовательно, зрители, видевшие только 6 сцен, воспринимают 3 сюжета, не связанные друг с другом. Сюжеты  $p_1$  и  $p_2$  объединяются при  $q=4$ , и поэтому зрители могут видеть эти два сюжета как один, если следят только за 5 сценами. Все 3 сюжета сливаются, когда зрители следят лишь за 3 сценами. В комплексе  $K(Y, X)$  явление  $u_8$  доминирует в структуре при  $q=35$ ,  $u_3$  - при  $q=26$ ,  $u_6$  - при  $q=10$ . Следовательно,  $u_8$  вероятнее всего поймут те зрители, которые

прослушали 36 реплик, хотя для понимания  $u_3$  необходимо 27 реплик, а для понимания  $u_6$  - только 11 реплик. Таким образом, проведенный анализ дает понимание сложности системы.

В последнее время стали различать так называемые "жесткие" и "мягкие" системы, в основном, по используемым критериям рассмотрения.

Исследование "жестких" систем обычно опирается на категории: "проектирование", "оптимизация", "реализация", "функция цели" и другие. Для "мягких" систем используются чаще категории: "возможность", "желательность", "адаптируемость", "здоровый смысл", "рациональность" и другие. Методы также различны: для "жестких" систем - методы оптимизации, теория вероятностей и математическая статистика, теория игр и другие; для "мягких" систем - многокритериальная оптимизация и принятие решений (часто в условиях неопределенности), метод Дельфи, теория катастроф, нечеткие множества и нечеткая логика, эвристическое программирование и др.

Для "переноса" знаний широко используются инварианты систем и изоморфизм систем. Важно при таком переносе не нарушать свойство эмерджентности системы.

## **Тема 5. Декомпозиция и агрегирование как процедуры системного анализа**

Декомпозиция систем. Декомпозиция при решении задач, связанных с системами: генерирование и отбор вариантов решений. Построение дерева целей (дерева решений). Определение размеров дерева «вширь». Критерии сравнения элементов одного уровня: существенность, независимость и однородность. Определение размеров дерева «вглубь». Критерии затрат и эффективности. Алгоритм декомпозиции. Применение морфологического анализа при построении декомпозиционного дерева. Типы критериев принятия решений в организационно-технических системах. Виды оценок, используемых при определении значений критериев. Использование декомпозиции при проведении экспертиз (метод дерева целей, программно - целевой метод).

Агрегирование систем. Агрегирование, эмерджентность, внутренняя целостность систем. Виды агрегирования. Эмерджентность как результат агрегирования. Конфигураторы. Операторы. Классификация как агрегирование. Функции нескольких переменных как агрегат, структуры как агрегаты. Семантические сети.

Этапы анализа и синтеза

Понятие о структурном анализе

Методы декомпозиции

Требования, предъявляемые к декомпозиции

Алгоритм декомпозиции

Программно-целевой подход к решению системных задач

### **1. Этапы анализа и синтеза**

Ранее говорилось о том, что анализ и синтез присущи человеческому мышлению. Их единство позволяет познавать мир. Вспомним, что суть анализа состоит в разделении целого на части, в представлении сложного в виде совокупности более простых компонент.

Примеры аналитического метода в науке:

математика (разложение функций в ряды, дифференциальное и интегральное исчисление, разбиение неоднородных областей на однородные с последующим «сшиванием» решений);

физика (фильтры, анализаторы спектров, исследование атомов и элементарных частиц). (Например, изучение частотной характеристики шума, т.е. спектра).

Синтез, т.е. обратный процесс объединения частей в целое необходим для познания целого, сложного. Для изучения и проектирования сложных систем часто бывает недостаточно интуитивных системных представлений. Анализ и синтез систем является предметом изучения СА, который рассматривает **технические аспекты аналитического и синтетического методов исследования систем**, а именно:

как выполняются операции разделения целого на части;

почему именно так.

(Аналитический метод в явной форме был сформулирован представителями рационализма. Р. Декарт в 17 в. писал: «Расчлените каждую изучаемую вами задачу на столько частей (...), сколько потребуется, чтобы их было легко решить».)

Однако роль синтеза не сводится только к «сборке деталей», полученных при анализе. Целостность системы нарушается при анализе, при расчленении системы утрачиваются не только существенные свойства самой системы («разобранный автомобиль не поедет, расчлененный организм не способен жить»), но исчезают и существенные свойства ее частей, оказавшихся отдельными от нее («оторванный руль не рулит, отделенный глаз не видит»). Таким образом, результатом анализа является лишь **вскрытие структуры**, знание о том, **как** система работает, но не понимание того, **почему и зачем** она это делает. Другими словами, синтетическое мышление требует объяснить поведение системы. Синтетическое мышление открывает не структуру, а функцию; оно открывает, **почему** система работает так, а не то, как она делает это.

Сочетание анализа и синтеза можно представить в виде следующей таблицы.

Этап	Анализ	Синтез
1	Вещь, подлежащая объяснению, расчлененная на части	Часть рассматривается как часть большего целого
2	Объясняются содержимые части	Объясняется целое
3	Знание о частях агрегируется (соединяется) в знание о целом – (1)	Понимание содержащего целого расчленяется (деагрегирование, декомпозиция) для объяснения частей

И при аналитическом, и при синтетическом подходе наступает момент, когда необходимо разложить целое на части либо объединить части в целое.

Значение аналитического метода не только и не столько в том, что целое расчленяется на части (анализ, декомпозиция), а в том, что будучи соединены надлежащим образом, эти части вновь образуют единое целое (синтез, агрегирование).

Момент агрегирования частей в целое является конечным этапом анализа, поскольку лишь после этого мы можем объяснить целое через его части – в виде структуры целого.

При решении сложных системных проблем важную роль играет метод структурного анализа.

## **2. Понятие о структурном анализе**

*Структурным анализом* называется метод исследования системы, который начинается с ее общего обзора и затем детализируется, приобретая иерархическую структуру со все большим числом уровней.

Структурный анализ предусматривает разбиение системы на уровни (*уровни абстрагирования, агрегирования*) с ограниченным числом элементов на каждом уровне (чаще от 3 до 6-7). На каждом уровне выделяются лишь существенные для системы детали.

Таким образом, при системных исследованиях важным моментом является разложение целого на части – структурное разбиение, а затем объединение частей в целое, т.е. использование операций *декомпозиции и агрегирования*.

### **Целесообразность этих операций заключена в следующем:**

обычно легче изучать частные проблемы, чем решать сразу всю проблему в целом;

появляется возможность разделить работу между отдельными исполнителями, между специалистами в разных областях;

могут быть определены качественные взаимосвязи между компонентами системы;

уменьшение числа переменных при математическом моделировании, благодаря использованию частных моделей, описывающие отдельные компоненты системы;

**декомпозиция системы позволяет легче определить, какая дополнительная информация требуется для более полного исследования и понимания системы.**

Декомпозиция и моделирование не являются однозначными: существует много методов структурного разбиения проблемы, и выбор метода зависит от целей исследования. Кроме того, редко бывает, что сформулированное конкретное представление о системе будет неизменным в течение всего процесса исследования. Обычно происходит совершенствование, развитие модели от довольно грубой, упрощенной до более детальной.

## **3. Методы декомпозиции**

Можно выделить несколько наиболее часто встречающихся методов декомпозиции.

1. Рассмотрение проблемы в рамках отдельных интервалов времени с принятием решений и оценками для каждого интервала. **Этот метод представляется целесообразным в следующих случаях:**

если относительное изменение переменных в рассматриваемом интервале времени мало, их можно считать постоянными, что облегчает моделирование;

переменные системы действительно меняются дискретно в определенные моменты времени, например, если финансирование проекта меняется каждые три года, то, вероятно, целесообразно осуществлять структурное разбиение на трехлетние интервалы времени;

появляется возможность принимать решения не сразу, а поэтапно, так как при этом число переменных на любом интервале времени.

2. Разбиение на основе научных дисциплин. Такая декомпозиция удобна тем, что позволяет легче осуществить разделение работ между различными

исполнителями и руководителями. При этом следует иметь в виду, что при этом могут ослабевать контакты между представителями различных направлений, а при необходимости учета тесной взаимосвязи между различными частными проблемами это нежелательно.

3. Декомпозиция в соответствии с интересами и целями различных групп, организаций. Например, исследование транспортной проблемы может быть проведено с точки зрения интересов населения, владельцев, органов власти.

4. Разбиение проблемы на основе ее рассмотрения применительно к различным географическим областям. Такая декомпозиция удобна, если введение изменений в одну область не вызывает значительных изменений в других областях.

Таким образом, декомпозиция производится исходя из определенных представлений о системе, т.е. на основании некоторой модели системы. рассмотрению вопроса о том, какие модели брать на основании декомпозиции. Прежде всего, напомним, что при всем практически необозримом многообразии моделей формальных типов моделей немного: это модели «черного ящика», состава, структуры, структурной схемы, причем каждая из них может быть в своем статическом или динамическом варианте. Это позволяет организовать нужный перебор типов моделей, соответствующих различным методам структурного разбиения. Такие модели называют формальными моделями.

Тем не менее, основанием для декомпозиции может служить только конкретная, содержательная модель рассматриваемой системы. выбор же формальной модели лишь подсказывает, какого типа должна быть модель-основание; *для того, чтобы формальная модель стала основанием для декомпозиции, ее следует наполнить содержанием, т.е. превратить в содержательную модель.* При этом возникает вопрос о полноте проводимого анализа.

Полнота декомпозиции обеспечивается полнотой содержательной модели, которая строится на основе выбранной формальной модели. Это означает, что, прежде всего, следует позаботиться о полноте формальной модели. Именно благодаря формальности, абстрактности такой модели часто удается добиться ее абсолютной полноты.

Рассмотрим некоторые формальные модели.

1. Схема входов организационной системы на рисунке 1а является полной: к ней нечего добавить (перечислено все, что воздействует на систему), а изъятие любого элемента лишит ее полноты.

2. К числу полных формальных моделей относится схема любой деятельности человека, которая в «Капитале» применялась для анализа процесса труда (рисунок 3а). В схеме выделены: субъект деятельности; объект, на который направлена деятельность; средства, используемые в процессе деятельности; окружающая среда; все возможные связи между ними.

3. Формальный перечень типов ресурсов (рисунок 4а) состоит из энергии, материи, времени, информации (для социальных систем добавляются кадры и финансы). При анализе ресурсного обеспечения любой конкретной системы этот перечень не дает пропустить что-то важное.

4. Если в качестве модели жизненного цикла принять формулировку «все имеет начало, середину и конец», то такая модель также является формально полной. Разумеется, эта модель носит слишком общий характер, поэтому при

рассмотрении жизненного цикла проблем (см. пример 2 ниже) приходится использовать более детальные модели.

Таким образом, полнота формальной модели должна быть предметом особого внимания. Поэтому одна из важных задач информационного обеспечения системного анализа и состоит в накоплении наборов полных формальных моделей.

При разработке моделей сложных систем важно, таким образом, учитывать следующие аспекты.

1. Полнота модели-основания, обеспечиваемая полнотой формальной модели. Следует отметить, что полнота модели основания обуславливает также целостность представления анализируемой системы на всех уровнях агрегирования.

2. Иерархичность структуры, присущая рассматриваемой системе.

3. Возможность использования количественных показателей (индикаторов) состояния на каждом уровне декомпозиции (агрегирования).

4. Возможность информационного обеспечения и состав пользователей моделей.

5. Организация работ по моделированию в виде последовательных этапов.

Примеры декомпозиции и агрегирования систем на основе различных моделей.

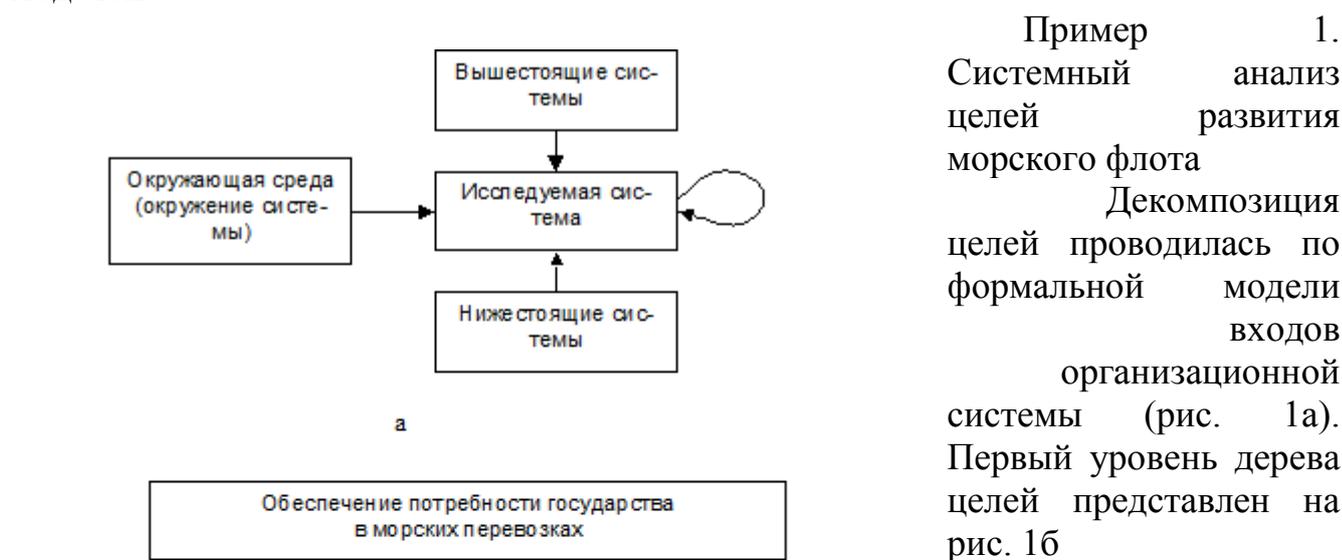


Рисунок 1 – Декомпозиция целей развития морского флота  
а) формальная модель  
б) модель-основание, наполненная конкретным содержанием

**Здесь входы организационной системы соответствуют определенным подцелям:**

«нижестоящие системы» (здесь клиентура) – подцель 1;

«вышестоящие системы» (здесь государство) – подцель 2;

«окружающая среда» (здесь флоты других государств) – подцели 3 и 4.

Следует подчеркнуть, что объект декомпозиции должен сопоставляться с каждым элементом модели-основания.

Пример 2. Декомпозиция процесса решения системных задач

В этом случае декомпозиция производится по модели-основанию, соответствующей формальной модели «жизненный цикл». Эта модель позволяет декомпонировать анализируемый период времени «жизни» системы от возникновения до окончания. Такая декомпозиция предполагает разбиение на этапы, которое дает представление о последовательности действий, начиная с обнаружения проблемы и кончая ее ликвидацией.

Пример 2. Декомпозиция жизненного цикла проблем (по Н.П.Федоренко) приведена на рисунке 2.

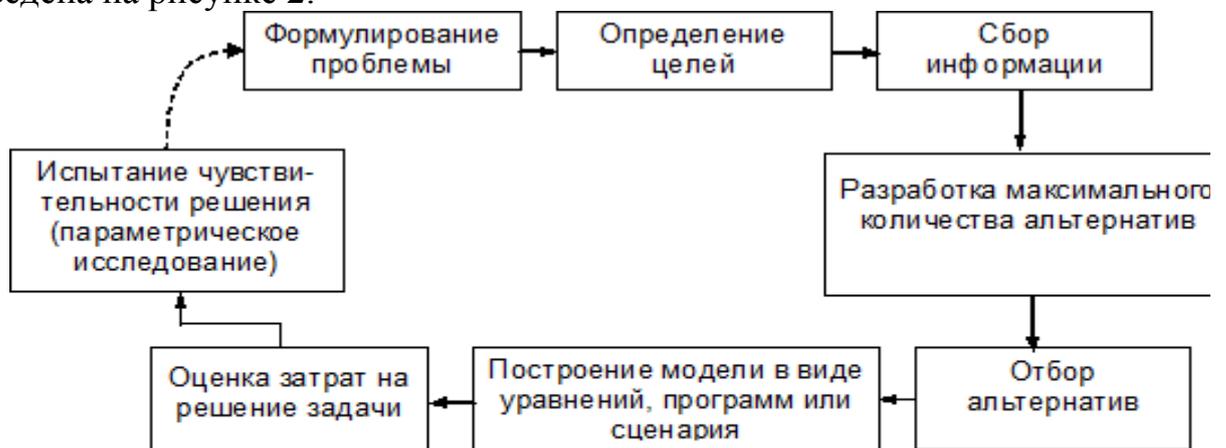


Рис.2

Пример 3. Декомпозиция модели эргатической системы на основе формальной модели деятельности.

Для исследования и повышения уровня производственной безопасности в качестве формальной модели была выбрана модель деятельности вообще (рисунок 3а), а затем входящим в нее элементам была придана соответствующая интерпретация (рисунки 3б и 3в). Модель 3в, по-видимому, более содержательна, благодаря тому, что из элемента формальной модели «средство» выделены в отдельно учитываемый элемент не только технологии, но и продукты труда и используемое сырье. При моделировании воздействия на окружающую среду это особенно важно, поскольку позволяет рассмотреть проблемы загрязнения при переработке, хранении сырья, безопасности продукции, утилизации отходов. Здесь уместно еще раз подчеркнуть, что модели имеют целевую предназначенность, т.е. изменение целей моделирования требует изменения модели.

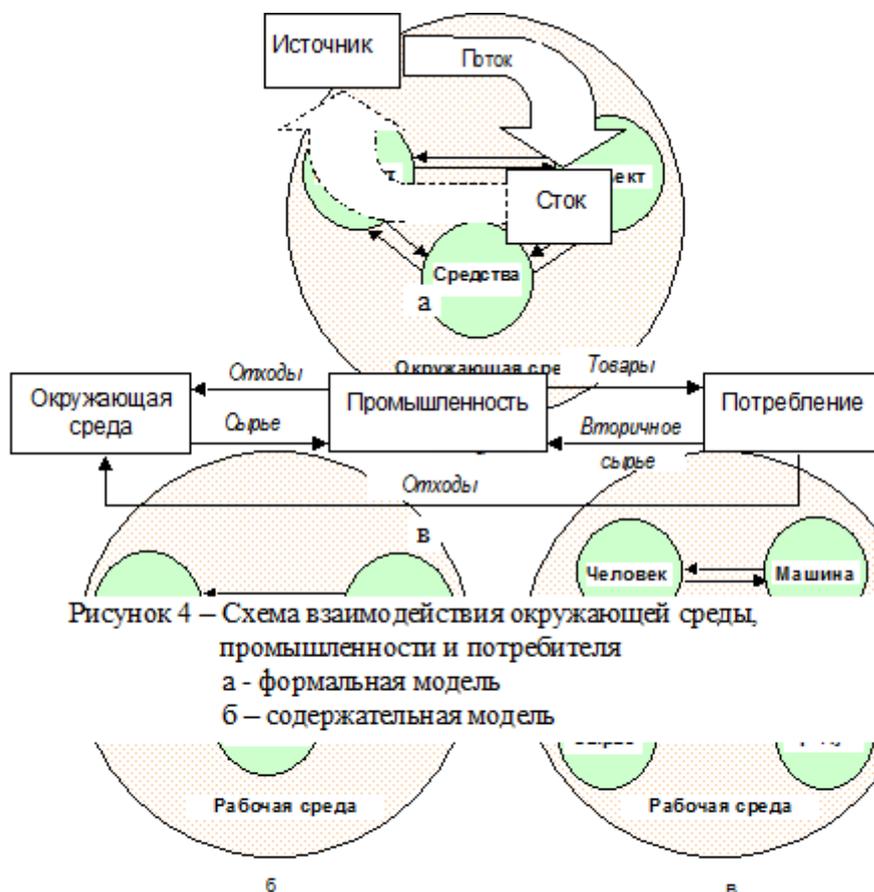


Рисунок 4 – Схема взаимодействия окружающей среды, промышленности и потребителя  
 а - формальная модель  
 б – содержательная модель

Рисунок 3 – Модель для исследования человеко-машинных систем  
 а) формальная модель деятельности  
 б) модель-основание для декомпозиции

Пример 4. Декомпозиция на базе источников, стоков и потоков объектов. При этом в качестве объектов могут рассматриваться деньги, материалы, люди, загрязняющие вещества, энергия и т.д. На рисунке 4 показана модель взаимодействия окружающей среды, промышленности и потребителя на основе формальной модели «источник – поток – сток». Подобные модели, как правило, используются при составлении уравнений материального баланса.

#### 4. Требования, предъявляемые к декомпозиции

Декомпозиция представляет собой многоступенчатый процесс от начальной декомпозиции первого, высшего уровня модели системы до последнего уровня, завершающего данный этап анализа. Обычно в результате декомпозиции получают некоторую древовидную структуру, которая должна отвечать определенным требованиям. К ним, в частности, относятся:

- целостность представления анализируемого объекта на всех уровнях;

- присущая исследуемому объекту иерархичность структуры;

- возможность использования количественных показателей – индикаторов по каждому фрагменту декомпозиции, например, состояние окружающей среды ® состояние воздушной среды, качество воды и т.п. оценивается соответствующими концентрациями загрязнителей по отношению к ПДК;

- возможность информационного обеспечения на каждом уровне;

- организация работ по моделированию в виде последовательности этапов.

Декомпозиция модели должна, кроме того, отвечать двум противоречивым требованиям: полноты и простоты. Проблема должна быть рассмотрена максимально всесторонне и подробно и, в то же время полученная структура должна быть максимально компактной как «вширь», так и «вглубь» Принцип

простоты требует сокращать размеры дерева. Размеры «вширь» определяются числом элементов модели, служащей основанием декомпозиции, поэтому принцип простоты вынуждает брать как можно более компактные модели-основания. Наоборот, принцип полноты заставляет брать как можно более развитые, подробные модели. Компромисс достигается с помощью понятия *существенности*: в модель-основание включаются только компоненты, существенные по отношению к цели анализа, т.е. *релевантные*. При этом в алгоритме должны быть предусмотрены возможности внесения (в случае необходимости) поправок и дополнений в модель-основание. Здесь возможны следующие рекомендации:

дополнение элементов еще одним элементом «все остальное»; он может не использоваться для декомпозиции, но будет постоянно пробуждать у эксперта сомнение в полноте предложенной им модели.

разукрупнение отдельных элементов модели-основания в случае необходимости, которая может возникнуть на последующих стадиях анализа.

### 5. Алгоритм декомпозиции

Сколько должно быть уровней декомпозиции? Принцип простоты требует, чтобы оно было небольшим, но для удовлетворения принципа полноты необходимо предусмотреть возможность продолжения декомпозиции как угодно долго до принятия решения об ее прекращении по данной ветви (*разные ветви могут иметь различную длину*). Декомпозиция прекращается, когда она привела к получению результата (подцели, подфункции, подзадачи и т.п.), не требующего дальнейшего разложения, т.е. результата простого, понятного, реализуемого, обеспеченного, заведомо выполнимого, называемого *элементарным*.

Неэлементарный фрагмент подлежит дальнейшей декомпозиции. Возможно также введение новых элементов в модель-основание и продолжение декомпозиции по ним. Примером может служить рассмотрение системы «вуз» (см. рис.7). Здесь выход «студенты» можно разделить на студентов дневного, вечернего и заочного обучения, выход «научная информация» - на выходы «монографии», «статьи», «отчеты по НИР», «заявки на изобретения и т.п. На определенной стадии можно рекомендовать выделить из «прочего» и включить в число существенных еще один элемент. Таким образом мы получаем новые основания для его декомпозиции, а значит, и возможность продолжить анализ.

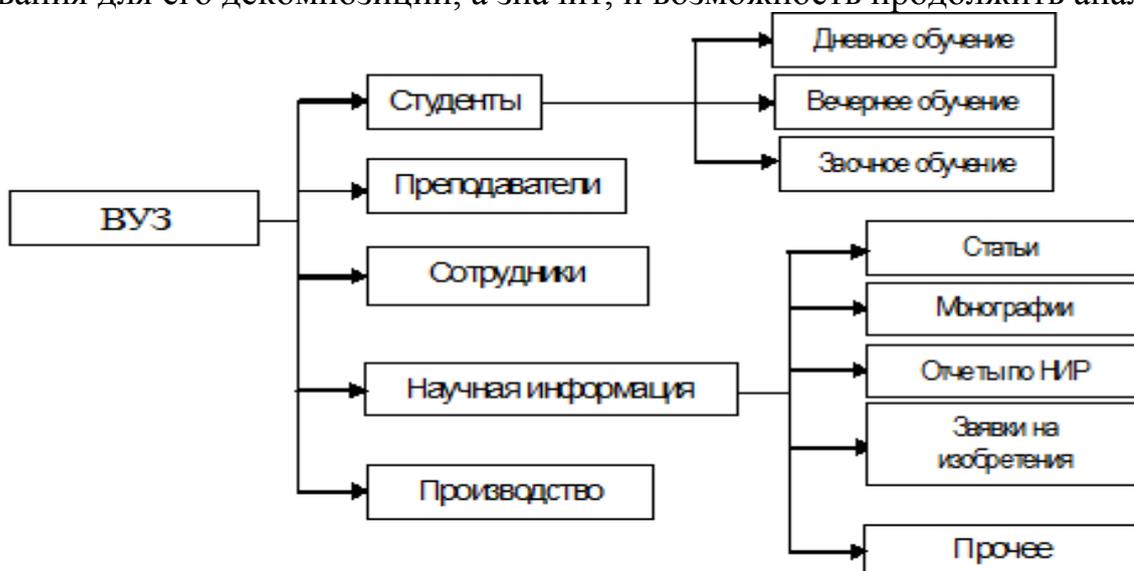


Рис. 7

Сам алгоритм декомпозиции, описанный в данном параграфе, представлен в виде блок-схемы на рисунке 8, приведенной в соответствии с [Перегудов Ф.К., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высшая школа, 1989.].

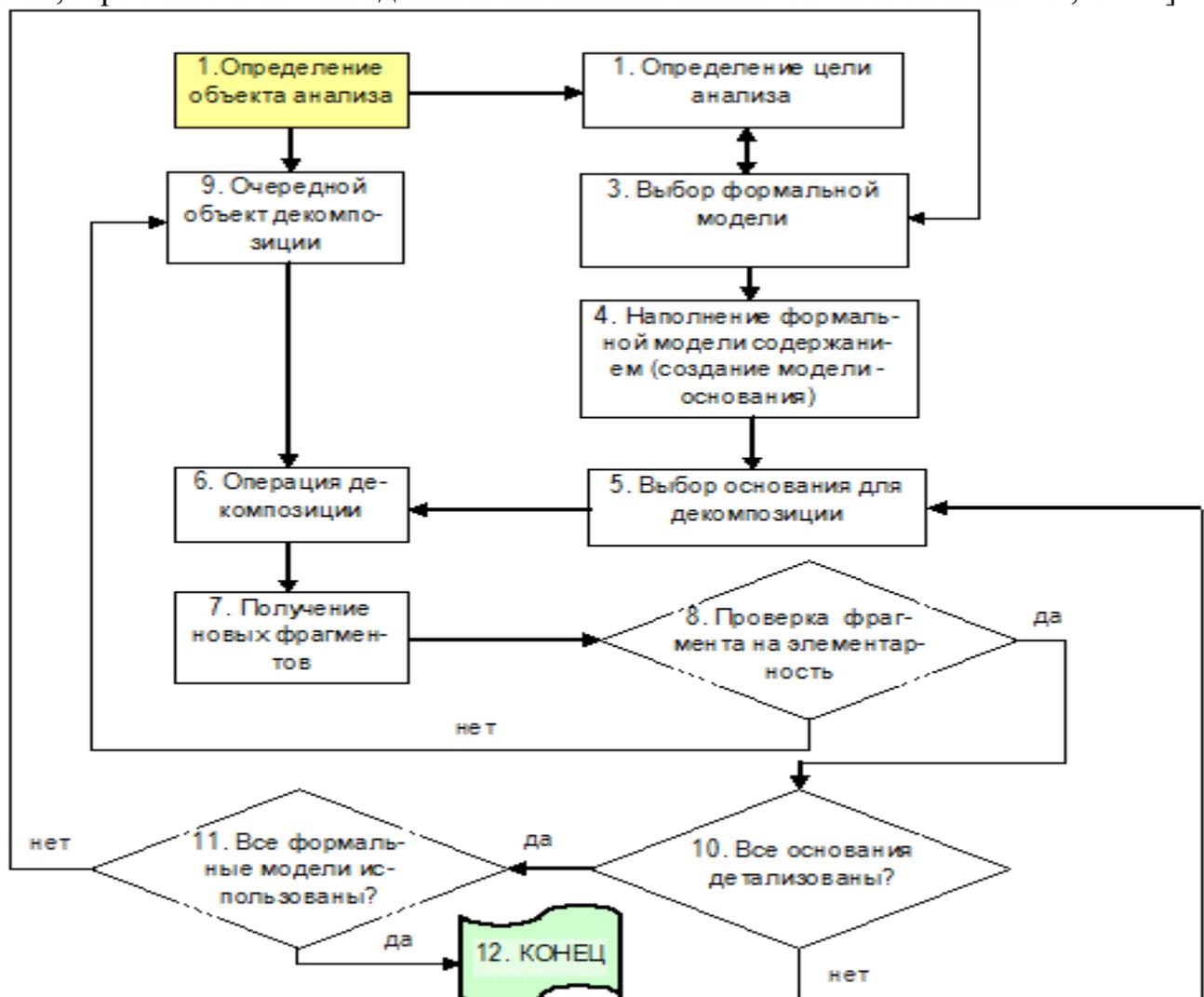


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма декомпозиции

## 5. Программно-целевой подход к решению системных задач

### 5. 1. Область применения и этапы программно-целевого подхода

Программно-целевой подход используется при системном анализе и решении сложных социально-экономических и научно-технических проблем. Для таких проблем характерны такие особенности, как:

- высокая размерность и сложность связей между компонентами проблемы,
- перспективность, т.е. необходимость осмысления задач в долгосрочной перспективе,
- высокая капиталоемкость,
- широкий диапазон альтернатив достижений целей,
- неполнота современных научных представлений и технических достижений, обеспечивающих решение проблемы,
- неопределенность стоимостных и временных требований.

Конечным результатом применения программно-целевого подхода к решению поставленной проблемы является программа, представляющая собой комплекс всесторонне согласованных экономических, социальных, производственно-технических, организационных и научно-исследовательских

мероприятий, направленных на достижение четко обозначенной цели. Такая программа, по сути, *инструмент перевода глобальной цели исследования на язык «локальных» целей и задач, решаемых на уровнях отдельных компонентов системы*. Например, глобальная цель – цель общественного развития, локальные – цели и задачи отдельных районов, предприятий, организаций.

Процедура формирования программ носит, в основном, неформальный, экспертный характер. При этом можно выделить несколько основных ее этапов.

1. Анализ исходного состояния и формулировка цели программы. При этом проблема рассматриваются различные аспекты проблемы, в том числе и на перспективу, создается основа для подготовки исходного задания на подготовку программы.

2. Формулировка комплекса целей программы. На этом этапе конечная (глобальная) цель структурируется, т.е. расчленяется на множество подцелей, связанных с решением поставленной проблемы, т.е. строится *дерево целей* программы.

3. Формирование вариантов программы и выбор наиболее эффективного из них, т.е. рассмотрение альтернатив. При этом обычно возникает несколько уровней альтернативности, выделяемых в соответствии с последовательностью решения проблем:

первый уровень – ряд целей (уровни целевых нормативов) может оказаться недостижимым из-за ограничений на ресурсы;

второй уровень – сравнение систем, реализующих ту или иную функциональную цель программы;

третий уровень – формирование способов создания этих систем, характеризующихся различной технологией, набором ресурсов и временем, требуемым для их создания. Каркасом для формирования альтернативных целереализующих систем, а также альтернативных комплексов задач, под которыми понимаются технологические способы создания систем, служит *дерево целей*.

4. Детализация выбранного варианта. При этом мероприятия программы детализируются в соответствии с требованиями *системы управления*, доводящей конкретные задания до конкретных исполнителей.

## **5.2. Дерево целей**

При построении дерева целей программы используется логическое свойство *конъюнктивности* понятий. Конъюнкция – это отношение, устанавливаемое логическим суждением: *A есть B, и C, и D*, в котором *B, C, D* называются конъюнктами. Противоположным суждением является дизъюнкция, т.е. отношение, устанавливаемое логическим суждением: *A есть B, или C, или D*, в котором элементы *B, C, D* – дизъюнкты.

При разработке целевой системы свойство конъюнктивности позволяет построить полный комплекс целей и подцелей, отображающих желаемые функции будущих реальных объектов, которые в сумме должны удовлетворять формулируемую в общей цели потребность. Другими словами, *использование принципа конъюнктивности позволяет представить исходную цель в виде суммы подцелей нижнего уровня дерева целей*. На этом этапе устанавливаются *целевые нормативы*, т.е. количественные характеристики уровней достижения целей.

Пример дерева целей приведен на рис. 1.

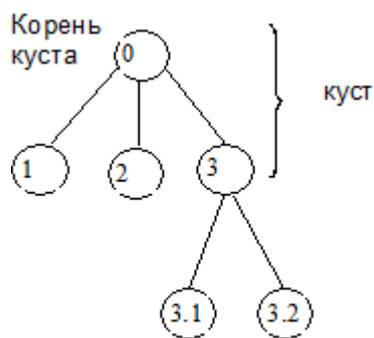


Рис. 1. Пример дерева целей

Чаще всего распределение ресурсов между функциональными целями программы затруднительно, и, поэтому, стыковка целей с ресурсами должна происходить на нижнем уровне дерева целей. Это характерно, в частности, для формирования эколого-экономических программ развития региона, где важно учитывать территориальные цели и различия в относительной важности их достижения. *Функциональные цели нижнего уровня дерева целей называются локальными целями.* Чем более

дробными являются цели нижнего уровня, тем точнее могут быть характеристики ресурсов (в т.ч. временных) для их реализации. При этом очередность достижения локальных целей дерева не будет нарушать одновременность в реализации крупных функциональных целей, т.е. будет обеспечено комплексное решение проблемы.

В реальных программах составление полного дерева целей является сложной задачей, которая решается с привлечением соответствующих экспертов высокой квалификации, располагающих необходимыми знаниями и сведениями. От полноты и реальности дерева целей зависит качество всей последующей работы по построению программы.

По окончании построения дерева целей последние ранжируются по относительной важности их реализации, что позволяет на следующем этапе (формирование вариантов) перейти к распределению ресурсов.

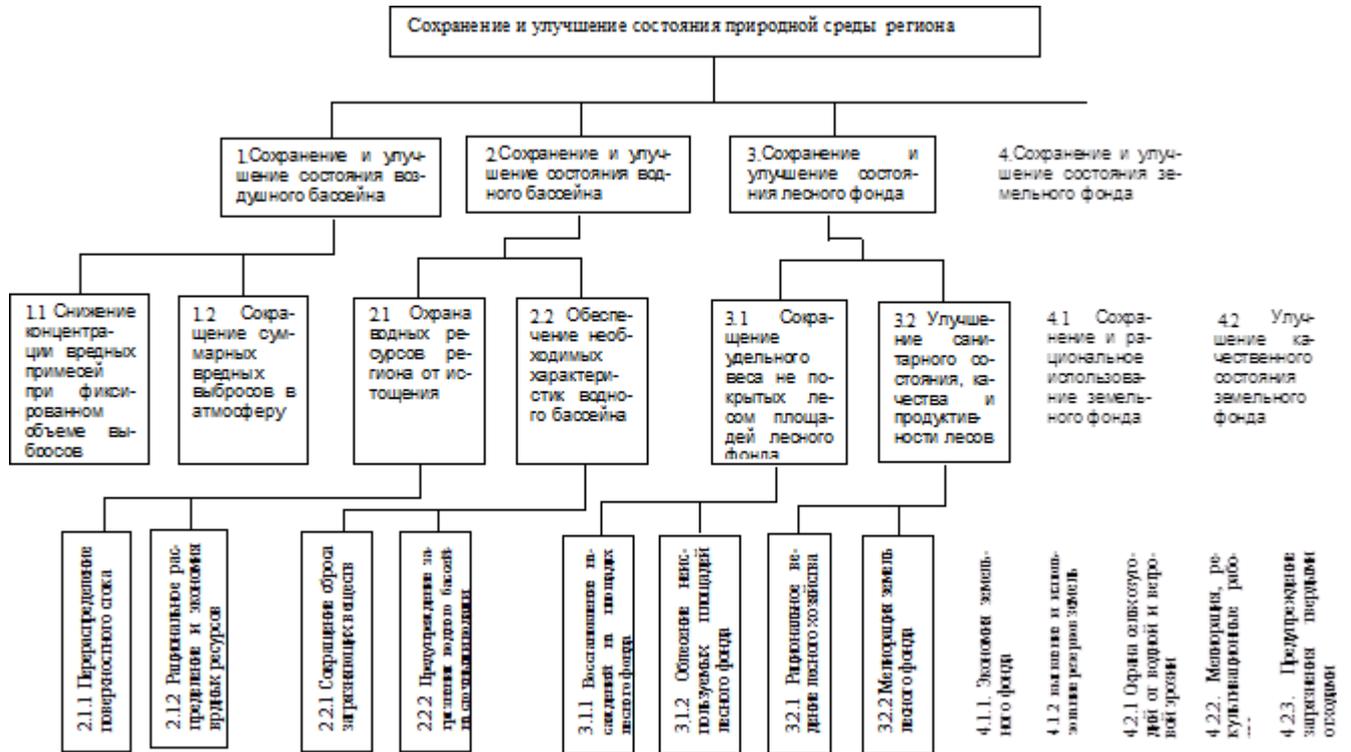
**Таким образом, выделение локальных целей является необходимым моментом при построении дерева целей и позволяет осуществлять распределение ресурсов между элементами нижнего уровня дерева целей по очереди, в соответствии с величинами коэффициентов относительной важности их вклада в достижение глобальной цели программы.**

Пример. В [1] рассматривается построение дерева целей природоохранной программы на примере бассейна реки Дон. Глобальной, конечной целью здесь является сохранение и улучшение состояния природной среды в бассейне реки. На основе проведенного анализа конечная цель подвергнута декомпозиции, или, как еще говорят, последовательно дезагрегирована на подчиненные цели, реализация которых обеспечивает достижение конечной цели.

Последовательная структуризация конечной цели программы осуществляется построением конъюнктивного дерева целей. Для этого необходимо располагать конкретной информацией о региональных проблемах природопользования в рассматриваемом регионе.

Конечная цель разбивается на 4 функциональных подцели первого уровня. Расчленение подцелей с индексами 1-4 приводит к формированию 2-го уровня дерева целей на примере куста, отражающего проблемы водоохранной деятельности в регионе.

Цель с индексом 2.1 – охрана водных ресурсов от истощения определена из анализа современных и перспективных проблем водного хозяйства региона. Вершина куста (цель 2.1) представляется как сумма таких подцелей как рациональное распределение и



использование водных ресурсов основными водопотребителями (2.1.1) и распределение поверхностного стока (2.1.2).

Процесс построения конъюнктивного функционального дерева целей завершается территориальным делением целей и формированием локальных целей программы (цели, приведенные к административным областям).

### Тема 6. Основы управления сложными системами

Сущность управления в сложных системах. Структура системы с управлением. Аксиомы теории управления. Принцип необходимого разнообразия У. Эшби. Пути совершенствования систем с управлением.

Модели основных функций организационно-технического управления. Содержательное описание функций управления. Модель общей задачи принятия решений. Модель функции контроля. Методы прогнозирования. Модель функции планирования. Модель функции оперативного управления.

Основные оценки сложных систем. Методы качественного и количественного оценивания систем. Понятие шкалы, шкалы порядка, интервалов, отношений, разностей. Абсолютные шкалы. Обработка характеристик, измеренных в разных шкалах. Показатели и критерии оценки систем. Виды критериев качества, шкалы уровней систем с управлением. Методы качественного оценивания систем: метод экспертных оценок, метод типа Дельфи, морфологические методы. Методы количественного оценивания систем: оценка сложных систем на основе теории полезности. Оценки сложных систем в условиях определенности и неопределенности. Оценка сложных систем в условиях риска на основе функции полезности.

*Управление в широком понимании* есть функция некоторой системы, направленная либо на сохранение основного качества системы (потеря которого приводит к ее разрушению), либо на выполнение программы, обеспечивающей устойчивость функционирования системы и достижение ею заданной цели, либо на развитие системы.

Управление является необходимым условием нормального функционирования всякой системы. Любой процесс, безотносительно к его природе, может осуществляться в нужном направлении только при наличии управляющих воздействий со стороны органов управления.

Возникновение управления как особого вида общественной деятельности обусловлено прежде всего появлением и развитием разделением общественного труда. Общественное разделение труда проявляется в двух основных формах – в образовании крупных специализированных производств и дифференциации в их границах технологических процессов. В результате дробления конкретного труда на специализированные части образуется широкая сеть периферийных ячеек производства, каждая из которых представляет экономическую клеточку. Разделение и обособление специализированных частей труда обуславливает количественную зависимость между всеми частями производства, и в результате образуется сеть экономических связей, которая тем шире, чем глубже разделение труда.

**Управление в производственной сфере** можно определить как целенаправленное воздействие на коллективы людей для организации и координации их деятельности в процессе производства.

Можно выделить три основные области управления:

- управление системами машин и технологическими процессами;
- управление процессами, происходящими в живых организмах;
- управление деятельностью человеческих коллективов, решающих ту или иную задачу.

Внимательное рассмотрение процессов управления во всех областях выявило их общие закономерности, что позволяет установить для управления единую теоретическую основу. Этой проблемой занимается *кибернетика* – наука об общих законах управления в природе, живых организмах и машинах. С позиций кибернетики системам управления различной природы – биологическим, техническим, социальным – присущи общие закономерности. Все эти системы управления объединяет в принципе одинаковая структура: математическое описание процессов, протекающих в системах управления различной природы, оказывается подобным.

Кибернетика рассматривает управление как *циклический информационный процесс, осуществляемый в замкнутом контуре для достижения установленной цели действий*. Управление всегда протекает в определенной материальной среде. В процессе управления участвуют орган управления, объект управления и соединяющие их каналы связи. От органа управления к объекту управления проходит канал прямой связи для передачи управляющих воздействий. От объекта управления к органу управления проходит канал обратной связи для передачи сведений о состоянии объекта управления, среды и других факторов обстановки.

Цель действий достигается функционированием объекта управления. Для достижения цели действий объект управления должен быть приведен в необходимое состояние с помощью управляющего информационного воздействия.

Сведения о состоянии объекта управления, субъекта воздействия и среды принято называть информацией состояния. Управляющие воздействия

представляют собой информацию о том, что, как и когда надлежит сделать объекту управления, и их принято называть командной информацией.

*Контуром управления* называют замкнутую цепь, состоящую из органа управления и объекта управления, связанных каналами прямой и обратной связи, по которым циклически циркулирует соответственно командная информация и информация состояния (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Контур управления

Командная информация в общем зависит от информации состояния. Эта зависимость может быть выражена формулой:

$$U(t+\tau) = \Phi(x(t)), \quad (3.5)$$

где  $t$  – момент, к которому относится информация состояния;

$x(t)$  – информация состояния на момент времени  $t$ ;

$t$  – работное время органа управления;

$\Phi$  – функция преобразования информации состояния в командную информацию;

$U(t+\tau)$  – командная информация, относящаяся к моменту времени  $(t+\tau)$ , выработанная на основании информации состояния  $x(t)$ .

Функция органа управления заключается в преобразовании информации состояния в командную информацию в соответствии с поставленной целью действий. Функция объекта управления состоит в реализации командной информации, заключающейся в определении действия для достижения поставленной цели, а также в сборе информации состояния. Функция каналов прямой и обратной связи заключается в передаче информации состояния от объекта управления к органу управления и командной информации в обратном направлении.

Поскольку основой управления являются информационные процессы, то определение количества информации, необходимой для выработки управляющих воздействий, перечня величин, их размерности, моментов поступления, дискретности, средств передачи, быстроты и надежности передачи информационных сигналов приобретает первостепенное значение.

Сущность процесса *переработки информации* в системе управления составляет то, что мы обычно называем выработкой и принятием *решения*. Исходя из поставленной задачи – цели управления и данных – информации об объекте управления и состоянии внешней среды, руководитель по определенным

правилам принимает единственное, избранное из многих возможных, воздействие на объект.

В качестве непосредственной цели управления выступает достижение системой показателей, характеризующих состояние и функционирование системы. В качестве таких показателей - целевых функций или критериев эффективности могут выступать: плановое задание по выпуску продукции, рентабельность, прибыль, производительность труда.

Достижение заданных значений критериев эффективности осуществляется путем выбора органом управления управляющих воздействий на объект управления. Этот выбор и является основным содержанием переработки информации в системе управления. На его основании в органе управления принимается решение. Выработка решения происходит по определенным правилам – алгоритмам. Формализация сводится к созданию на базе содержательного, смыслового описания этого процесса его модели, связывающей целевую функцию управления с параметрами – исходными данными системы.

Для нормальной работы система управления производством должна располагать следующими данными:

- целью управления;
- идеальной моделью будущего функционирования объекта, рассчитанной так, чтобы цель достигалась оптимальным образом;
- моделью фактического состояния объекта для сравнения ее с идеальной моделью и нахождения отклонений;
- информацией, направленной на устранение отклонений фактического состояния модели от идеального.

Наличие этих данных обеспечивается выполнением трех основных **фаз управления**: 1) планирования, 2) учета и анализа, 3) регулирования.

*Планирование* делится на технико-экономическое и оперативно-производственное. Первое объединяет перспективное и текущее планирование и строится применительно к отдельным элементам объекта управления (производственные мощности, трудовые ресурсы, материальные ресурсы и т. д.). Оно обосновывает конечные результаты и потребные ресурсы. Второе ставит своей главной задачей спланировать осуществление производственных процессов (разработку календарных нормативов, выдачу заданий на рабочие места и т. д.) с целью увязки во времени и пространстве отдельных элементов производства.

Фаза планирования является в управлении ведущей, ибо с ее помощью предприятиям задаются цель, смысл и методы управления. Через нее осуществляется связь предприятия с внешней средой, увязка с хозяйственной политикой в стране, системами финансирования, стимулирования и т. д.

От планирования зависят учет и регулирование: *учет* ведется по показателям плана, а *задачей регулирования* является постоянное поддержание фактических показателей объекта на уровне плановых заданий. Планирование носит директивный характер.

Выполнение плана гарантируется фазой регулирования. Смысл этой фазы сводится к устранению текущих рассогласований (возмущений) в производстве. Фаза регулирования связана с планирующей через учет.

Анализ фаз планирования и регулирования показывает, что организация производственных процессов многовариантна. Одно и то же планирование может быть проведено в жизнь множеством различных, далеко не равноценных между

собой по результатам, способов. То же можно сказать и про фазу регулирования: устранение возмущений может идти разными, более и менее эффективными путями. И среди множества вариантов планирования и регулирования производства, как правило, имеется наилучший, оптимальный. Нахождение его является одной из главных задач управления. Выбор наилучшего варианта решения требует переработки огромного количества разнообразной информации.

Рассмотрим в качестве примера роль и место информации на предприятиях приборостроения и машиностроения.

Для предприятий приборостроения (радиотехнические предприятия, предприятия средств связи и т. п.) обычно характерны следующие признаки: массовый характер основного производства, большой удельный вес сборочных операций, короткий производственный цикл, частая смена выпускаемых моделей, малая номенклатура выпускаемых изделий. Период оборачиваемости оборотных средств – один-полтора месяца. На указанном предприятии наблюдаются высокая скорость сборочного конвейера (такт 19 с), значительные темпы роста выпуска продукции, большое количество поставщиков (более тысячи) при их постоянной смене. Сроки и объемы поставок внутри планового периода достаточно неопределенные. Количество потребителей может достигать многих тысяч.

В этих условиях для производственных целей необходима следующая информация:

- конструкторская спецификация деталей, узлов, соединений; карты заимствованных, стандартизованных и унифицированных деталей и узлов; комплектовочные ведомости; спецификация тары;

- технологические маршруты прохождения деталей и узлов по цехам и участкам с перечнем операций, выполняемых в каждом из них;

- типы и виды оборудования, степень их загрузки для выполнения отдельных операций;

- режимы резания, которые определяются числом оборотов детали или инструментов в минуту, подачей, глубиной резания или числом двойных ходов прессового оборудования;

- спецификация инструмента и специальной оснастки, нормы их расхода на единицу изделий;

- нормы расходования сырья, материалов и покупных полуфабрикатов (подетальные, пооперационные и спецификационные);

- нормы затрат живого труда (времени или выработки);

- установленные расценки, нормативы численности вспомогательных рабочих;

- ведомости трудоемкости изделий;

- нормы расхода топлива, электроэнергии, сжатого воздуха, пара;

- план-график проведения предупредительных ремонтов;

- методы контроля качества деталей, узлов, изделий (сплошной, выборочный, статистический);

- ценник на материалы, систематизированный по группам, подгруппам и видам.

Получение, обработка и использование всей этой информации «вручную» неприемлемы по следующим основным причинам:

- работа с информацией осуществляется крайне медленно, не успевая за реальными процессами и потребностями производства; отсюда большие потери в

эффективности за счет неоптимального использования возможностей предприятия;

- информационная сфера требует все больших затрат труда, а значит, и увеличения численности работающих;

- малая скорость обмена информации между органами управления и управляемыми объектами (по вертикали), а также между взаимодействующими объектами (по горизонтали) нарушает управление и не может не сказаться на его эффективности;

- затрудняется использование информации – своевременная выборка необходимых для управления данных; нарушается оперативность управления;

- неизбежно дублирование информации, что приводит к удорожанию управления;

- руководители производства перегружаются информацией, которую не в состоянии использовать.

Попытки передать отдельные информационные задачи вычислительной технике приводят лишь к механизации обработки информации, не решая всех упомянутых выше проблем. Преодоление указанных трудностей лежит на путях комплексной автоматизации управления производством.

Сходные трудности с информационными процессами управления существуют и на предприятиях машиностроения, автомобилестроения, например на Волжском автозаводе, где проектная мощность предприятия 660 тысяч автомобилей в год и общая численность промышленного производственного персонала 66 тысяч человек. Длина сборочного конвейера составляет здесь более 150 километров. Огромному по масштабу производству сопутствуют и соответствующие потоки информации. Так, номенклатура изделий только внутреннего производства достигает 7,5 тысяч наименований деталей и сборочных единиц. Для изготовления их применяются десятки разнообразных сложных технологических процессов: механическая и термическая обработка, литье и обработка давлением, сварка, пайка, окраска, нанесение мастик, защитных и полимерных материалов, гальванопластика, химическое покрытие, сборка и т. д. При этом завод потребляет около 4 тысяч наименований технологических материалов и комплектующих изделий. Что касается общей номенклатуры используемых в процессе производства материальных ресурсов, включая материалы для ремонтно-эксплуатационных нужд, запасные части и оборудование, инструмент и оснастку, то она достигает 400 тысяч наименований! Выход из положения здесь, как и в приборостроении, радиостроении, – создание современной системы управления предприятием.

Чтобы глубже разобраться в этой системе, вернемся к понятию управления.

Управление – весьма емкое, многоплановое понятие. Оно объемлет и руководство предприятием-гигантом, и вождение легкового автомобиля. Управление государством и станком, войсками и собственными поступками – все это управление. В чем же общий смысл столь разных проявлений этого слова?

Прежде всего, любой целенаправленный процесс всегда состоит из двух типов операций – рабочих и операций управления. Например, обработка металлов резанием. Рабочие операции – снятие стружки, собственно резание металла; операция управления – последовательная установка резца в такие положения, чтобы в результате резания получилась деталь определенной формы. Даже такое

простое дело, как колка дров, требует как хорошего удара – рабочая операция, так и правильного направления топора при ударе – операция управления.

Для реализации рабочих операций существует технологическое или техническое оборудование: станки, роботы, транспортные устройства и их совокупности, объединенные в участки, цеха, заводы. Но сами по себе они бесполезны. Суппорты станков должны двигаться по определенным траекториям, транспортные устройства вовремя подавать к станкам заготовки и инструмент, в определенном порядке должны запускаться в производство различные партии деталей. И все эти операции должны быть взаимоувязаны между собой, а также в пространстве и во времени. Иначе говоря, все это многообразие требует управления.

Для определения всего того, что для своей целесообразной деятельности требует управления, в кибернетике существует термин **«объект управления»**. И действительно, управляют всегда чем-нибудь: предприятием, цехом, станком, самолетом – объектом управления.

Все реальные системы можно грубо разделить на три группы:

- системы, составляющие элементы которых не связаны между собой, например группа отдельных разнородных деталей;
- системы, элементы которых связаны между собой жестко, когда положение, а в общем случае поведение каждого элемента однозначно определяется положением (поведением) другого, например металлоконструкция;
- системы, занимающие промежуточное положение. Изменение состояния отдельных элементов свободно в границах, определяемых состоянием другого элемента. Точка на ободке колеса может принимать любое положение, однако в пределах одного условия: расстояние ее до оси всегда должно быть одинаковым.

Очевидно, что управлять можно только системами третьего типа. Ни металлоконструкцией, ни беспорядочно сложенной кучей деталей управлять нельзя.

Таким образом, любой объект управления должен прежде всего иметь переменные характеристики. Изменение этих характеристик определяет поведение объекта управления. Между этими характеристиками должна быть постоянная связь. Связи определяют структуру объекта. И наконец, должна существовать возможность изменять некоторые переменные непосредственно извне.

В каждый конкретный момент времени переменные объекта управления принимают определенные значения. Эти значения, или «состояния», определяют общее состояние объекта управления.

Среди переменных обычно выделяют:

*входные* переменные – на которые можно непосредственно действовать извне;

*выходные* – на которые непосредственно воздействовать извне нельзя, но которые доступны для контроля (измерения);

*внутренние* – переменные, на которые нельзя воздействовать извне и которые трудно, сложно или невозможно вообще контролировать.

Входные переменные изменяются под действием возмущающих или управляющих воздействий. Управляющие воздействия, или «управления», – это то, чем можно распоряжаться в процессе управления. Возмущающие воздействия мешают процессу управления, пользоваться ими, влиять на них нельзя.

Среди выходных переменных выделяют группу управляемых переменных, определяющих цель управления – желаемое поведение объекта управления, например: скорость вращения шпинделя, перемещения суппорта, технико-экономические показатели производства.

Формальные зависимости, отражающие совокупность структурных связей между входными, внутренними и выходными переменными, называют математической моделью объекта управления.

Очевидно, что желаемого поведения управляемых переменных можно достичь только путем целенаправленного изменения управляющих воздействий. Целенаправленного, потому что при этом необходимо не только учитывать желаемое поведение, но и знать характер связей между входными и выходными переменными, возможные изменения возмущающих воздействий. Мало знать, что должно быть на выходе объекта управления, нужно уметь это получить. Действительно, сложность управления определяется не только наличием возмущающих воздействий, но и сложностью причинно-следственных и временных связей между входными и управляемыми переменными. Если бы не было этой сложности, надобность в теории управления, в кибернетике отпала бы. И недаром так высоко ценятся хорошие методы и алгоритмы управления, а там, где управление до сих пор формализовать не удается, мы ценим хороших управляющих, обладающих опытом, навыками, позволяющими интуитивно учитывать эту сложность.

Таким образом, **задача управления** – *целенаправленно, с учетом цели, свойств объекта и возмущений, вырабатывать управляющие воздействия.*

Если эта задача выполняется человеком, то тогда мы говорим о ручном управлении, если техническим устройством – об автоматическом управлении. Если в выработке «управлений» участвуют и люди, и технические устройства, то такое управление называют автоматизированным. В любом случае существует что-то или кто-то, что (или кто) вырабатывает управления. Для обозначения этого «что» в теории автоматического управления принят термин «управляющее устройство», или «блок управления», в более общем случае его называют блоком принятия решений.

Термины «управляющее устройство», «блок управления» в наше время, когда для управления применяются вычислительные машины, обеспечивающие за счет режимов разделения времени одновременное управление несколькими объектами, плохо соответствуют реальному положению вещей. Они остались нам в наследие от тех времен, когда управление каждым объектом управления обеспечивалось одним реальным техническим устройством – релейно-контактным блоком, регулятором. Предпочтительнее использовать термин «**элемент управления**». Под ним будем понимать совокупность формальных правил, по которым информация, используемая для управления, перерабатывается в управляющие воздействия.

Эти правила называют *алгоритмами* или *законами управления*. Алгоритмом – если управляющие воздействия вырабатываются с помощью многошагового процесса, законом – если одноэтапно.

Закон обычно выражается формулой или таблицей. Формула может включать как алгебраические и интегрально-дифференциальные зависимости, так и логику. Любой закон может быть представлен алгоритмом, и поскольку любую формулу можно представить в виде последовательности более простых операций. Однако

не всякому алгоритму можно противопоставить закон. Существуют методы выработки решений (управляющих воздействий), которые, по существу, в силу различных причин носят характер последовательности отдельных этапов: методы линейного и динамического программирования, метод ветвей и границ и т. п.

Для выработки управляющих воздействий в общем случае используется информация о текущих значениях:

- управляемых переменных;
- задающих воздействий – переменных, определяющих желаемое поведение объекта управления;

- возмущающих воздействий. Задающие воздействия вырабатываются, как правило, вне системы управления, на верхнем уровне. В тех случаях, когда эта информация заранее записывается в памяти и используется для управления в нужный момент, в состав системы управления включают задающее устройство (в программно-логическом управлении – программатор).

Подобную схему можно найти сегодня в начале большинства книг по управлению самыми различными системами, как социально-экономическими (предприятие, цех, участок), так и техническими (станок, робот, транспортное средство). Основа схемы – два прямоугольника. Один из них – то, чем нужно управлять. Это может быть завод, цех, участок производства, технологический агрегат. Другой прямоугольник – то, что должно управлять объектом, – элемент управления. На заводе – это администрация предприятия, использующая автоматизированную систему управления (АСУ), на участке – АСУ технологическим процессом, применительно к технологическому агрегату – рабочий или автоматическое устройство управления агрегатом. Прямоугольники – элемент и объект управления – связаны двумя линиями – прямой и обратной связью. По линиям циркулирует информация: по одной – туда, по другой – обратно. Туда, на объект управления, идет от элемента управления командная информация: что, когда и как нужно сделать. Обратно, в элемент управления, поступает с объекта информация о его состоянии – доклад о том, что, когда и как сделано, в каком положении находятся элементы станка, робота и т. п. Это сведения о выполнении заданий, наличии материалов, инструмента, работе станков и т. п. В элементе управления информация состояния перерабатывается в командную информацию. На основе этой переработки рождаются указания о дальнейшей работе объекта, команды на перемещение и т. п.

Итак, *первое*: управление – это воздействие органов или устройств управления на объекты управления.

*Второе*: воздействие на объект управления осуществляется в соответствии с принятыми органами управления решениями.

*Третье*: целенаправленная переработка информации, составляющая основу управления, это интеллектуальная, умственная задача. Сегодня она все чаще и во все большем объеме поручается электронным вычислительным машинам.

В связи с тем, что изменения некоторых переменных в системе управления по различным причинам могут иметь кратковременный характер, а информация об этих изменениях влияет на выбор управляющих переменных, элемент управления должен включать в себя еще и память – устройство для фиксации событий, имевших место в предшествующие моменты времени.

Система управления – понятие не материальное. Это совокупность математических моделей реального объекта управления и модели элемента

управления – алгоритма или закона управления. Основная задача этого понятия – формальная или формализованная разработка закона или алгоритма управления по известной модели объекта.

Реальная система управления производственным комплексом представляет собой совокупность контуров управления, расположенных на различных уровнях управления, связанных между собой как по вертикали, когда система нижнего уровня представляет собой объект управления для системы верхнего уровня, так и по горизонтали, если для управления переменными одного объекта необходима информация о состоянии одной или нескольких переменных другого.

Для управления реальной производственной системой (участком, цехом, заводом) необходимо управлять очень большим количеством переменных, как производственных, так и технологических. Управление каждой из них не обязательно требует информации о всех остальных. Как правило, для каждой из переменных нужно учитывать не более пяти-шести переменных. Действительно, любой технологический комплекс состоит из относительно обособленных технологических и вспомогательных агрегатов, как правило связанных друг с другом через одну, редко две переменные. Кроме того, задачи управления на различных уровнях управления характеризуются различными по своему характеру и сущности объектами управления. На нижних уровнях переменные представляют собой, как правило, параметры технологического оборудования: положение, скорость движения, температура, давление и т. п., на верхних – параметры материальных потоков: обрабатываемых материалов, инструмента, оснастки, готовых продуктов и т. п.

Все системы различаются между собой как по типу объекта, так и по способу управления.

Если математическая модель объекта управления отражает связь между установившимися значениями переменных, т. е. инерционными характеристиками объекта можно пренебречь, то такой объект называют *статическим* и систему управления *соответственно статической*. Например, задачи распределения обработки по технологическим агрегатам.

Если же инерционными характеристиками объекта пренебречь нельзя и модель включает время, то объект управления и систему управления называют *динамическими*. К динамическим системам относят широко известные системы регулирования параметров технологических агрегатов.

Если объект и внешние воздействия (возмущающие и задающие) могут быть описаны детерминированными математическими зависимостями, то такие системы называют *детерминированными*, в противном случае – *стохастическими*, или *вероятностными*.

Переменные модели объекта могут иметь *непрерывный* характер или *дискретный*. Непрерывность или дискретность переменных определяется как физическими свойствами объекта, когда объект имеет ограниченное число устойчивых состояний, а параметры переходов из одного устойчивого состояния в другое не интересуют, так и целями управления. Если для цели управления достаточно знать, что переменные объекта находятся в определенных пределах, то используются модели с дискретными переменными.

*Непрерывные системы* – системы с непрерывными переменными описываются алгебраическими и дифференциальными зависимостями. К ним относятся системы автоматического регулирования.

*Дискретные системы* описываются средствами дискретной математики – множествами, отношениями, графами, матрицами, формулами алгебры, логики.

По принципам управления системы делятся на *работающие в реальном масштабе времени* и *работающие по предварительно разработанному плану*, программе. Иногда говорят, что последние работают в «отсроченном режиме».

Отличить первые от вторых можно по следующему признаку. Как известно, для управления необходимо выполнить три группы операций: собрать информацию, выработать на ее основе управляющие воздействия (решения) и, наконец, реализовать, применить эти управляющие воздействия к объекту. Если эти три группы можно во времени разделить, то мы имеем дело с управлением по предварительно разработанной программе или плану. Это понятие несколько шире, чем общепринятое понятие «планирование». Под него подпадают и такие программы, как последовательность опорных точек при обработке на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), и так называемые шаблоны плавок, и программы тепловой обработки, т. е. все случаи, когда управляющие воздействия можно заранее определить и распределить по порядку или во времени.

Процесс управления носит периодический характер, разделен на этапы планирования. Очевидно, что разработка плана или программы возможна, если достаточно достоверно известны или хорошо прогнозируются результаты предыдущего этапа планирования, задающие и возмущающие воздействия. Характерная черта планирования – *пошаговое управление*, причем принятие решения на каждом последующем шаге производится с учетом результатов управления на предыдущем шаге. Вторая особенность планирования – сравнительно сложные *многошаговые методы выработки управляющих решений*, как правило связанные с конструированием и оценкой вариантов или проигрыванием их на модели.

Системы планирования широко распространены не только на верхних уровнях управления производством, но и в процессах управления технологическим оборудованием. Если же все три группы операций: сбор информации, выработка решений и их реализация – неразделимы во времени, то такое управление относят к управлению в реальном времени.

Процесс в таких системах практически непрерывный: сбор информации, выработка решения и его реализация выполняются слитно и непрерывно. Такое управление применяется для управления и инерционными, динамическими объектами. Реакция на непосредственно предшествующие команды или решения на момент выработки последующих еще не известна, прогноза об изменении возмущающих и задающих воздействий, как правило, нет: используется информация о текущих значениях управляемых переменных, задающих и возмущающих воздействиях. В некоторых случаях при наличии в управляющем устройстве памяти используется информация о предшествующих значениях этих переменных и воздействий.

Если процессы быстротекущие, времени на проигрывание вариантов нет. Единственный выход – на каждую ситуацию управления заранее подготовить соответствующий набор управляющих воздействий. Это задача сложная, поскольку ситуаций может быть очень много. Облегчается она тем, что в большинстве случаев между ситуациями и целесообразными, т. е. ведущими к

цели управления, управляющими воздействиями существует функциональная зависимость – закон управления. Эта зависимость устанавливается на основе следующего подхода: контур управления в целом рассматривается как динамическая система, поведение которой определяется как характеристиками объекта, так и характеристикой устройства управления – законом управления.

Выбором соответствующего закона управления можно добиться желаемого поведения системы. Например, в системах непрерывного управления (регулирования) выбором закона управления обеспечиваются устойчивость и качество переходного процесса. Более сложным законом управления можно обеспечить максимальное быстродействие и т. д. Для дискретных систем закон управления выражается в форме логических соотношений. Выбором логической функции можно добиться реализации циклического процесса (цикловое управление). Значение этой функции (управляющее воздействие) может определяться сразу, практически одномоментно (так называемая аппаратная реализация), а может в результате последовательного алгоритмического процесса. Это зависит от сложности функции и имеющихся технических средств.

Необходимо отметить, что четкой границы или признака, отличающего оба типа управления, не существует. Различие заключается в отношении между быстродействием элемента управления и скоростью протекания процесса в объекте управления.

В чистом виде эти два типа управления встречаются редко. Как правило, реальные системы управления используют оба принципа. В системах планирования производства предусматривают механизмы корректировки планов, или «регулирование» производства. В системах регулирования и программно-логического управления, когда возможно, используют заранее запрограммированные режимы.

И наконец, в особый класс выделают так называемые *оптимальные системы* управления. Дело в том, что задача управления, как правило, допускает не одно решение: имеется несколько способов достижения цели управления. Каждому способу соответствуют свои затраты (энергии, времени и т. д.) или характеристики (точность, надежность). Оценка этих показателей называется критерием качества управления. Управление, обеспечивающее наряду с достижением цели минимальные (или максимальные) значения критерия качества, называется оптимальным управлением.

**Оптимизация управления** достигается в основном двумя способами.

Первый способ – планирования или программирования – используется в тех случаях, когда, во-первых, параметры модели объекта управления достоверно известны и не меняются в процессе управления; во-вторых, характер возмущающих и задающих воздействий достоверно известен и не меняется в процессе управления. Тогда существует принципиальная возможность априорного расчета управляющих воздействий, обеспечивающих оптимальный процесс.

К оптимальному типу управления относится управление, использующее алгоритмы линейного, нелинейного и динамического программирования, принцип максимума.

Второй способ применяется тогда, когда параметры модели достоверно неизвестны или меняются во времени либо неизвестен характер возмущающих или задающих воздействий и пренебречь ими нельзя. Оптимизация

обеспечивается в процессе реализации управляемого процесса, в реальном времени. Такой принцип называют *принципом адаптации*, а системы управления соответственно – *адаптивными*.

### **Рекомендуемая литература:**

#### *Основная литература:*

1. Карабутов Н. Н. Структурная идентификация систем. Анализ информационных структур. –М.: Либроком, 2009. – 176 с.
2. Олемской А. И. Синергетика сложных систем. Феноменология и статистическая теория. –М.: Красанд, 2009. – 384 с.
3. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ.- М.:Высш.шк., 1989.
4. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. Наука и искусство решения проблем // Томск: ТГУ, 2004. – 186 с.
5. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем.-М.: Мысль, 1978.-272 с.
6. Анфилатов В.С. Системный анализ в управлении // М.: ФиС, 2001. – 368с.

#### *Дополнительная литература:*

7. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: Учебное пособие.-Спб.: Изд. дом “Бизнес-пресса”, 2000.-326 с.
8. Системный анализ и принятие решений / Словарь-справочник под ред. В.Н. Войковой // М.: Высшая школа, 2004. – 616 с.
9. Волкова, В. Н. Структуризация целей в системе управления высшей школы / В. Н. Волкова. — СПб.: изд-во СПбГТУ, 2000. — 80 с.
10. Волкова, В. Н. Из истории теории систем и системного анализа / В.Н. Волкова. — СПб.: изд-во СПбГТУ, 2001. — 260 с.
11. Волкова, В. Н. Основы теории систем и системного анализа: методики и автоматизированные процедуры для реструктуризации систем управления / В. Н. Волкова. — СПб.: изд-во Политехнического ун-та, 2005. — 72 с.
12. Горелова, Г. В. Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем: когнитивный подход / Г. В. Горелова, Е. Н. Захарова, С. А. Радченко. — Ростов н/Д : изд-во РГУ, 2006. — 330 с.
13. Денисов, А. А. Макроэкономическое моделирование и управление / А. А. Денисов. — СПб.: изд-во Политехнического ун-та, 2006. — 72 с.
14. Емельянов, А. А. Имитационное моделирование экономических процессов / А. А. Емельянов, Е. М. Власова, Р. В. Дума. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 368 с.
15. Качала, В. В. Основы системного анализа : учеб. пособие / В. В. Качала. — Мурманск: изд-во МГТУ, 2003. —104 с.
16. Качанова, Т. П. Основания системологии феноменального / Т. П. Качанова, Б. Ф. Фомин. — СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. —180 с.
17. Кузин, Б. И. Методы и модели управления фирмой / Б. И. Кузин, В. Н. Юрьев, Г. М. Шахдинаров. — СПб.: Питер, 2001. — 432 с.
18. Лукьянова, Л. М. Системный анализ: Структурно-целевой подход: учеб. пособие / Л. М. Лукьянова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Калининград : КГТУ, 2001. — 234 с.

19. Лыноградский, Л. А. Горизонты системного анализа / Л. А. Лыноградский. — Самара : ИЭКА «Поволжье», 2002. — 244 с.