

Курс лекций по дисциплине «Основы системного анализа и моделирование технологических процессов».

Оглавление

Раздел 1. Системный анализ, определение, основные понятия и связь с другими дисциплинами. (лекции 1,2)	3
История развития системного подхода	3
Современный этап научно-технической революции (НТР).....	14
НТР как система.	14
Особенности современной науки.....	16
Создание технических систем – прогрессивное направление развития техники.	17
Основные понятия системного анализа и теории систем.....	19
Раздел 2. Системные свойства. Классификация систем (Лекции 3,4).....	25
Классификация систем.....	28
Раздел 3 Методология системного анализа (лекции 5-6).	38
Принцип системности.	38
Системный подход – основа методологии системного анализа.	40
Основные закономерности организации материального мира.	49
Раздел 4. Моделирование технических систем. Основные понятия.	58
Определение понятия «модель».	59
Классификация моделей.	60
Общие требования к моделям.	63
Структура моделей.	68
Этапы моделирования.....	69
Значение и содержание этапа «постановка задачи».	71
Формализация задачи.....	79
Некоторые типовые проблемы, возникающие при исследовании.	82
Интерполяция, экстраполяция, прогнозирование	82
Линейность и нелинейность	84
Дискретность и непрерывность.....	85
Детерминированность и случайность.....	85
Планирование эксперимента	85
Проверка модели	87
Использование ЭВМ в моделях.	89
Измерительные шкалы.....	91
Раздел 5. Принципы и закономерности исследования и моделирования систем.	93
Закономерности взаимодействия части и целого	93
Закономерности иерархической упорядоченности систем	95

Закономерности осуществимости систем.	96
Закономерности развития систем	98
Закономерности возникновения и формулирования целей.....	101
Раздел 6. Функциональное описание и моделирование систем.....	104
Графические способы функционального описания систем	107
Краткое описание методологии IDEF0	109
Описание синтаксиса языка моделирования	111
Раздел 7. Морфологическое (структурное) описание и моделирования систем.....	115
Методы описания структур	124
Раздел 8. Информационное описание и моделирование систем.....	126
Раздел 9. Основы теоретико-множественного описания и анализа систем.....	135
Система объекта	135
Структура системы.....	136
Полное множество состояний системы.....	137
Функция ограничения на полном множестве состояния.....	137
Мера нечеткости множества состояний системы.....	139
Системная сложность.....	140
Предел Бремермана	140
Вычислительная сложность задачи	141
Мера сложности системы	141
Классы систем.....	143
Методы упрощения систем.....	143
Характеристическая функция.....	150
Динамическая система	152
Устойчивость динамических систем	154
Управляемость динамических систем	154
Интегративные свойства систем	155
Качество системы	155
Эффективность	156
Показатели эффективности	157
Раздел 10. Структура системного анализа.	157
Формирование общего представления системы.....	163
Формирование детального представления системы	164
Раздел 11. Классификация видов моделирования систем.	166
Принципы и подходы к построению математических моделей	174
Этапы построения математической модели	179
Раздел 12. Выбор решения при системном анализе и моделировании технических систем.	181
Постановка задачи.....	181

Декомпозиция задачи принятия решения и оценка альтернатив	183
Композиция оценок свойств и сравнение альтернатив	184
Пример модели принятия решения в условиях неопределённости.....	186
Примеры решения оптимизационной задачи методом динамического программирования	187

Раздел 1. Системный анализ, определение, основные понятия и связь с другими дисциплинами. (лекции 1,2)

Содержание: История развития системного подхода. Современный этап научно-технической революции. Научно-техническая революция как система. Особенности современной науки. Создание технических систем – направление развития техники. Системный анализ. Понятие системы и системности. Система, элемент, подсистема, надсистема, среда. Связи в системе. Типы связей. Внутренние и внешние связи. Входы и выходы. Аспекты системности: онтологический, гносеологический, методологический. Содержание общей теории систем.

Сведение множества к единому – в этом первооснова красоты.

Пифагор

История – это наука о прошлом и наука о будущем.

Л. Февр

История развития системного подхода

Составляющим понятий «системный анализ», «системная проблема», «системное исследование» является слово «система», которое появилось в Древней Эллад 2000–2500 лет назад и первоначально означало: сочетание, организм, устройство, организация, строй, союз. Оно также выражало определенные акты деятельности и их результаты (нечто, поставленное вместе; нечто, приведенное в порядок).

Метафоризация слова «система» была начата Демокритом (460–360 до н. э.). Образование сложных тел из атомов он уподобляет образованию слов из слогов и слогов из букв. Сравнение неделимых форм (элементов с буквами) – один из первых этапов формирования научно-философского понятия, обладающего обобщенным универсальным значением.

На следующем этапе происходят дальнейшая универсализация значения слова, наделение его высшим обобщенным смыслом, что позволяет применять его и к физическим, и к искусственным объектам.

Итак, в античной (древней) философии термин «система» характеризовал упорядоченность и целостность естественных объектов, а термин «синтагма» – упорядоченность и целостность искусственных объектов, прежде всего продуктов познавательной деятельности.

Именно в этот период был сформулирован тезис о том, что целое больше суммы его частей.

Не касаясь вопроса о трактовке системности знания в средневековой философии, отметим лишь, что для выражения интегративности познавательных образований здесь стали использоваться новые термины: сумма, дисциплина, доктрина...

С возникновением науки и философии Возрождения (XV в.) связано радикальное преобразование в истолковании бытия. Трактовка бытия как космоса сменяется рассмотрением его как системы мира. При этом система мира понимается как независимое от человека, обладающее своим типом организации, иерархией, имманентными (свойственными, внутренне присущими какому-либо предмету, явлению, проистекающими из их природы) законами и суверенной структурой. Возникает ряд научных дисциплин, каждая из которых вычленяет в природном мире определенную область и анализирует ее свойственными этим дисциплинам методами.

Астрономия была одной из первых наук, которая перешла к онтолого-натуралистической интерпретации системности мироздания. Большую роль в становлении новой трактовки системности бытия сыграло открытие Н. Коперника (1473–1543). Он создал Гелиоцентрическую систему мира, объяснив, что Земля, как и другие планеты, обращается вокруг Солнца и, кроме того, вращается вокруг своей оси.

Важнейшая особенность представлений о системности предмета познания, характерная для науки эпохи Возрождения, состоит в выдвижении на первый план каузального, а не телеологического способа объяснения. Глубокую и основательную разработку идея системной организации научного знания получила в немецкой классической философии. Структура научного знания, принципы и основания построения теоретических систем стали в ней предметом специального философского, логико-методологического анализа. Немецкий математик и философ И.Г. Ламберт (1728–1777) подчеркивал, что «всякая наука, как и её часть, предстает как система, поскольку система есть совокупность идей и принципов, которая может трактоваться как целое. В системе должны быть субординация и координация». Следует отметить, что он анализировал системность науки на основе обобщенного рассмотрения систем вообще, построения общей системологии.

Новый этап в интерпретации системности научного знания связан с именем И. Канта (1724–1804). Его заслуга состоит не только в четко осознанном системном характере научно-теоретического знания, но и в превращении этой проблемы в методологическую, в выявлении определенных процедур и средств системного конструирования знания. И.Г. Фихте (1762–1814), который считает, что принципы полагания формы знания являются одновременно принципами полагания и его содержания. Исходный тезис Фихте – научное знание есть системное целое.

Теоретическое естествознание XIX–XX вв. исходит из различения предмета и объекта знания. Подчеркивая активный характер человеческого познания, новый способ мысли трактует предмет исследований как нечто созданное и создаваемое человеком в ходе освоения природы. Поднимается роль моделей в познании. Целое понимается уже не как простая сумма, а как функциональная совокупность, которая формируется некоторым заранее задаваемым отношением между элементами. При этом фиксируется наличие особых интегративных характеристик данной совокупности – целостность, несводимость к составляющим элементам. Сама эта совокупность, отношение между элементами (их координация, субординация и т.д.) определяются некоторым правилом или системообразующим принципом. Этот принцип относится как к порождению свойств целого из элементов, так и к порождению свойств элементов из целого. Системообразующий принцип позволяет не только постулировать те или иные свойства элементов и системы, но и предсказывать возможные элементы и свойства системной совокупности.

Марксистская гносеология выдвинула определенные принципы анализа системности научного знания. К ним относятся историзм, единство содержательной и формальной сторон научного знания, трактовка системности не как замкнутой системы, а как развивающейся последовательности понятий и теорий. При таком подходе системность знаний предполагает дальнейшее совершенствование системы понятий...

Попытки разработать общие принципы системного подхода были предприняты врачом, философом и экономистом А.А. Богдановым (1873–1928) в работе «Всеобщая организационная наука (тектология)» (3-е изд. М.; Л., 1925–1929. Ч. 1–3).

Исследования, проведенные уже в наши дни, показали, что важные идеи и принципы кибернетики, сформулированные Н. Винером и особенно У. Росс Эшби, значительно раньше, хотя и в несколько иной форме, были выражены Богдановым.

В еще большей мере это относится к общей теории систем (ОТС) Л. фон Берталанфи, идейная часть которой во многом предвосхищена автором

тектологии. Тектология (греч. – строитель) – весьма оригинальная общенаучная концепция, исторически первый развернутый вариант ОТС. Ее созданием автор хотел бросить вызов марксизму, выдвинув в противовес ему концепцию, которая претендует на универсальность. Для построения тектологии используется материал самых различных наук, в первую очередь естественных. Анализ этого материала приводит к выводу о существовании единых структурных связей и закономерностей, общих для самых разнородных явлений. Основная идея тектологии – признание необходимости подхода к любому явлению со стороны его организованности (у других авторов – системности). Под организованностью понимается свойство целого быть больше суммы своих частей. Чем больше целое разнится от суммы своих частей, тем больше оно организовано. Тектология рассматривает все явления как непрерывные процессы организации и дезорганизации. Принципы организованности и динамичности тесно связаны с принципом целостного рассмотрения отдельных явлений и всего мира вообще.

ОТС и тектология – это две науки об организованности, системности явлений, кибернетика же – наука об управлении этими объектами. Тектология как общая теория включает в сферу своего внимания не только кибернетические принципы, т. е. принципы управления систем, но и вопросы их субординации (иерархических порядков), их распада и возникновения, обмена со средой и веществом и т.д.

Австрийский биолог и философ Л. Фон Берталанфи (1901–1972) первым из западных ученых разработал концепцию организма как открытой системы и сформулировал программу построения ОТС. В своей теории он обобщил принципы целостности, организации, эквифинальности (достижения системой одного и того же конечного состояния при различных начальных условиях) и изоморфизма.

Начиная со своих первых работ, Л. Берталанфи проводит мысль о неразрывности естественно-научного (биологического) и философского (методологического) исследований. Сначала была создана теория открытых систем, граничащая с современной физикой, химией и биологией. Классическая термодинамика исследовала лишь закрытые системы, т. е. не обменивающиеся веществом с внешней средой и имеющие обратимый характер. Попытка применения классической термодинамики к живым организмам (начало XX в.) показала, что, хотя при рассмотрении органических явлений использование физико-химических принципов имеет большое значение, так как в организме имеются системы, находящиеся в равновесии (характеризующимся минимумом свободной энергии и максимумом энтропии), однако сам организм не может рассматриваться как

закрытая система в состоянии равновесия, ибо он не является таковым. Организм представляет собой открытую систему, остающуюся постоянной при непрерывном изменении входящих в нее веществ и энергии (так называемое состояние подвижного равновесия).

В 1940–50 гг. Л. Берталани обобщил идеи, содержащиеся в теории открытых систем, и выдвинул программу построения ОТС, являющейся всеобщей теорией организации. Проблемы организации, целостности, направленности, телеологии, саморегуляции, динамического взаимодействия весьма актуальны и для современной физики, химии, физической химии и технологии, а не только для биологии, где подобные проблемы встречаются повсюду. Пока что такие понятия были чужды классической физике. Если до сих пор унификацию наук видели обычно в сведении всех наук к физике, то, с точки зрения Л. Берталани, единая концепция мира может быть, скорее, основана на изоморфизме законов в различных областях. В результате он приходит к концепции синтеза наук, которую и противоположность редукционизму (т. е. сведению всех наук к физике) называет перспективизмом.

Построенная теория организации является специальной научной дисциплиной. Вместе с тем она выполняет определенную методологическую функцию. В силу общего характера исследуемого предмета (системы) ОТС дает возможность охватить одним формальным аппаратом обширный круг специальных систем. Благодаря этому она может освободить ученых от массового дублирования работ, экономя астрономические суммы денег и времени. К числу недостатков ОТС Л. Берталани относятся неполное определение понятия «система», отсутствие особенностей саморазвивающихся систем и теоретического исследования связи, а также условий, при которых система модифицирует свои формы. Но основной методологический недостаток его теории заключается в утверждении автора о том, что она выполняет роль философии современной науки, формируя философски обобщенные принципы и методы научного исследования. В действительности это не так. Ибо для философского учения о методах исследования необходимы совершенно иные (новые) исходные понятия и иная направленность анализа: абстрактное и конкретное специфически мысленное знание, связь знаний, аксиоматическое построение знаний и др., что отсутствует в ОТС.

Однако, учитывая большое методологическое значение работы Л. Берталани, рассмотрим различные направления в разработке теории систем. В соответствии с его взглядами, системная проблематика сводится к ограничению применения традиционных аналитических процедур в науке.

Обычно системные проблемы выражаются в полуметафизических понятиях и высказываниях, подобных, например, понятию «эмерджентная эволюция» или утверждению «целое больше суммы его частей», однако они имеют вполне определенное операционное значение. При применении «аналитической процедуры» некоторая исследуемая сущность разлагается на части, и, следовательно, затем она может быть оставлена или воссоздана из собранных вместе частей, причем эти процессы возможны как мысленно, так и материально. Это основной принцип «классической» науки, который может осуществляться различными путями: разложением исследуемого явления на отдельные причинные цепи, поисками «атомарных» единиц в различных областях науки и т. д. Научный прогресс показывает, что этот принцип классической науки, впервые сформулированный Галилеем и Декартом, приводит к большим успехам при изучении широкой сферы явлений.

Применение аналитических процедур требует выполнения двух условий. Во-первых, необходимо, чтобы взаимодействие между частями данного явления отсутствовало или было бы пренебрежимо мало для некоторой исследовательской цели. Только при этом условии части можно реально, логически или математически «извлекать» из целого, а затем «собирать». Во-вторых, отношения, описывающие поведение частей, должны быть линейными. Только в этом случае имеет место отношение суммативности, т. е. форма уравнения, описывающего поведение целого, такова же, как и форма уравнений, описывающих поведение частей; наложение друг на друга частных процессов позволяет получить процесс в целом и т.д.

Для образований, называемых системами, т.е. состоящих из взаимодействующих частей, эти условия не выполняются. Прототипом описания систем являются системы дифференциальных уравнений, в общем случае нелинейных. Систему, или «организованную сложность», можно описать через «сильные взаимодействия» или взаимодействия, которые «нетривиальны», т.е. нелинейны. Методологическая задача теории систем, таким образом, состоит в решении проблем, которые носят более общий характер, чем аналитически-суммативные проблемы классической науки.

Существуют различные подходы к таким проблемам. Автор намеренно использует довольно расплывчатое выражение – «подходы», поскольку они логически неоднородны, характеризуются различными концептуальными моделями, математическими средствами, исходными позициями и т.д. Однако все они являются теориями систем. Если оставить в стороне подходы в прикладных системных наследованиях, таких как системотехника,

исследование операций, линейное и нелинейное программирование и т.д., то наиболее важными являются следующие подходы.

«Классическая» теория систем. Эта теория использует классическую математику и имеет цели: установить принципы, применимые к системам вообще или к их определенным подклассам (например, к закрытым и открытым системам); разработать средства для их исследования и описания и применить эти средства к конкретным случаям. Учитывая достаточную общность получаемых результатов, можно утверждать, что некоторые формальные системные свойства относятся к любой сущности, которая является системой (к открытым системам, иерархическим системам и т.д.), даже если ее особая природа, части, отношения и т.д., не известны или не исследованы. Примерами могут служить: обобщенные принципы кинетики, применимые, в частности, к популяциям молекул или биологических существ, т.е. к химическим и биологическим системам; уравнения диффузии, используемые в физической химии и для анализа распространения слухов; понятия устойчивого равновесия и модели статистической механики, применимые к транспортным потокам; аллометрический анализ биологических и социальных систем.

Использование вычислительных машин и моделирование. Системы дифференциальных уравнений, применяемые для «моделирования» или спецификации систем, обычно требуют много времени для решения, даже если они линейны и содержат немного переменных; нелинейные системы уравнений разрешимы только в некоторых частных случаях. По этой причине с использованием вычислительных машин открылся новый подход к системным исследованиям. Дело не только в значительном облегчении необходимых вычислений, которые иначе потребовали бы недопустимых затрат времени и энергии, и замене математической изобретательности заранее установленными последовательностями операций. Важно еще и то, что при этом открывается доступ в такие области, где в настоящее время отсутствует соответствующая математическая теория и нет удовлетворительных способов решения.

Так, с помощью вычислительных машин могут анализировать системы, по своей сложности далеко превосходящие возможности традиционной математики; с другой стороны, вместо лабораторного эксперимента можно воспользоваться моделированием на вычислительной машине и построенная таким образом модель затем может быть проверена в реальном эксперименте. Таким способом Б. Гесс, например, рассчитал 14-звенную цепь реакций гликолиза в клетке на модели, содержащей более 100 нелинейных

дифференциальных уравнений. Подобный анализ стал обычным делом в экономических разработках, при исследовании рынка и т. д.

Теория ячеек. Одним из аспектов системных исследований, который следует выделить, поскольку эта область разработана чрезвычайно подробно, является теория ячеек, изучающая системы, составленные из подъединиц с определенными граничными условиями, причем между этими подъединицами имеют место процессы переноса. Такие ячейечные системы могут иметь, например, «цепную» или «сосковую» структуру (цепь ячеек или центральную ячейку, сообщающуюся с рядом периферийных ячеек). Вполне понятно, что при наличии в системе трех и более ячеек математические трудности становятся чрезвычайно большими. В этом случае анализ возможен лишь благодаря использованию преобразований Лапласа и аппарата теорий сетей и графов.

Теория множеств. Общие формальные свойства систем и формальные свойства закрытых и открытых систем могут быть аксиоматизированы в языке теории множеств. По математическому изяществу этот подход выгодно отличается от более грубых и специализированных формулировок «классической» теории систем. Связи аксиоматизированной теории систем с реальной проблематикой системных исследований пока выявлены весьма слабо.

Теория графов. Многие системные проблемы относятся к структурным и топологическим свойствам систем, а не к их количественным отношениям. В этом случае используется несколько различных подходов. В теории графов, особенно в теории ориентированных графов (диграфов), изучаются реляционные структуры, представляемые в топологическом пространстве. Эта теория применяется для исследования реляционных аспектов биологии. В магматическом смысле она связана с матричной алгеброй, но своими моделями – с тем разделом теории ячеек, в котором рассматриваются системы, содержащие частично «проницаемые» подсистемы, а вследствие этого – с теорией открытых систем.

Теория сетей. Эта теория, в свою очередь, связана с теориями множеств, графов, ячеек и т. д. Она применяется к анализу таких систем, как нервные сети.

Кибернетика. В основе кибернетики, т.е. теории систем управления, лежит связь (передача информации) между системой и средой и внутри системы, а также управление (обратная связь) функциями системы относительно среды. Кибернетические модели допускают широкое применение, но их нельзя отождествлять с теорией систем вообще. В биологии и других фундаментальных науках кибернетические модели позволяют

описывать формальную структуру механизмов регуляции, например, при помощи блок-схем и графов потоков. Использование кибернетических моделей позволяет установить структуру регуляции системы даже в том случае, когда реальные механизмы остаются неизвестными и система представляет собой «черный ящик», определяемый только его входом и выходом. Таким образом, одна и та же кибернетическая схема может применяться к гидравлическим, электрическим, физиологическим и другим системам. Тщательно разработанная техническая теория сервомеханизмов применяется естественным системам в ограниченном объеме.

Теория информации. По К. Шеннону, математическое выражение для понятия информации изоморфно выражению для энтропии в термодинамике. Считается, что понятие информации можно использовать в качестве меры организации. Хотя теория информации имеет большое значение для техники связи, ее применение в науке весьма незначительно. Главной проблемой остается выяснение отношения между информацией и организацией, между теорией информации и термодинамикой.

Теория автоматов. Это так называемая теория абстрактных автоматов, имеющих вход, выход, иногда способных действовать методом проб и ошибок и обучаться. Общей моделью теории автоматов является машина Тьюринга, которая представляет собой абстрактную машину, способную печатать (или стирать) на ленте конечной длины цифры 1 и 0. Можно показать, что любой сколь угодно сложный процесс может моделироваться машиной Тьюринга, если этот процесс можно выразить конечным числом операций. В свою очередь, то, что возможно логически (т.е. в алгоритмическом символизме), может также быть сконструировано – в принципе, но не всегда практически – автоматом (т. е. алгоритмической машиной).

Теория игр. Несмотря на то, что теория игр несколько отличается от других рассмотренных системных подходов, все же ее можно поставить в ряд наук о системах. В ней рассматривается поведение «рациональных» игроков, пытающихся достичь максимальных выигрышей и минимальных потерь за счет применения соответствующих стратегий в игре с соперником (или природой). Следовательно, теория игр рассматривает системы, включающие антагонистические силы.

Теория решений. Эта математическая теория изучает условия выбора между альтернативными возможностями.

Теория очередей. Рассматривает оптимизацию обслуживания при массовых запросах. Несмотря на неоднородность и явную неполноту проведенного рассмотрения, отсутствие достаточной четкости в различении моделей (например, моделей открытой системы, цепи обратной связи) и

математических формализмов (например, формализмов теорий множеств, графов, игр), такое перечисление позволяет показать, что существует целый ряд подходов к исследованию систем, а некоторые из них обладают мощными математическими методами. Проведение системных исследований означает прогресс в анализе проблем, которые ранее не изучались, считались выходящими за пределы науки или чисто философскими. Хорошо известно, что проблема соответствия между моделью и реальностью чрезвычайно сложна. Нередко мы располагаем тщательно разработанными математическими моделями, но остается неясным, как можно применять их в конкретном случае. Для многих фундаментальных проблем вообще отсутствуют подходящие математические средства. Чрезмерные ожидания привели в последнее время к разочарованию. Так, кибернетика продемонстрировала свое влияние не только в технике, но и в фундаментальных науках; построила модели ряда конкретных явлений, показала научную правомерность телеологического объяснения и т.д. Тем не менее кибернетика не создала нового широкого «мировоззрения», оставаясь скорее расширением, чем заменой механистической концепции. Теория информации, математические основы которой детально разработаны, не смогла построить интересных приложений в психологии и социологии. Большие надежды возлагались на применение теории игр к вопросам войны и политики, но едва ли можно считать, что она улучшила политические решения и положение дел в мире. Эту неудачу можно было ожидать, учитывая, как мало существующие державы походят на «рациональных» игроков теории игр. Понятия и модели равновесия, гомеостазиса, регулирования приложимы для описания процессов функционирования систем, но они неадекватны для анализа явлений измерения, дифференциации, эволюции, уменьшения энтропии, творчества и т.д. Теория открытых систем широко применяется для описания явлений биологии (и техники), но необходимо предостеречь против неосмотрительного распространения ее на те области, для которых она не предназначена. Вполне очевидно, что отмеченные ограниченности системных научных подходов, существующих едва ли больше двадцати-тридцати лет, совершенно естественны. В конечном счете разочарование, о котором мы только что говорили, объясняется применением моделей, полезных в определенных аспектах, к проблемам метафизического и философского порядка.

Несмотря на то что математические модели обладают важными достоинствами — четкостью, возможностью строгой дедукции, проверяемостью и т.д., — не следует отказываться от использования моделей, сформулированных в обычном языке. Вербальная модель лучше, чем

отсутствие модели вообще или математическая модель, которая при насильственном насаждении фальсифицирует реальность. Многие теории, получившие огромное влияние в науке, являются нематематическими по своему характеру (например, психоаналитическая теория), а в других случаях лежащие и их основе математические конструкции осознаются позднее и охватывают лишь отдельные аспекты соответствующих эмпирических данных (как в теории отбора).

Математика, по сути дела, сводится к установлению (алгоритмов, которые более точны, чем алгоритмы обычного языка. История науки свидетельствует о том, что описание проблем на обычном языке часто предшествует их математической формулировке, т.е. отысканию алгоритма. Приведем несколько хорошо известных примеров: знаки, используемые для обозначения чисел и счета, эволюционировали от слов естественного языка к римским цифрам (полувербальным, несовершенным, полуалгебраическим) и далее – к арабской численной символике, в которой важное значение имеет положение знака; уравнения первоначально формулировались в словесной форме, затем – с использованием примитивного символизма, который мастерски применял Диофант и другие основатели алгебры, и, наконец, в современном символизме; для многих теорий, например для теории Дарвина, математические основы определяются значительно позднее, чем создаются. Вероятно, лучше иметь сначала какую-то нематематическую модель со всеми ее недостатками, но охватывающую некоторый не замеченный ранее аспект исследуемой реальности и позволяющую надеяться на последующую разработку соответствующего алгоритма, чем начинать со скороспелых математических моделей. Таким образом, модели, выраженные в обычном языке, оставляют себе место в теории систем. Идея системы сохраняет значение даже там, где ее нельзя сформулировать математически или где она остается скорее направляющей идеей, чем математической конструкцией.

Как мы видели ранее, в рамках системного подхода существуют и механистические, и организмические тенденции и модели, пытающиеся познать системы либо с помощью таких понятий, как «анализ», «линейная (включая круговую) причинность», «автомат» и т.д., либо при помощи понятий «целостность», «взаимодействие», «динамика» и им подобных. Эти два типа моделей не исключают друг друга и даже могут использоваться для описания одних и тех же явлений. Итак, подводя итоги, ОТС у Л. Бераланфи выступает в двух смыслах. В широком – как основополагающая, фундаментальная наука, охватывающая всю совокупность проблем, связанных с исследованием и конструированием систем. В теоретическую часть включаются 12 направлений, приведенных выше. В узком смысле –

ОТС, стремящаяся вывести из общего определения системы как комплекса взаимодействующих элементов понятия, относящиеся к организованным целым (взаимодействие, сумма, централизация, финальность и т.д.), и применяющая их к анализу конкретных явлений. Прикладная область общей теории систем включает, согласно Берталанфи: 1) системотехнику; 2) исследование операций; 3) инженерную психологию.

Системные исследования – вся совокупность научных и технических проблем, которые при всей их специфике и разнообразии сходны в понимании и рассмотрении исследуемых ими объектов как систем, т. е. множества взаимосвязанных элементов, выступающих в виде единого целого.

Соответственно этому системный подход – эксплицитное (разъяснительное) выражение процедур представления объектов как систем и способов их описания, объяснения, предвидения, конструирования и т. д.

Общая теория систем, таким образом, выступает в этом случае как обширный комплекс научных дисциплин. Следует, однако, отметить, что при таком истолковании в известной мере теряется определенность задач теории систем и ее содержания. Строго научной концепцией (с соответствующим аппаратом, средствами и т.д.) можно считать лишь общую теорию систем в узком смысле. Что же касается общей теории систем в широком смысле, то она или совпадает с общей теорией систем в узком смысле (один аппарат, одни исследовательские средства и т.д.), или представляет собой действительное расширение и обобщение общей теории систем в узком смысле и аналогичных дисциплин, однако тогда встает вопрос о развернутом представлении ее средств, методов, аппарата и т.д. Без ответа на этот вопрос общая теория систем в широком смысле фактически остается лишь некоторым проектом (пусть даже очень заманчивым) и вряд ли может быть развита в строгую научную теорию.

Современный этап научно-технической революции (НТР)

НТР как система.

Машинное производство (конец XVII в.) положило начало превращению науки в непосредственную производительную силу и тем самым открыло огромные возможности для технологического применения достижений науки.

С этого времени человечество встало на путь научно-технического прогресса (НТП), при котором изменения в отдельных элементах средств производства стали зависеть прежде всего не от опыта работника или

эмпирических знаний изобретателя, а от уровня теоретического мышления, воплощенного в естественных науках.

К середине XX в. намечается принципиально новый этап НТП – НТР, явившийся закономерным шагом человеческой истории и носящий глобальный характер. Это означает, что революционные изменения охватили все разделы науки, техники и производства, что НТР повлияла на все стороны общественной жизни, затронула, хотя и в неодинаковой мере, все регионы планеты и все социальные системы.

Познанию сущности НТР, что является основной задачей теоретического мышления. Можно выявить существенные признаки НТР, характеризующие ее природу. К ним относятся:

- а) слияние научной революции с технической при опережающем развитии науки;
- б) превращение науки в непосредственную производительную силу;
- в) органическое объединение элементов производственного процесса в единой автоматизированной система;
- г) тенденция к замене непосредственной деятельности, труда человека функционированием «овеществленного знания во всех звеньях непосредственного производственного процесса;
- д) формирование нового типа работника;
- е) переход от экстенсивного к интенсивному развитию производства (Ф. Кутта. Человек – труд – техника. М.: Прогресс, 1970).

На начальном этапе осмысления НТР, её понимание происходило с позиций обыденного сознания, фиксируя внешние проявления, такие как новые ткани, продукты бытовой химии, телевидение, новые лекарственные препараты, бытовая техника, техника транспорта, связи, торговли, производственная техника и т.п. Лишь постепенно исследователи подошли к мысли о том, что за внешними поверхностными событиями лежит коренной переворот во всей структуре производительных сил. И наконец, было показано, что в основе этого переворота находится новая глубинная, внутренняя связь науки, техники и производства как особой системы, сложившейся именно в нашу эпоху.

Взаимосвязи науки, техники и производства зародились давно и достаточно четко проявились уже в XIX в. Непостоянные, случайные в прошлом связи становятся органическими, организованными, структурно закрепленными, т.е. системными, только в эпоху НТР и обуславливают эту эпоху. Возникновение такой системы есть наиболее общий качественный результат научно-технической революции, по мере развития элементов и связей этой системы развивается и НТР. Содержание науки, техники и

производства, а также структурные связи между ними несут разное наполнение и направленность в зависимости от социальной структуры и целей общества, в котором функционирует НТР, от возможности планомерно влиять на изменение элементов НТР и организацию отношений между ними, от степени управляемости этими процессами.

Анализ системы наука – техника – производство неполон без учета ее социальных последствий. Один из важнейших моментов социальных последствий НТР относится к преобразованию личности. Происходит оно в двух различных плоскостях: во-первых, изменение личностного элемента внутри научной, научно-технической или производственной деятельности; во-вторых, развитие человека во внепроизводственной сфере через создание новой жизненной среды. Система наука — техника — производство как глубинная сущность НТР, или сущность второго уровня, является до некоторой степени условно-абстрактной и требует поэтому дополнения ее элементами, в которых отражены социальные последствия НТР. Ими являются общество и человек. Таким образом, в широком плане НТР можно представить как систему наука – техника – производство – общество – человек.

Особенности современной науки

Как уже говорилось НТР является важнейшей особенностью нашей эпохи, которая выражается в качественном скачке от одного состояния науки к другому. Это предполагает коренную ломку представлений и методов в естественных и технических науках, открытие новых фундаментальных закономерностей объективного мира и обуславливает этим количественные и качественные изменения на всех этапах разработки современной техники.

Наглядными примерами этого процесса являются бурное появление новых отраслей знания, новых научных дисциплин, возникающих на стыках старых, появление комплексных «гибридных» наук, создание новых наук на основе многосторонних связей между старыми науками, рождение принципиально новых методов и принципов исследования, дающих плодотворные результаты. Такими новыми «синтетическими» дисциплинами являются физическая химия, астроботаника, биохимия, бионика (биологическая кибернетика), химическая физика, инженерная биология, химотроника и многие другие.

Отметим особенности современного научного познания.

1. Дифференциация и интеграция в развитии науки. Дифференциация науки позволяет углубить знание о предмете, одновременно с этим в своём

развитии интеграция наук даёт широту и как следствие опору на различные науки при выводе новых знаний.

2. Приобретение современными науками всё большей строгости и точности. Практически все отрасли науки переходят к математическому обоснованию, количественному измерению. Однако не стоит забывать и о качественном определении явлений и фактов, без которых нет настоящей науки.

3. Увеличение скорости развития науки. Ускорение перехода от научной идеи к её реализации и внедрению в производство.

4. Увеличение опасности субъективизма в научных исследованиях.

5. Всё больше научных достижений становятся не результатом деятельности одного учёного, а коллектива. Можно сказать, что индивидуальный период производства научной информации меняется «машинным».

6. Исследования объектов и явлений ведутся без предварительных их расчленений на обособленные части, а во взаимодействии всех их частей. Таким образом, объекты изучают как целое, лишь мысленно вычлняя те или иные его стороны.

На фоне перечисленных особенностей все отчетливее выступает тенденция к синтезу знаний, получаемых различными отраслями науки. По мере расчленения науки на отдельные дисциплины уменьшается количество связей между ними и увеличивается вероятность замедления научно-технического прогресса из-за утраты возможностей общения.

Метод целостного подхода к объектам имеет важнейшее значение в становлении более высокой ступени мышления, а именно перехода его от аналитической ступени к синтетическому мышлению, которое направляет познавательный процесс к более всестороннему и глубокому познанию явления.

В современной технике, природе и обществе мы, как правило, имеем дело с самыми различными системами. Их наличие позволяет утверждать, что бесконечное многообразие объектных систем представляет собой внешний мир. Но только в последние три десятилетия мы являемся свидетелями быстрого развития понятия «система», ставшего ключевым в научном исследовании. Подход к объектом исследования как к системам выражает одну из главных особенностей современного научного познания.

Создание технических систем – прогрессивное направление развития техники.

Формирование свойств системности в истории развитии техники открыло путь к становлению сложных технических систем и комплексов. Они обеспечивают революционные перемены в технологии и организации производства, многократное повышение производительности труда, снижение материалоемкости и энергоемкости, улучшение качества продукции, рост фондоотдачи.

В своем развитии технические системы прошли через ряд исторически последовательных уровней: от древних кремневых, составных орудий к простейшим машинам XVII–XVIII вв. и затем – к современным техническим системам: сложным и большим. Это развитие может быть представлено тремя историческими периодами: от орудийной (ручной) техники к машинной, а затем к автоматическим системам машин.

В период орудийной техники постепенное усложнение ее разновидностей реализуется путём соединения объектов в отдельные устройства. Она нарастает в последующих исторических периодах, проявляя себя в увеличении габаритных размеров и массы технических средств, их сложности и стоимости.

Машинный период развития техники характеризуется появлением совокупности элементов, находящихся отношениях и связях между собой, формированием определенной целостности структурного и функционального единства. Это уже – основополагающее системное свойство, ибо характеризует взаимодействие на базе наличия общих структурных элементов.

В полной мере оно реализуется при создании управляющих устройств (в третьем периоде) и в превращении их в необходимый составной элемент машин как технических систем. В дальнейшем это обуславливает повышение уровня автоматизации технических систем. Итак, каждому периоду исторического развития техники присуще становление характеристик структурного и функционального целого, которые в своей совокупности образуют это целое не сводящиеся к сумме частей.

В современных технических системах системные свойства проявляются в следующем:

- движение к целостности, функциональному единству (общей цели, общему назначению), приводящее к сложному иерархическому строению системы;
- увеличение разнообразия типов частей системы, выполняемых ими функций, что обуславливает различия в их абсолютной стоимости и т.д.;
- усложнение поведения;

- наличие и умножение связей (количественных и качественных, положительных и отрицательных, одноплановых и многоплановых, полезных и вредных, внутрисистемных и межсистемных...);
- повышение уровня автоматизации, означающее, в частности, увеличение степени относительной самостоятельности ТС в ее поведении;
- нерегулярное, статистически распределенное во времени поступление внешних воздействий; нелинейности характеристик; многоаспектность (техническая и др.);
- контринтуитивность (причина и следствие жестко однозначно не связаны ни во времени, ни в пространстве).

Основные понятия системного анализа и теории систем.

Системный анализ – это научная дисциплина, занимающаяся проблемами принятия решений в условиях анализа большего количества информации различной природы.

Целью применения системного анализа является повышение степени обоснованности принимаемого решения, расширение множества вариантов, среди которых производится обоснованный выбор. В максимально упрощенном виде системный анализ – это некоторая методика, позволяющая при принятии решения не упустить из рассмотрения важные стороны и связи изучаемого объекта, процесса, явления.

Одной из основных задач системного анализа является выявление проблем, их изучение и формулирование целей, и это зачастую оказывается более трудной задачей, чем последующий выбор лучшего решения. Важное место в системном анализе занимают и проблемы организации, в том числе проблемы управления в иерархических системах, перестройки структур систем и др. Задача уяснения проблем и целей может быть успешно решена при совместной работе специалистов в соответствующей отрасли науки, производства и математиков – системных аналитиков.

Другой основной задачей системного анализа является выбор лучшего для достижения цели решения, что, в свою очередь, предполагает наиболее полное перечисление возможных вариантов решения – альтернатив, среди которых и ищется наилучшее решение. Для этого в системном анализе разрабатываются методы выбора решения и обоснования критериев, характеризующих качество решения.

В системном анализе используется современный математический аппарат и вычислительные системы, однако для описания сложных систем, в

том числе предсказания их поведения, оказывается невозможным опираться только на строгие математические методы.

Поэтому в системном анализе используются неформальные процедуры – рациональные рассуждения различной природы, и одной из центральных методологических проблем системного анализа, возникающей при изучении сложных систем, является объединение формальных и неформальных методов анализа и синтеза. Основным инструментом, обеспечивающим это объединение, являются имитационные модели, созданные на базе ЭВМ.

Принцип системности – это проявление имеющего исторические традиции системообразующего начала, стремления представить знания в виде некоторой непротиворечивой системы.

Непосредственно из принципа системности вытекает системный подход, являющийся общей методологией системных исследований, которая может быть, в свою очередь, представлена в виде набора методологических подходов (принципов) к исследованию системы.

При системном подходе система является объектом исследования.

Существует много определений *системы*.

1. Система есть комплекс элементов, находящийся во взаимодействии.
2. Система – это множество объектов вместе с отношениями этих объектов.
3. Система – множество элементов находящихся в отношениях или связях друг с другом, образующая целостность или органическое единство (толковый словарь)

Термины «отношение» и «взаимодействие» используются в самом широком смысле, включая весь набор родственных понятий таких как ограничение, структура, организационная связь, соединение, зависимость и т.д.

Таким образом, система S представляет собой упорядоченную пару $S = (A, R)$, где A – множество элементов; R – множество отношений между A . Система – это полный, целостный набор элементов (компонентов), взаимосвязанных и взаимодействующих между собой так, чтобы могла реализоваться функция системы.

Исследование объекта как системы предполагает использование ряда систем представлений (категорий) среди которых основными являются:

1. Структурное представление связано с выделением элементов системы и связей между ними.

2. Функциональное представление систем – выделение совокупности функций (целенаправленных действий) системы и её компонентов направленное на достижение определённой цели.

3. Макроскопическое представление – понимание системы как нерасчленённого целого, взаимодействующего с внешней средой.

4. Микроскопическое представление основано на рассмотрении системы как совокупности взаимосвязанных элементов. Оно предполагает раскрытие структуры системы.

5. Иерархическое представление основано на понятии подсистемы, получаемом при разложении (декомпозиции) системы, обладающей системными свойствами, которые следует отличать от её элемента – неделимого на более мелкие части (с точки зрения решаемой задачи). Система может быть представлена в виде совокупностей подсистем различных уровней, составляющую системную иерархию, которая замыкается снизу только элементами.

6. Процессуальное представление предполагает понимание системного объекта как динамического объекта, характеризующегося последовательностью его состояний во времени.

Рассмотрим определения других понятий, тесно связанных с системой и её характеристиками.

Объект.

Объектом познания является часть реального мира, которая выделяется и воспринимается как единое целое в течение длительного времени. Объект может быть материальным и абстрактным, естественным и искусственным. Реально объект обладает бесконечным набором свойств различной природы. Практически в процессе познания взаимодействие осуществляется с ограниченным множеством свойств, лежащих в пределах возможности их восприятия и необходимости для цели познания. Поэтому система как образ объекта задаётся на конечном множестве отобранных для наблюдения свойств.

Внешняя среда.

Понятие «система» возникает там и тогда, где и когда мы материально или умозрительно проводим замкнутую границу между неограниченным или некоторым ограниченным множеством элементов. Те элементы с их соответствующей взаимной обусловленностью, которые попадают внутрь, – образуют систему.

Те элементы, которые остались за пределами границы, образуют множество, называемое в теории систем «системным окружением» или просто «окружением», или «внешней средой».

Из этих рассуждений вытекает, что немислимо рассматривать систему без её внешней среды. Система формирует и проявляет свои свойства в процессе взаимодействия с окружением, являясь при этом ведущим компонентом этого воздействия.

В зависимости от воздействия на окружение и характер взаимодействия с другими системами функции систем можно расположить по возрастающему рангу следующим образом:

- пассивное существование;
- материал для других систем;
- обслуживание систем более высокого порядка;
- противостояние другим системам (выживание);
- поглощение других систем (экспансия);
- преобразование других систем и сред (активная роль).

Всякая система может рассматриваться, с одной стороны, как подсистема более высокого порядка (надсистемы), а с другой, как надсистема системы более низкого порядка (подсистема). Например, система «производственный цех» входит как подсистема в систему более высокого ранга – «предприятие». В свою очередь, надсистема «предприятие» может являться подсистемой «корпорации».

Обычно в качестве подсистем фигурирует более или менее самостоятельные части систем, выделяемые по определённым признакам, обладающие относительной самостоятельностью, определённой степенью свободы.

Компонент – любая часть системы, вступающая в определённые отношения с другими частями (подсистемами, элементами).

Элементом системы является часть системы с однозначно определёнными свойствами, выполняющие определённые функции и не подлежащие дальнейшему разбиению в рамках решаемой задачи (с точки зрения исследователя).

Понятие элемент, подсистема, система взаимопреобразуемы, система может рассматриваться как элемент системы более высокого порядка (метасистема), а элемент при углубленном анализе, как система. То обстоятельство, что любая подсистема является одновременно и относительно самостоятельной системой приводит к 2 аспектам изучения систем: на макро- и микроуровнях.

При изучение на макроуровне основное внимание уделяется взаимодействию системы с внешней средой. Причём системы более высокого уровня можно рассматривать как часть внешней среды. При таком подходе главными факторами являются целевая функция системы (цель), условия её

функционирования. При этом элементы системы изучаются с точки зрения организации их в единое целое, влияние на функции системы в целом.

На микроуровне основными становятся внутренние характеристики системы, характер взаимодействия элементов между собой, их свойства и условия функционирования.

Для изучения системы сочетаются оба компонента.

Структура системы.

Под структурой системы понимается устойчивое множество отношений, которое сохраняется длительное время неизменным, по крайней мере в течение интервала наблюдения. Структура системы опережает определенный уровень сложности по составу отношений на множестве элементов системы или что эквивалентно, уровень разнообразия проявлений объекта.

Связи – это элементы, осуществляющие непосредственное взаимодействие между элементами (или подсистемами) системы, а также с элементами и подсистемами окружения.

Связь – одно из фундаментальных понятий в системном подходе. Система как единое целое существует именно благодаря наличию связей между её элементами, т.е., иными словами, *связи выражают законы функционирования системы*. Связи различают по характеру взаимосвязи как прямые и обратные, а по виду проявления (описания) как детерминированные и вероятностные.

Прямые связи предназначены для заданной функциональной передачи вещества, энергии, информации или их комбинаций – от одного элемента к другому в направлении основного процесса.

Обратные связи, в основном, выполняют осведомляющие функции, отражая изменение состояния системы в результате управляющего воздействия на нее. Открытие принципа обратной связи явилось выдающимся событием в развитии техники и имело исключительно важные последствия. Процессы управления, адаптации, саморегулирования, самоорганизации, развития невозможны без использования обратных связей.

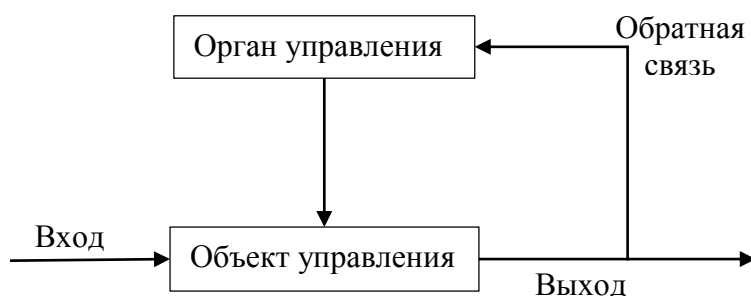


Рис. – Пример обратной связи

С помощью обратной связи сигнал (информация) с выхода системы (объекта управления) передается в орган управления. Здесь этот сигнал, содержащий информации о работе, выполненной объектом управления, сравнивается с сигналом, задающим содержание и объем работы (например, план). В случае возникновения рассогласования между фактическим и плановым состоянием работы принимаются меры по его устранению.

Основными функциями обратной связи являются:

- противодействие тому, что делает сама система, когда она выходит за установленные пределы (например, реагирование на снижение качества);
- компенсация возмущений и поддержание состояния устойчивого равновесия системы (например, неполадки в работе оборудования);
- синтезирование внешних и внутренних возмущений, стремящихся вывести систему из состояния устойчивого равновесия, сведение этих возмущений к отклонениям одной или нескольких управляемых величин (например, выработка управляющих команд на одновременное появление нового конкурента и снижение качества выпускаемой продукции);
- выработка управляющих воздействий на объект управления по плохо формализуемому закону. Например, установление более высокой цены на энергоносители вызывает в деятельности различных организаций сложные изменения, меняют конечные результаты их функционирования, требуют внесения изменений в производственно-хозяйственный процесс путем воздействий, которые невозможно описать с помощью аналитических выражений.

Детерминированная (жесткая) связь, как правило, однозначно определяет причину и следствие, дает четко обусловленную формулу взаимодействия элементов. Вероятностная (гибкая) связь определяет неявную, косвенную зависимость между элементами системы. Теория вероятности предлагает математический аппарат для исследования этих связей, называемый «корреляционными зависимостями».

Работы в области теоретических основ системных исследований охватывают **три аспекта (направления, проблемные области) исследований:**

- **онтологические** основания системных исследований объектов мира – системность как **сущность** мира в целом и его объектов; т.е. **системностью обладают объекты окружающего мира** (в данном случае термин «объект» понимается как обобщенный, нейтральный); Примеры: Солнечная система, Экосистема, Металлургический завод, Популяция животных, Отдельная особь, Организм в целом и его функциональные

подсистемы (нервная, кровообращения, пищеварительная), Клетка организма, атом.

- **гносеологические** основания системных исследований – системные принципы и установки теории **познания**; Примеры: классификация Карла Линнея. Карл Линней, шведский физиолог, был профессором медицины в университете города Упсала. Он заведовал большим ботаническим садом, который был нужен университету для проведения научных исследований. Люди присылали ему растения и семена со всего света для выращивания в ботаническом саду. Именно благодаря интенсивному изучению этой огромной коллекции растений Карл Линней сумел решить задачу систематизации всех живых существ – сегодня ее называли бы задачей таксономии (систематики); Геометрия Евклида, Теория колебаний, Экономическая теория и множество других наук и научных направлений.

- **методологические** основания – установление **процессов, методов, правил** системного становления (формирования) и познания. Примеры: система Станиславского, технология обработки материалов, рецепты, алгоритмы работы программ, системы подготовки специалистов и др.

Раздел 2. Системные свойства. Классификация систем (Лекции 3,4).

Основные свойства системы: эмерджентность, целостность, организованность, функциональность, структурность, надёжность, адаптируемость. Классификация систем, критерии, области.

Итак, состоянием системы называется совокупность существенных свойств, которыми система обладает в каждый момент времени.

Под свойством понимают сторону объекта, обуславливающую его отличие от других объектов или сходство с ними и проявляющуюся при взаимодействии с другими объектами.

Характеристика – то, что отражает некоторое свойство системы.

Какие свойства систем известны.

Из определения «системы» следует, что главным свойством системы является целостность, единство, достигаемое посредством определенных взаимосвязей и взаимодействий элементов системы и проявляющиеся в возникновении новых свойств, которыми элементы системы не обладают. Это свойство **эмерджентности** (от англ. *emerge* – возникать, появляться).

1. **Эмерджентность** – степень несводимости свойств системы к свойствам элементов, из которых она состоит.

2. **Эмерджентность** – свойство систем, обуславливающее появление новых свойств и качеств, не присущих элементам, входящих в состав системы.

Эмерджентность – принцип противоположный редукционизму, который утверждает, что целое можно изучать, расчленив его на части и затем, определяя их свойства, определить свойства целого.

Свойству эмерджентности близко свойство целостности системы. Однако их нельзя отождествлять.

Целостность системы означает, что каждый элемент системы вносит вклад в реализацию целевой функции системы.

Целостность и эмерджентность – интегративные свойства системы.

Наличие интегративных свойств является одной из важнейших черт системы. Целостность проявляется в том, что система обладает собственной закономерностью функциональности, собственной целью.

Организованность – сложное свойство систем, заключающиеся в наличие структуры и функционирования (поведения). Непременной принадлежностью систем является их компоненты, именно те структурные образования, из которых состоит целое и без чего оно не возможно.

Функциональность – это проявление определенных свойств (функций) при взаимодействии с внешней средой. Здесь же определяется цель (назначение системы) как желаемый конечный результат.

Структурность – это упорядоченность системы, определенный набор и расположение элементов со связями между ними. Между функцией и структурой системы существует взаимосвязь, как между философскими категориями содержанием и формой. Изменение содержания (функций) влечет за собой изменение формы (структуры), но и наоборот.

Важным свойством системы является наличие поведения – действия, изменений, функционирования и т.д.

Считается, что это поведение системы связано со средой (окружающей), т.е. с другими системами с которыми она входит в контакт или вступает в определенные взаимоотношения.

Процесс целенаправленного изменения во времени состояния системы называется **поведением**. В отличие от управления, когда изменение состояния системы достигается за счет внешних воздействий, поведение реализуется исключительно самой системой, исходя из собственных целей.

Поведение каждой системы объясняется структурой систем низшего порядка, из которых состоит данная система, и наличием признаков

равновесия (гомеостаза). В соответствии с признаком равновесия система имеет определенное состояние (состояния), которое является для нее предпочтительным. Поэтому поведение систем описывается в терминах восстановления этих состояний, когда они нарушаются в результате изменения окружающей среды.

Еще одним свойством является свойство роста (развития). Развитие можно рассматривать как составляющую часть поведения (при этом важнейшим).

Одним из первичных, а, следовательно, основополагающих атрибутов системного подхода является недопустимость рассмотрения объекта вне его *развития*, под которым понимается необратимое, направленное, закономерное изменение материи и сознания. В результате возникает новое качество или состояние объекта. Отождествление (может быть и не совсем строгое) терминов «развитие» и «движение» позволяет выразиться в таком смысле, что вне развития немыслимо существование материи, в данном случае – системы. Наивно представлять себе развитие, происходящее стихийно. В неоглядном множестве процессов, кажущихся на первый взгляд чем-то вроде броуновского (случайного, хаотичного) движения, при пристальном внимании и изучении вначале как бы проявляются контуры тенденций, а затем и довольно устойчивые закономерности. Эти закономерности по природе своей действуют объективно, т.е. не зависят от того, желаем ли мы их проявления или нет. Незнание законов и закономерностей развития – это блуждание в потемках.

Кто не знает, в какую гавань он плывет, для того нет попутного ветра
Сенека

Поведение системы определяется характером реакции на внешние воздействия.

Фундаментальным свойством систем является *устойчивость*, т.е. способность системы противостоять внешним возмущающим воздействиям. От нее зависит продолжительность жизни системы.

Простые системы имеют пассивные формы устойчивости: прочность, сбалансированность, регулируемость, гомеостаз. А для сложных определяющими являются активные формы: надежность, живучесть и адаптируемость.

Если перечисленные формы устойчивости простых систем (кроме прочности) касаются их поведения, то определяющая форма устойчивости сложных систем носят в основном структурный характер.

Надежность – свойство сохранения структуры систем, несмотря на гибель отдельных её элементов с помощью их замены или дублирования, а

живучесть – как активное подавление вредных качеств. Таким образом, надежность является более пассивной формой, чем живучесть.

Адаптируемость – свойство изменять поведение или структуру с целью сохранения, улучшения или приобретения новых качеств в условиях изменения внешней среды. Обязательным условием возможности адаптации является наличие обратных связей.

Всякая реальная система существует в среде. Связь между ними бывает настолько тесной, что определять границу между ними становится сложно. Поэтому выделение системы из среды связано с той или иной степенью идеализации.

Можно выделить два аспекта взаимодействия:

- во многих случаях принимает характер обмена между системой и средой (веществом, энергией, информацией);
- среда обычно является источником неопределенности для систем.

Воздействие среды может быть пассивным либо активным (антагонистическим, целенаправленно противодействующее системе).

Поэтому в общем случае среду следует рассматривать не только безразличную, но и антагонистическую по отношению к исследуемой системе.

Классификация систем

Классификацию систем можно представить на рисунке.



Рис. – Классификация систем

Таблица – классы систем по различным основаниям классификации

Основание (критерий) классификации	Классы систем
По взаимодействию с внешней средой	Открытые
	Закрытые

	Комбинированные
По структуре	Простые
	Сложные
	Большие
По характеру функций	Специализированные
	Многофункциональные (универсальные)
По характеру развития	Стабильные
	Развивающиеся
По степени организованности	Хорошо организованные
	Плохо организованные (диффузные)
По сложности поведения	Автоматические
	Решающие
	Самоорганизующиеся
	Предвидящие
	Превращающиеся
По характеру связи между элементами	Детерминированные
	Стохастические
По характеру структуры управления	Централизованные
	Децентрализованные
По назначению	Производящие
	Управляющие
	Обслуживающие

Классификацией называется разбиение на классы по наиболее существенным признакам. Под классом понимается совокупность объектов, обладающие некоторыми признаками общности. Признак (или совокупность признаков) является основанием (критерием) классификации.

Система может быть охарактеризована одним или несколькими признаками и соответственно ей может быть найдено место в различных классификациях, каждая из которых может быть полезной при выборе методологии исследования. Обычно цель классификации ограничить выбор подходов к отображению систем, выработать язык описания, подходящий для соответствующего класса.

По содержанию различают реальные (материальные), объективно существующие, и абстрактные (концептуальные, идеальные), являющиеся продуктом мышления.

Реальные системы делятся на естественные (природные системы) и искусственные (антропогенные).

Естественные системы: системы неживой (физические, химические) и живой (биологические) природы.

Искусственные системы: создаются человечеством для своих нужд или образуются в результате целенаправленных усилий.

Искусственные делятся на технические (техничко-экономические) и социальные (общественные).

Техническая система спроектирована и изготовлена человеком в определенных целях.

К социальным системам относятся различные системы человеческого общества.

Выделение систем, состоящих из одних только технических устройств почти всегда условно, поскольку они не способны вырабатывать свое состояние. Эти системы выступают как части более крупных, включающие людей – организационно-технических систем.

Организационная система, для эффективного функционирования которой существенным фактором является способ организации взаимодействия людей с технической подсистемой, называется человеко-машинной системой.

Примеры человеко-машинных систем: автомобиль – водитель; самолет – летчик; ЭВМ – пользователь и т.д.

Таким образом, под техническими системами понимают единую конструктивную совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих объектов, предназначенная для целенаправленных действий с задачей достижения в процессе функционирования заданного результата.

Отличительными признаками технических систем по сравнению с произвольной совокупностью объектов или по сравнению с отдельными элементами является конструктивность (практическая осуществимость отношений между элементами), ориентированность и взаимосвязанность составных элементов и целенаправленность.

Для того чтобы система была устойчивой к воздействию внешних влияний, она должна иметь устойчивую структуру. Выбор структуры практически определяет технический облик как всей системы, так ее подсистем, и элементов. Вопрос о целесообразности применения той или иной структуры должен решаться исходя из конкретного назначения системы. От структуры зависит также способность системы к перераспределению функций в случае полного или частичного отхода отдельных элементов, а, следовательно, надежность и живучесть системы при заданных характеристиках ее элементов.

Абстрактные системы являются результатом отражения действительности (реальных систем) в мозге человека.

Их настроение – необходимая ступень обеспечения эффективного взаимодействия человека с окружающим миром. Абстрактные (идеальные) системы объективны по источнику происхождения, поскольку их первоисточником является объективно существующая действительность.

Абстрактные системы разделяют на системы непосредственного отображения (отражающие определенные аспекты реальных систем) и системы генерализирующего (обобщающего) отображения. К первым относятся математические и эвристические модели, а ко вторым – концептуальные системы (теории методологического построения) и языки.

На основе понятия внешней среды системы разделяются на: открытые, закрытые (замкнутые, изолированные) и комбинированные. Деление систем на открытые и закрытые связано с их характерными признаками: возможность сохранения свойств при наличии внешних воздействий. Если система нечувствительна к внешним воздействиям ее можно считать закрытой. В противном случае – открытой.

Открытой называется система, которая взаимодействует с окружающей средой. Все реальные системы являются открытыми. Открытая система является частью более общей системы или нескольких систем. Если вычленишь из этого образования собственно рассматриваемую систему, то оставшаяся часть – ее среда.

Открытая система связана со средой определенными коммуникациями, то есть сетью внешних связей системы. Выделение внешних связей и описание механизмов взаимодействия «система-среда» является центральной задачей теории открытых систем. Рассмотрение открытых систем позволяет расширить понятие структуры системы. Для открытых систем оно включает не только внутренние связи между элементами, но и внешние связи со средой. При описании структуры внешние коммуникационные каналы стараются разделить на входные (по которым среда воздействует на систему) и выходные (наоборот). Совокупность элементов этих каналов, принадлежащих собственной системе называются входными и выходными полюсами системы. У открытых систем, по крайней мере, один элемент имеет связь с внешней средой, по меньшей мере, один входной полюс и один выходной, которыми она связана с внешней средой.

Для каждой системы связи со всеми подчиненными ей подсистемами и между последним, являются внутренними, а все остальные – внешними. Связи

между системами и внешней средой также, как и между элементами системы, носят, как правило, направленный характер.

Важно подчеркнуть, что в любой реальной системе в силу законов диалектики о всеобщей связи явлений число всех взаимосвязей огромно, так что учесть и исследования абсолютно все связи невозможно, поэтому их число искусственно ограничивают. Вместе с тем, учитывать все возможные связи нецелесообразно, так как среди них есть много несущественных, практически не влияющих на функционирование системы и количество полученных решений (с точки зрения решаемых задач). Если изменение характеристик связи, ее исключение (полный разрыв) приводят к значительному ухудшению работы системы, снижению эффективности, то такая связь – существенна. Одна из важнейших задач исследователя – выделить существенные для рассмотрения системы в условиях решаемой задачи связи и отделить их от несущественных. В связи с тем, что входные и выходные полюса системы не всегда удается четко выделить, приходится прибегать к определенной идеализации действий. Наибольшая идеализация имеет место при рассмотрении закрытой системы.

Закрытой называется система, которая не взаимодействует со средой или взаимодействует со средой строго определенным образом. В первом случае предполагается, что система не имеет входных полюсов, а во втором, что входные полюса есть, но воздействие среды носит неизменный характер и полностью (заранее) известно. Очевидно, что при последнем предположении указанные воздействия могут быть отнесены собственно к системе, и ее можно рассматривать, как закрытую. Для закрытой системы, любой ее элемент имеет связи только с элементами самой системы.

Разумеется, закрытые системы представляют собой некоторую абстракцию реальной ситуации, так как, строго говоря, изолированных систем не существует. Однако, очевидно, что упрощение описания системы, заключающееся в отказе от внешних связей, может привести к полезным результатам, упростить исследование системы. Все реальные системы тесно или слабо связаны с внешней средой – открытые. Если временный разрыв или изменение характерных внешних связей не вызывает отклонения в функционировании системы сверх установленных заранее пределов, то система связана с внешней средой слабо. В противном случае – тесно.

Комбинированные системы содержат открытые и закрытые подсистемы. Наличие комбинированных систем свидетельствует о сложной комбинации открытой и закрытой подсистем.

В зависимости от структуры и пространственно-временных свойств системы делятся на простые, сложные и большие.

Простые – системы, не имеющие разветвленных структур, состоящие из небольшого количества взаимосвязей и небольшого количества элементов. Такие элементы служат для выполнения простейших функций, в них нельзя выделить иерархические уровни. Отличительной особенностью простых систем является детерминированность (четкая определенность) номенклатуры, числа элементов и связей как внутри системы, так и со средой.

Сложные – характеризуются большим числом элементов и внутренних связей, их неоднородностью и разнокачественностью, структурным разнообразием, выполняют сложную функцию или ряд функций. Компоненты сложных систем могут рассматриваться как подсистемы, каждая из которых может быть детализирована еще более простыми подсистемами и т.д. до тех пор, пока не будет получен элемент.

Определение N1: система называется сложной (с гносеологических позиций), если ее познание требует совместного привлечения многих моделей теорий, а в некоторых случаях многих научных дисциплин, а также учета неопределенности вероятностного и невероятностного характера. Наиболее характерным проявлением этого определения является многомодельность.

Модель – некоторая система, исследование которой служит средством для получения информации о другой системе. Это описание систем (математическое, вербальное и т.д.) отображающее определенную группу ее свойств.

Определение N2: систему называют сложной если в реальной действительности рельефно (существенно) проявляются признаки ее сложности. А именно:

структурная сложность – определяется по числу элементов системы, числу и разнообразию типов связей между ними, количеству иерархических уровней и общему числу подсистем системы. Основными типами считаются следующие виды связей: структурные (в том числе, иерархические), функциональные, каузальные (причинно-следственные), информационные, пространственно-временные;

сложность функционирования (поведения) – определяется характеристиками множества состояний, правилами перехода из состояния в состояние, воздействие системы на среду и среды на систему, степенью неопределенности перечисленных характеристик и правил;

сложность выбора поведения – в многоальтернативных ситуациях, когда выбор поведения определяется целью системы, гибкостью реакций на заранее неизвестные воздействия среды;

сложность развития – определяемая характеристиками эволюционных или скачкообразных процессов.

Естественно, что все признаки рассматриваются во взаимосвязи. Иерархическое построение – характерный признак сложных систем, при этом уровни иерархии могут быть как однородные, так и неоднородные. Для сложных систем присущи такие факторы, как невозможность предсказать их поведение, то есть слабо предсказуемость, их скрытность, разнообразные состояния.

Сложные системы можно подразделить на следующие факторные подсистемы:

решающую, которая принимает глобальные решения во взаимодействии с внешней средой и распределяет локальные задания между всеми другим подсистемами;

информационную, которая обеспечивает сбор, переработку и передачу информации, необходимой для принятия глобальных решений и выполнения локальных задач;

управляющую для реализации глобальных решений;

гомеостазную, поддерживающую динамическое равновесие внутри систем и регулирующую потоки энергии и вещества в подсистемах;

адаптивную, накапливающую опыт в процессе обучения для улучшения структуры и функций системы.

Большой системой называют систему, ненаблюдаемую одновременно с позиции одного наблюдателя во времени или в пространстве, для которой существенен пространственный фактор, число подсистем которой очень велико, а состав разнороден.

Система может быть и большой и сложной. Сложные системы объединяет более обширную группу систем, то есть большие – подкласс сложных систем.

Основополагающими при анализе и синтезе больших и сложных систем являются процедуры декомпозиции и агрегирования.

Декомпозиция – разделение систем на части, с последующим самостоятельным рассмотрением отдельных частей.

Очевидно, что декомпозиция представляют собой понятие, связанное с моделью, так как сама система не может быть расчленена без нарушений свойств. На уровне моделирования, разрозненные связи заменяются соответственно эквивалентами, либо модели систем строятся так, что разложение ее на отдельные части при этом оказывается естественным.

Применительно к большим и сложным системам декомпозиция является мощным инструментом исследования.

Агрегирование является понятием, противоположным декомпозиции. В процессе исследования возникает необходимость объединения элементов системы с целью рассмотреть ее с более общих позиций.

Декомпозиция и агрегирование представляют собой две противоположные стороны подхода к рассмотрению больших и сложных систем, применяемые в диалектическом единстве.

Системы, для которых состояние системы однозначно определяется начальными значениями и может быть предсказано для любого последующего момента времени, называются детерминированными.

Стохастические системы – системы, изменения в которых носят случайный характер. При случайных воздействиях данных о состоянии системы недостаточно для предсказания в последующий момент времени.

По степени организованности: хорошо организованные, плохо организованные (диффузные).

Представить анализируемый объект или процесс в виде хорошо организованной системы означает определить элементы системы, их взаимосвязь, правила объединения в более крупные компоненты. Проблемная ситуация может быть описана в виде математического выражения. Решение задачи при представлении ее в виде хорошо организованной системы осуществляется аналитическими методами формализованного представления системы.

Примеры хорошо организованных систем: солнечная система, описывающая наиболее существенные закономерности движения планет вокруг Солнца; изображение атома в виде планетарной системы, состоящей из ядра и электронов; описание работы сложного электронного устройства с помощью системы уравнений, учитывающей особенности условий его работы (наличие шумов, нестабильности источников питания и т. п.).

Описание объекта в виде хорошо организованной системы применяется в тех случаях, когда можно предложить детерминированное описание и экспериментально доказать правомерность его применения, адекватность модели реальному процессу. Попытки применить класс хорошо организованных систем для представления сложных многокомпонентных объектов или многокритериальных задач плохо удаются: они требуют недопустимо больших затрат времени, практически нереализуемы и неадекватны применяемым моделям.

Плохо организованные системы. При представлении объекта в виде плохо организованной или диффузной системы не ставится задача определить все учитываемые компоненты, их свойства и связи между ними и целями системы. Система характеризуется некоторым набором макропараметров и

закономерностями, которые находятся на основе исследования не всего объекта или класса явлений, а на основе определенной с помощью некоторых правил выборки компонентов, характеризующих исследуемый объект или процесс. На основе такого выборочного исследования получают характеристики или закономерности (статистические, экономические) и распространяют их на всю систему в целом. При этом делаются соответствующие оговорки. Например, при получении статистических закономерностей их распространяют на поведение всей системы с некоторой доверительной вероятностью.

Подход к отображению объектов в виде диффузных систем широко применяется при: описании систем массового обслуживания, определении численности штатов на предприятиях и учреждениях, исследовании документальных потоков информации в системах управления и т. д.

С точки зрения характера функций различаются специальные, многофункциональные, и универсальные системы.

Для специальных систем характерна единственность назначения и узкая профессиональная специализация обслуживающего персонала (сравнительно несложная).

Многофункциональные системы позволяют реализовать на одной и той же структуре несколько функций. Пример: производственная система, обеспечивающая выпуск различной продукции в пределах определенной номенклатуры.

Для универсальных систем: реализуется множество действий на одной и той же структуре, однако состав функций по виду и количеству менее однороден (менее определен). Например, комбайн.

По характеру развития 2 класса систем: стабильные и развивающиеся.

У стабильной системы структура и функции практически не изменяются в течение всего периода ее существования и, как правило, качество функционирования стабильных систем по мере изнашивания их элементов только ухудшается. Восстановительные мероприятия обычно могут лишь снизить темп ухудшения.

Отличной особенностью развивающихся систем является то, что с течением времени их структура и функции приобретают существенные изменения. Функции системы более постоянны, хотя часто и они видоизменяются. Практически неизменными остается лишь их назначение. Развивающиеся системы имеют более высокую сложность.

В порядке усложнения поведения: автоматические, решающие, самоорганизующиеся, предвидящие, превращающиеся.

Автоматические: однозначно реагируют на ограниченный набор внешних воздействий, внутренняя их организация приспособлена к переходу в равновесное состояние при выводе из него (гомеостаз).

Решающие: имеют постоянные критерии различения их постоянной реакции на широкие классы внешних воздействий. Постоянство внутренней структуры поддерживается заменой вышедших из строя элементов.

Самоорганизующиеся: имеют гибкие критерии различения и гибкие реакции на внешние воздействия, приспособляющиеся к различным типам воздействия. Устойчивость внутренней структуры высших форм таких систем обеспечивается постоянным самовоспроизводством.

Самоорганизующиеся системы обладают признаками диффузных систем: стохастичностью поведения, нестационарностью отдельных параметров и процессов. К этому добавляются такие признаки, как непредсказуемость поведения; способность адаптироваться к изменяющимся условиям среды, изменять структуру при взаимодействии системы со средой, сохраняя при этом свойства целостности; способность формировать возможные варианты поведения и выбирать из них наилучший и др. Иногда этот класс разбивают на подклассы, выделяя адаптивные или самоприспосабливающиеся системы, самовосстанавливающиеся, самовоспроизводящиеся и другие подклассы, соответствующие различным свойствам развивающихся систем.

Примеры: биологические организации, коллективное поведение людей, организация управления на уровне предприятия, отрасли, государства в целом, т.е. в тех системах, где обязательно имеется человеческий фактор.

Если устойчивость по своей сложности начинает превосходить сложные воздействия внешнего мира – это предвидящие системы: она может предвидеть дальнейший ход взаимодействия.

Превращающиеся – это воображаемые сложные системы на высшем уровне сложности, не связанные постоянством существующих носителей. Они могут менять вещественные носители, сохраняя свою индивидуальность. Научные примеры таких систем пока не известны.

Систему можно разделить на виды по признакам структуры их построения и значимости той роли, которую играют в них отдельные составные части в сравнении с ролями других частей.

В некоторых системах одной из частей может принадлежать доминирующая роль (ее значимость \gg (символ отношения «значительного превосходства») значимость других частей). Такой компонент – будет выступать как центральный, определяющий функционирование всей системы. Такие системы называют централизованными.

В других системах все составляющие их компоненты примерно одинаково значимы. Структурно они расположены не вокруг некоторого централизованного компонента, а взаимосвязаны последовательно или параллельно и имеют примерно одинаковые значения для функционирования системы. Это децентрализованные системы.

Системы можно классифицировать по назначению. Среди технических и организационных систем выделяют: производящие, управляющие, обслуживающие.

В производящих системах реализуются процессы получения некоторых продуктов или услуг. Они в свою очередь делятся на вещественно-энергетические, в которых осуществляется преобразование природной среды или сырья в конечный продукт вещественной или энергетической природы, либо транспортирование такого рода продуктов; и информационные – для сбора, передачи и преобразования информации и предоставление информационных услуг.

Назначение управляющих систем – организация и управление вещественно-энергетическими и информационными процессами.

Обслуживающие системы занимаются поддержкой заданных пределов работоспособности производящих и управляющих систем.

Раздел 3 Методология системного анализа (лекции 5-6).

Принцип системности. Системный подход – основа методологии системного анализа: принцип единства, принцип связности, принцип развития, принцип конечной (глобальной) цели, принцип функциональности, принцип децентрализации, принцип модульного построения, принцип иерархии, принцип свёртки информации, принцип неопределённости, принцип полномочности, принцип организованности. Основные закономерности организации материального мира. Системный анализ в исследовании технических систем и процессов.

Принцип системности.

Принцип системности можно воспринимать в качестве философского принципа, выполняющего как мировоззренческие, так и методологические функции.

Принцип системности предполагает представление об объекте любой природы как о совокупности элементов, находящихся в определенном

взаимодействии между собой и с окружающим миром, а также понимание системной природы знаний. Системные представления о природе, ее объектах и знаниях о них имели место еще в античной философии (Платон, Аристотель).

История науки характеризуется непрерывно возрастающей специализацией. Относительно простая система представлений о мире, которая позволяла ученому-энциклопедисту еще 200-300 лет назад быть в курсе всех направлений развития науки, исчезла навсегда. В XIX–XX столетиях шел интенсивный процесс обособления наук – исследование конкретных проблем какой-либо отрасли знаний становилось самостоятельной наукой. Как правило, подобное обособление диктуется необходимостью более углубленного изучения отдельных областей мироздания. Иногда это является следствием амбиций отдельной группы ученых. В любом случае наряду с положительными результатами обособление научных направлений приводит к потере общности критериев и взглядов.

Одновременно с появлением новых наук идет и обратный процесс – процесс синтеза знаний. Новые научные достижения возникают в результате ломки междисциплинарных границ. Идет целенаправленное агрегирование знаний и представлений, выявление концептуальной общности целого ряда, казалось бы, различных явлений.

В разные периоды истории роль двух противоречивых и взаимосвязанных процессов детализации знаний и их синтеза была различной. В настоящее время важной основой совместной работы ученых различных специальностей при изучении сложнейших явлений мира, процессов развития цивилизации является создание мощных имитационных систем и разработка теории неформальных процедур. Синтезирующая роль математики в общем процессе развития знаний бесспорна. Будущее место математики не столько в совершенствовании ее традиционных разделов, сколько в дальнейшем развитии новых направлений, способных заложить основы междисциплинарных исследований на базе дискретного описания изучаемых процессов и алгоритмов, допускающих вмешательство человека.

Принцип системности – это проявление имеющего исторические традиции системообразующего начала, стремления представить знания в виде некоторой непротиворечивой системы.

Непосредственно из принципа системности вытекает системный подход, являющийся общей методологией системных исследований, которая может быть, в свою очередь, представлена в виде набора методологических подходов (принципов) к исследованию системы.

Системный подход – основа методологии системного анализа.

Методология системного анализа включает определение используемых понятий, общую характеристику проблемы системных исследований и системный подход – наиболее общую часть методологии прикладных исследований, её основу.

В самом общем виде системный подход – это рассмотрение системы любой степени сложности как

- состоящей из отдельных связанных между собой определенными отношениями частей;
- находящейся во взаимодействии с окружающей средой;
- находящейся в непрерывном развитии.

Приведенные выше общие положения системного подхода представляются (конкретизируются) в виде перечня принципов (подходов), применяемых при исследовании систем. Перечислим эти принципы.

Непосредственно из основных положений вытекают *три основных* принципа:

1. **Принцип единства:** совместное рассмотрение системы как единого целого и как совокупности частей (элементов).

2. **Принцип связности:** рассмотрение любой части системы совместно с её связями с другими частями и с окружающей средой.

3. **Принцип развития:** учёт изменяемости системы, её способности к развитию, замене частей, накапливанию информации, при этом учитывается и динамика внешней среды, изменение взаимодействия системы с внешней средой.

Следующие принципы системного подхода определяют рациональный, целенаправленный подход к рассмотрению структуры и функционирования системы.

4. **Принцип конечной (глобальной) цели:** особая ответственность за выбор глобальной цели. Вся деятельность системы должна быть в конечном счете подчинена достижению её глобальной цели, которая, в свою очередь, должна быть подчинена глобальной цели всего общества.

Цель организации определяется как состояние организации, которое необходимо, желательно достичь к определенному моменту, затратив на это определенные, ограниченные сверху ресурсы. Без ясного понимания цели любое решение может оказаться просто бессмысленным.

Норма и цели. Цель не будет понята и успешно достигнута, если она не соответствует институтам общества, т.е. формальным и неформальным нормам, существующим в обществе

Неопределенность выбора. Неопределенность выбора цели связана с наличием в сложных системах множества целей и множества критериев, а также, возможно, в первую очередь с неопределенностью динамики внешней среды. Неопределенность в предсказании состояния внешней среды следует обязательно учитывать при формировании совокупности целей и разработке способов их достижения. На неопределенность выбора также влияет следование индивидов принципу «достаточной рациональности» Саймона.

Цель и ресурсы. Выбор целей зависит от материальных, финансовых и кадровых ресурсов организации. Сравнение ресурсов, необходимых для выполнения целей, с имеющимися ресурсами приводит к выделению множества *достижимых*, обеспеченных ресурсами целей, из которого затем и выбираются окончательно цели.

Цели и критерии. Выбор каждой цели непосредственно определяет содержательную сущность критерия её достижения.

Цель и средство достижения цели. Выбор целей производится одновременно с выбором средств достижения целей.

Превращение средств в цели – болезнь века.

Цели организации порой искусно подменяются целями отдельных лиц или группировок. Самый простой способ обеспечения такой подмены – как раз замена цели средством.

Цели и ценности. На формирование целей влияют субъективные представления о ценностях целей. Каждый индивид имеет свою систему ценностей, которая может не совпадать с системой ценности организации или общества. Представление организации о ценности конкретной цели – это оценка с позиции вклада достижения конкретной цели в обеспечение желаемого состояния организации. Система ценностей общества выражается через общественное мнение и отражает выработанное обществом на определенном историческом этапе представление о глобальных целях развития человека. Система ценностей формируется опытом человека и историческим опытом общества.

Системы ценностей базируются на этике и морали человеческого общества на каждом историческом этапе его развития.

Известными этическими системами являются:

Стоицизм, согласно которому в практической деятельности следует при достижении желаемого исходить из возможностей и реальных ограничений внешней среды.

В *казуистической теории* основанием для выбора решений является ссылка на авторитет, выбор целей в прошлом в аналогичных задачах.

В основе *утилитаризма* – оценка всех явлений с точки зрения их возможности служить средством для достижения какой-либо цели. Наибольший интерес уделяется проблеме измерения индивидуальных предпочтений и их объединению в единую меру.

Анализ целей. При выборе совокупности целей необходимо предусмотреть ряд оценок, в том числе:

- проверку целей на реализуемость, выявление препятствий на пути достижения целей: экономических, технических, социальных, юридических и др.;
- оценку связей целей нижнего уровня иерархии с целями более высокого уровня;
- оценку непротиворечивости (в общем случае характера и степени противоречивости) целей на каждом уровне;
- оценку семантической точности формулировок целей, понятных всем индивидам, имеющим отношение к цели; использование принятых определений и обозначений.

5. Принцип функциональности: совместное рассмотрение структуры системы и функций с приоритетом функций над структурой – изменение функций влечет изменение структуры.

Цели определяют задачи, решение которых необходимо для достижения цели. Задачи определяют функции, обеспечивающие решение задач. В оргсистемах оргструктура создается после определения набора функций. Оргструктура реализуется в виде совокупности персонала, методов, алгоритмов, технических устройств различного назначения. При появлении новых задач и соответственно функций может оказаться необходимой корректировка структуры. После создания системы возможно, при наличии квалифицированного персонала, уточнение структуры системы и отдельных функций в рамках существующих целей и задач, т.е. возможно обратное влияние структуры на функции.

Зачастую организация, её структура создаются до выяснения целей и задач системы. В результате имеют место параллелизм в работе органов управления, систематические попытки улучшить работу организации путем изменения её структуры.

6. Принцип децентрализации: сочетание децентрализации и централизации.

Сложные системы с полной централизацией медленнее приспосабливаются к изменениям окружающей среды. Информационные каналы в таких системах оказываются перегруженными, что приводит к запаздыванию в обработке информации, появлению ошибок и в конечном

счете к снижению качества управления. Высокая степень централизации также приводит к подавлению инициативы и появлению безответственности на нижних уровнях управленческой иерархии – снижению «внутренней активности» системы. Однако при высокой степени децентрализации затрудняется согласование решений, их направленности на достижение глобальной цели. Для обеспечения целенаправленной деятельности сильно децентрализованной системы необходимо наличие в системе специальных механизмов регуляции, не позволяющих отдельным элементам системы уклоняться в своем поведении от основной цели системы. Все это в значительной мере зависит от вида и задач системы и особенно от условий её функционирования.

Оптимальное сочетание централизации и децентрализации обусловлено выполнением следующих положений:

- на нижние уровни иерархии следует передавать все задачи, решение которых на этих уровнях возможно, освободив высшие уровни иерархии для решения стратегических задач;
- должна быть разработана и принята система делегирования полномочий для всех уровней иерархии управления;
- должны существовать механизмы контроля, исключающие принятие на нижних уровнях иерархии решений, противоречащих достижению системой глобальных целей.

Реализация оптимального уровня децентрализации зачастую затруднена из-за отсутствия квалифицированного персонала. Возможно, это утверждение находится вне формальной (научной) постановки вопроса. Однако в реальных ситуациях неквалифицированность персонала явление нередкое, и не учитывать это в прикладных исследованиях недопустимо.

Не является децентрализацией управления, когда принятое на верхнем уровне решение затем конкретизируется (распараллеливается) на нижних уровнях.

7. Принцип модульного построения: выделение модулей и рассмотрение системы как совокупности модулей.

Модулем называется группа элементов системы, описываемая только своим входом и выходом. Разбиение системы на взаимодействующие модули (подсистемы) зависит от цели исследования и может иметь различную основу, в том числе материальную (вещественную), функциональную, алгоритмическую, информационную и др. Примером систем, у которых при разбиении на подсистемы вещественная, функциональная и информационные основы слиты, являются системы управления оргсистемами. Разбитие системы на модули способствует более эффективной организации анализа и

синтеза систем, так как оказывается возможным, абстрагируясь от второстепенных деталей, уяснить суть основных соотношений, существующих в системе и определяющих исходы системы.

Вместо термина модуль зачастую используются термины «блок», «подсистема» и др.

8. **Принцип иерархии:** полезно введение иерархии частей и (или) их ранжирование. Иерархия свойственна всем сложным системам. Иерархия в структурах оргсистем (в оргструктурах) неоднозначно связана с характером управления в системе, степенью децентрализации управления. В линейных (древовидных иерархических) оргструктурах реализуется идея полной централизации управления. В то же время в сложных иерархически построенных системах может быть реализована любая степень децентрализации.

9. **Принцип свертки информации:** информация свертывается, укрупняется при движении по ступеням иерархии снизу вверх.

Информационные средства управленческих структур на каждом уровне иерархии должны обеспечить решение всего комплекса управленческих задач: анализ ситуации, планирование и принятие решения, контроль за исполнением решений, выявление и предупреждение конфликтных ситуаций. Качество информации определяется тем, насколько она способствует наилучшему, в каком-либо смысле, решению задач управления. Для того чтобы на верхнем уровне иерархии успешно решались стратегические задачи, необходима информация, достаточно полно описывающая те параметры ситуации, которые определяют стратегические решения, и «не замусоренная» второстепенными подробностями, на решение существенно не влияющими.

В рамках каждой сложной системы, в том числе в масштабе страны, формируется информационная среда, которая включает функционирующие во взаимодействии технические средства, технологии, квалифицированный персонал, систему документирования, культуру управления. В России в 90-х годах существенным недостатком, снижающим качество управления на всех уровнях, являлось медленное и беспорядочное формирование единого информационного пространства, и прежде всего информационной сети органов власти.

Управленческая информация характеризуется объемом, достоверностью, ценностью, степенью открытости.

По объему информация может быть достаточной или недостаточной для принятия решения с необходимой степенью обоснованности. Информация также может быть избыточной, содержащей сведения, ненужные для выработки решения, а порой даже мешающие принятию решения.

Достоверность можно определить процентом содержащихся в информации достоверных данных – в общем случае это будет вероятностная характеристика.

Понятие ценности всегда следует связывать с наличием новых необходимых для принятия решения данных.

По степени открытости информация делится на секретную, конфиденциальную (для служебного пользования) и публичную (полностью открытую).

В качестве показателя качества информации применяется $k_{ин} = \delta P / \delta H$, где δP – повышение качества (эффективности) управления при получении некоторого объёма информации; δH – затраты на приобретение этого объёма информации.

Следует заметить, что из этого показателя непосредственно не следуют известные показатели оценки качества некоторых, например информационных, систем.

10. Принцип неопределённости. Принцип неопределённости является одним из основных принципов системного подхода. Достаточно типичны случаи, когда задачу необходимо решать при неполноте или нечёткости знаний относительно исследуемой системы, что имеет место вследствие как ограниченных возможностей науки на данном уровне её развития, так и принципиальной ограниченности человеческого познания, а зачастую просто оказывается невозможным получить сколь-нибудь достоверную информацию о будущем, предвидеть все возможные варианты изменения окружающей обстановки. В лучшем случае могут быть получены вероятностные оценки прогнозируемых ситуаций, если эти оценки объективно существуют.

Учёт неопределённостей и случайностей возможен с помощью метода гарантийного результата, с помощью статистических оценок (если условия для этого существуют), а также путем уточнения структур, ввода дублирования, расширения совокупности целей и проч.

Во всех случаях неполноты знаний о предмете исследования, нечёткой или стохастической входной информации будут носить нечёткий или вероятностный характер и результаты исследований, а принятые на основании этих исследований решения приведут к неоднозначным последствиям. В случае нечёткой (по своей природе) или неполной (при ограниченных возможностях исследователя) информации как раз очень важно учитывать законы кибернетики об устойчивых состояниях и устойчивых траекториях системы. Необходимо стремиться выявить и оценить все возможные, в том числе кажущиеся маловероятными последствия принимаемых решений, хотя бы на интуитивном уровне, а также предусмотреть обратные связи, которые

обеспечат своевременное вскрытие и локализацию нежелательного развития событий. В технических науках эти положения очевидны. При исследовании социально-экономических процессов соответствующие положения зачастую игнорируются, что порой приводит к невосполнимым потерям.

Как следствие необходимости принятия решений в условиях неопределенности является использование в системном анализе так называемых рациональных рассуждений. Рассуждения, не строгие и не приемлемые с точки зрения чистой математики, но обеспечивающие при разумном их применении правильные результаты, называются рациональными. При вводе аксиоматики соответствующих шкал достигается необходимая строгость подобных рассуждений. Типичные примеры рациональных рассуждений: «Сегодня погода хорошая», «Автомобиль едет с высокой скоростью». Используются и другие термины, близкие к термину «рациональные»: правдоподобные, эвристические, дискурсивные.

Применение рациональных понятий непосредственно связано с интуицией, здравым смыслом. Качество интуиции зависит от степени изучения данной области знания и личных качеств исследователя. Для оценки рационального рассуждения вводится понятие степени достоверности рассуждения, которое может меняться от 0 до 1. Это некоторая субъективная, размытая в своей основе аналогия вероятностной оценке. Достоверность рационального рассуждения может быть повышена, если прибегнуть к коллективному мнению. Сложное рациональное рассуждение обычно включает физические соображения, ссылки на опыт, интуицию, целесообразность упрощения, а также дедуктивные рассуждения. Важной особенностью рациональных рассуждений является возможность включения в них «размытых нечетких понятий». Различные рассуждения совершенно не равноценны, как по трудности их проведения, так и по вкладу в успех решения задачи. Существует ряд способов повышения правдоподобности рассуждений, некоторые из них: независимый повторный вывод, использование различных моделей, независимые вычисления, сравнение теоретических результатов с физическим экспериментом.

Можно привести сколь угодно случаев, когда только при применении здравого смысла и интуиции, т.е. рациональных рассуждений, удаётся получить искомый результат. В системном анализе следует стремиться к таким сочетаниям различных рассуждений, которые с необходимой точностью приведут к цели исследования при минимуме затрат.

В зависимости от цели исследования рассматриваются также другие принципы, имеющие более узкую область применения, в том числе.

11. **Принцип полномочности:** исследователь должен иметь способность, возможность и право исследовать проблему.

Принцип полномочности очень важен при исследовании сложных, в том числе социально-экономических систем.

В [7] введено понятие «операция» как совокупность действий, направленных на достижение некоторой цели и предложено различать руководителя операции (исследования) и исследователя. Руководитель ставит задачу и определяет объем необходимой для проведения исследования информации. Исследователь разрабатывает модель и проводит необходимые исследования в соответствии с поставленной задачей. Утверждается, что на первом этапе исследования – «создания и описания способов действия, которые могут привести к достижению цели» – математику «делать почти нечего» и что исследователь операции, «исследуя операцию в целом, но будучи зачастую лишенным всей полноты информации об операции, в принятии ответственных решений не участвует».

Подобное распределение обязанностей между руководителем и исследователем обычно приводит к нежелательным последствиям. Пока руководитель операции будет считать себя свободным от понимания математической модели, а математик полагать нормой работу без детального осмысливания существа задачи и всей имеющейся информации, будут появляться модели, отражающие действительность неадекватно, и вырабатываться рекомендации, которым опасно (или невозможно) следовать или которые обеспечивают поддержку ведомственных, в самом плохом смысле этого слова, решений. При этом математическое моделирование превращается в абстрактное, не имеющее практического смысла математизирование или в инструмент обмана.

Этот подход к правам и обязанностям исследователя операций был в дальнейшем исключен в теоретических работах по исследованию операций. Более того, он противоречит основным положениям методологии системного анализа.

Возможны два варианта взаимодействия руководителя и исследователя операции. Первый вариант. В одном лице объединяются руководитель (заказчик) и исследователь операции, т.е. лицо, отвечающее за операцию, руководит и исследованиями, в том числе созданием и использованием необходимых математических моделей. Естественно, руководитель не может быть одинаково компетентным во всех необходимых для исследования областях знания и будет привлекать различных специалистов.

При этом он должен быть достаточно подготовлен, чтобы держать в руках все нити исследования, квалифицированно оценивать полученные

рекомендации и при необходимости уточнить постановку задачи, состав релевантных факторов, структуру допущений. Время руководителей, некомпетентных в научных методах исследования, прошло.

Второй вариант. Поиск решения заказчик поручает группе исследователей с предоставлением всей имеющейся информации. Тогда эта группа отвечает полностью за все этапы работы, начиная с постановки задачи и кончая выработкой рекомендаций, а также, если заказчик следует полученным рекомендациям, за результаты внедрения этих рекомендаций. При работе по этому варианту исследователю для чёткого представления действительной сущности задачи потребуются неоднократные обсуждения с заказчиком существа задачи и условий реализации рекомендаций.

12. Принцип организованности: решения, выводы, действия должны соответствовать степени детализации системы, ее определенности, организованности. Бессмысленно управлять системой, в которой команды не исполняются.

Последние два принципа оказываются весьма важными при рассмотрении организационных систем. Пренебрежение ими делает бессмысленным применение научных подходов к оргсистемам.

Перечисленные принципы справедливы равным образом для задач анализа и синтеза. В моделях систем они должны быть конкретизированы в зависимости от существа системы и решаемой задачи. Представление о том, «что этот принцип означает здесь, в чем его конкретное содержание», приведет к более четкому осмысливанию постановки задачи, сути проводимого исследования.

Для применения принципов системного подхода необходимо уметь прогнозировать поведение системы при воздействии на неё внешних сил. Это тем более необходимо, поскольку одной из основных задач синтеза систем является поиск целенаправленных воздействий на систему, приводящих к желаемому результату. *Пренебрежение принципами системного подхода приводит к принятию безграмотных решений, порой с непоправимыми последствиями, всё более губительными по мере того, как у лиц, принимающих решение, появляются большие возможности.* Примеров подобных последствий, к сожалению, предостаточно.

Системный подход способствует развитию системного мышления, более полному и всестороннему учету всех факторов, определяющих поведение системы.

Основные закономерности организации материального мира.

При изучении систем, являющихся фрагментами реального мира, необходимо опираться на законы функционирования этого мира.

Проблема описания (моделирования) материального мира сводится прежде всего к описанию *механизмов отбора, лежащих в основе причинности всех реальных движений материи, сужению множества виртуальных (мыслимых, согласуемых со связями) движений, отбору реальных движений из числа виртуальных.*

Переход от одного уровня развития материи к более высокому сопровождается появлением новых отношений, качественным усложнением структуры систем.

Различают три уровня развития материи:

- уровень неживой природы;
- биологический уровень;
- общественный уровень.

А. Основы организации неживой природы

Общим для материального мира являются *законы сохранения энергии*. Если какое-либо движение не подчиняется этим законам, его следует из рассмотрения исключить. Первый из законов сохранения энергии – *закон сохранения количества движения* – второй закон Ньютона. Заслуга Ньютона состоит в том, что он первый понял, что ускорение, а не скорость объекта пропорциональна приложенной силе.

Законы сохранения энергии дают определенные правила выбора реальных движений из числа виртуальных и поэтому эквивалентны вариационным принципам и могут рассматриваться как следствие последних.

Например, закон сохранения из всех мыслимых траекторий перевода объекта из одного состояния в другое выбирает ту траекторию, на которой достигается экстремум функционала. Природа как бы выбирает наиболее экономный способ достижения цели.

Поскольку закон сохранения – это некоторый специальный класс соотношений между фазовыми переменными, то связь закона с вариационными принципами позволяет сформулировать его следующим образом:

Соотношение между фазовыми переменными, которое для функционалов, входящих в вариационные принципы, является уравнением Эйлера, называется законом сохранения.

Вариационная формулировка законов сохранения энергии – одно из современных достижений физики. Движение неживой материи всегда можно описать в терминах многокритериальной оптимизации, т.е. состояние материи определяется как соответствующее минимуму функционалов:

$$J_1(x) \rightarrow \min, J_2(x) \rightarrow \min, \dots, J_k(x) \rightarrow \min.$$

Функционалы ранжированы. В точках пересечения множества функционалов происходит отбор из виртуальных наилучших в определенном смысле квазистационарных движений.

Вариационные принципы уточняются по мере развития человеческих знаний.

Для создания моделей реальных систем кроме законов сохранения необходимы дополнительные эмпирические соотношения, связывающие отдельные параметры. Эти дополнительные ограничения не противоречат законам сохранения, но сужают область допустимых траекторий движения материи. Необходимые ограничения выражаются, как правило, в виде формул. (Например, зависимость плотности газа от температуры и давления, зависимость скорости течений в океане от скорости ветра.) Построение соотношений подобного рода называется **параметризацией**.

К числу таких дополнительных ограничений относится второй закон термодинамики, согласно которому следует, что на любой реальной траектории замкнутой системы производная от функционала, называемого энтропией, не может быть отрицательной: $dH/dt \geq 0$.

Второй закон термодинамики не противоречит закону сохранения.

Среди множества траекторий, отобранных законом сохранения, реализуются лишь те, вдоль которых энтропия не убывает. В то же время этот принцип способствует правильной параметризации.

Принцип *неубывания энтропии* имеет также глубокий философский смысл. Энтропия трактуется как мера неупорядоченности, степень разрушения организации. Процессы, протекающие в неживом мире, представляются как диалектическое единство противоположностей – сохранения и разрушения материи.

Еще два механизма отбора (принципа) вместе с законами сохранения и принципом неубывания энтропии составляют основу организации неживой природы.

Принцип минимума диссипации энергии, который гласит, что *среди виртуальных движений, удовлетворяющих законам сохранения, реализуются*

лишь те, для которых диссипация (рассеивание) энергии минимальна, или, что одно и то же, минимален рост энтропии.

Принцип диссипации энергии строго не доказан.

Возможно, справедлив следующий обобщенный принцип диссипации энергии.

Если в конкретных условиях возможно несколько типов организации материи, согласующихся с другими принципами отбора, то реализуется та структура, которой отвечает минимальный рост энтропии или максимальное ее убывание. Поскольку убывание энтропии возможно только за счет поглощения энергии, то реализуются только те из возможных форм организации материи, которые способны в максимальной степени поглощать энергию.

Согласно **принципу устойчивости** реализуются лишь устойчивые формы движения. Неустойчивые формы, если возникают, то быстро разрушаются.

Определение устойчивости, по Ляпунову: движение устойчиво, если достаточно малые отклонения от него порождают траектории, которые остаются близкими к исходной траектории на достаточно большом интервале времени.

Приведенное определение является достаточным, если рассматривать конкретный длительный для определенной системы интервал времени. (Например, при полете Москва – Новосибирск автопилот самолета обеспечивает указанный принцип.) В конце концов, все разрушается.

Принципы устойчивости и диссипации энергии в ряде случаев противоречат. Например, обе формы движения жидкости – ламинарное и турбулентное – удовлетворяют закону сохранения. Если Q – количество жидкости, протекающее через трубу, мало, то реализуется устойчивый ламинарный режим. Он более экономичен, затраты энергии минимальны. Если внести какое-либо возмущение, оно быстро затухнет. Если $Q > Q_{кр.}$, ламинарный режим становится неустойчивым. При больших Q течение становится турбулентным, как отвечающее принципу диссипации, которому отдается предпочтение перед принципом устойчивости. Возможно, этот пример не вполне корректен, – турбулентное движение имеет много форм.

Б. Биологический уровень организации материи

Для биологического уровня развития материи справедливы закономерности неживой материи, хотя в их проявлении имеются определенные особенности, в то же время появляются новые, свойственные

только живым организмам законы и тенденции развития. Явления живой природы сложнее. Здесь также имеет место формализация совокупности условий в виде набора функционалов, но ранжирование функционалов для каждого живого существа свое – это оптимальный способ поведения. По мере изменения внешней среды меняется упорядоченность функционалов. Переранжирование функционалов производится адаптационными механизмами. Условный и безусловный рефлекс – механизмы ранжирования.

Первое, что нужно ввести при изучении процессов, протекающих в живой материи, это понятия: ***цель, информация, обратная связь, гомеостатиз.***

Движение в живой природе всегда *целенаправленно*. Цель однозначно связана с причинностью. Для естественников здесь нет вопросов, но существует философская сторона дела. В основе религиозной теологии лежит представление о высшей цели. Постепенно сложилось понятие, что целенаправленное действие присуще человеку. Гегель уже допускал существование у любого живого существа внутренней целесообразности.

Энгельс отметил, что планомерные действия существуют в зародышевом виде везде, где живой белок существует и реагирует, совершая определенные действия, как следствие на раздражения извне. Отсюда следует определение. Всем живым организмам свойственны ***целенаправленные действия*** различной сложности и природы. То есть *общей закономерностью у сознательного целеполагания и несознательного функционирования самоуправляемой системы любой природы является направленность к достижению определенного результата.*

Здесь не предполагается тождественность разумных, основанных на прогнозе последствий действий человека и рефлексивных действий живых организмов, обладающих генетической памятью. Хотя границу порой провести трудно. Например, городские вороны действуют, базируясь не только на генетической памяти.

Когда появляется цель, тогда для отбора движения возникают ***управление и отрицательная обратная связь.***

Как управление определяется целью, покажем на примере полета стрижа. Ускорение полета является функцией положения крыла, а при приближении к земле и функцией расстояния от земли. Чтобы стриж не разбился при приближении к земле, управление обеспечивает у земли равенство нулю скорости полета. Здесь и существует обратная отрицательная связь, обеспечивающая выполнение принятого решения – достижения поставленной цели.

Таким образом, организация в живом мире рождает совершенно новый механизм развития – обратную связь. Наличие обратной связи – одно из основных отличий живого от неживого. Живое существо – организм, имеющий свои цели и механизмы их реализации. Обратная связь не выводится из законов сохранения, она порождается целенаправленностью действий, что имеет место только в живой природе – это и есть механизм отбора.

Отрицательная обратная связь обеспечивает выполнение поставленной цели и в зависимости от вида управляющего сигнала она разделяется на стабилизацию, программное управление и следящие системы. Положительная обратная связь способствует поиску и достижению целей более высокого уровня. Однако при отсутствии контроля положительная обратная связь может привести к выходу на тупиковые ситуации.

Принцип обратной связи лежит в основе всех эволюционных процессов, так как в результате действия обратной связи выделяются те индивиды, поведение которых наилучшим образом обеспечивает их стабильное существование при изменении внешних условий. В неживой природе отрицательная обратная связь является созданием человека – живая материя порождает саму себя и целенаправленно использует неживую материю.

Из роли обратной связи непосредственно следует принцип гомеостатиза (гомеостаза).

Согласно принципу гомеостаза живой организм существует внутри гомеостаза (области гомеостаза) – области пространства параметров внешней среды, в пределах которой обеспечивается (возможна) жизнедеятельность организма. Границы области гомеостаза – это множество критических значений параметров внешней среды, выделяющих область, за пределами которой существование организма невозможно. Механизмы обратной связи приводят к таким реакциям организма, которые отдаляют организм от границ области гомеостатиза, либо способствуют перестройке организма, расширяющей эту область, либо воздействуют на внешнюю среду, изменяя ее в своих интересах.

Принцип гомеостаза может быть сформулирован и так: положение организма относительно границы гомеостаза оказывает решающее влияние на состояние организма.

Живой организм – всегда открытая система, ему свойствен метаболизм – обмен с внешней средой энергией и веществом. Эмпирически выведено следующее свойство живого организма: так направлять эволюционный процесс, чтобы максимально использовать результаты этого обмена. Это реализуется положительными обратными связями, которые вообще-то противоречат принципу гомеостатиза. Необходим компромисс – разрешение

противоречия между стремлением к стабильности – сохранению гомеостаза и тенденцией поиска новых, более рациональных способов освоения внешних энергии и вещества. Разрешение этого противоречия – важная особенность эволюционных процессов живой материи.

Описание обратных связей в живых организмах приводит к понятию функций поведения организма. Совместно с обратными связями функции поведения образуют замкнутую модель поведения биологических систем.

Функции поведения, хотя и являются следствием условий гомеостаза, теоретически описываются сложно и изучаются в основном экспериментально. Чтобы организм определил свое положение относительно границ гомеостаза и выработал определенное поведение, нужна информация о близости организма к границам. Для этой цели организм должен обладать датчиками (рецепторами) информации и механизмами передачи и обработки информации. Переработать информацию может только живой организм или механизм, построенный человеком. Первоначально управляющие воздействия носили рефлексивный характер. По мере эволюции живых организмов связь между внешними воздействиями и решениями усложнялась и нервная система перестала быть системой рефлексного типа. Появляется способность прогноза, способность предугадывания. Нервная система стала важным элементом самоорганизации.

Когда появились смертные организмы – эукариоты, возник генетический код как обеспечение индивидуальной жизни путем реализации принципа наследственности. Возникновение генетической памяти стимулировало эволюционный процесс. По-видимому, здесь также имел место отбор – живые существа с другими средствами передачи наследственности не выжили. Таким образом, информация в цепях обратных связей о положении организма относительно границ гомеостаза и о новых, более рациональных путях освоения энергии и вещества после соответствующей обработки служит основанием для принятия решения.

Оценкой качества информации может быть только качество (эффективность) решений, принимаемых при использовании информации – насколько полученная информация способствует достижению организмом своей цели. Причем одна и та же информация может иметь различную значимость для разных лиц и при решении различных задач. «Полезная» информация может оказаться помехой. Энтропийная мера количества информации, определенная в теории информации, также важна, но её недостаточно для оценки информации с системных позиций.

Итак, задача биосистемы – целенаправленная эволюция с целью сохранения собственной стабильности, удаления от границ гомеостаза. В то

же время совершенствование биосистемы заключается в расширении области гомеостаза и в улучшении качества информации о границах этой области. Биосистема воздействует на окружающую среду, изменяя ее в своих интересах.

В живой природе понятие «устойчивость» заменяется законом адаптации. Живые организмы адаптируются к условиям внешней среды и адаптируют внешнюю среду, обеспечивая гомеостаз биологических макросистем. Эволюция – это направленный процесс, один из результатов адаптации. Существуют различные точки зрения относительно направленности эволюции. Согласно Дарвину, мелкие изменения признаков постепенно накапливаются при помощи естественного отбора, но сами по себе мутации (изменения) беспорядочны, случайны. Согласно другой точке зрения, изменения подчиняются определенным закономерностям. По-видимому, имеют место оба процесса, причем больше вероятность таких мутаций, которые требуют меньших энергозатрат.

Самостоятельная, весьма важная линия эволюции живой природы, ее самоорганизации – способность к кооперации. Кооперативность совместно с внутривидовой борьбой (снова единство противоположностей) – это две стороны единого процесса самоорганизации.

Вначале кооперация – это объединение, чтобы совместно выжить. Далее возникли более сложные объединения организмов – своеобразный сложный организм. Появились биогеоценозы. Биогеоценоз – это такая самостоятельная экосистема, в которой внутренние связи значительно сильнее внешних. Для биогеоценоза характерна иерархия, на нижних уровнях которой располагаются элементарные биогеоценозы. Комбинация биогеоценозов – тоже биогеоценоз. Различные организмы и популяции, входящие в биогеоценоз, имеют свои цели, свои области гомеостаза, причем цели и функции систем более высокого уровня (например, популяций) не выводятся из целей отдельных организмов, а порой просто противоречат им. В моделях популяций следует учитывать верхнюю петлю обратной связи, отражающую коллективное поведение и определяющую реакцию популяции в целом на ее положение относительно границы гомеостаза. Верхняя петля обратной связи относится ко всему биогеоценозу, понять структуру этой петли порой весьма трудно. Биогеоценоз – это противоречивое единство различных организмов. Спектр противоречий весьма широк и во многом определяет механизмы отбора. Не исключено, что обеспечение гомеостаза одних элементов биогеоценоза приводит к разрушению гомеостаза других.

Действительно, в динамике биологических макросистем основную нагрузку при переносе вещества и энергии несут трофические связи. В этих

связях работает закон сохранения. В сложных биогеоценозах, построенных по иерархическому принципу, кроме трофических связей, имеют место более сложные процессы обмена веществом и энергией. На основании проведенных экспериментальных исследований получен интересный результат – стабилизация в экосистемах с иерархической организацией достигается за счет управляющих воздействий верхнего уровня, поэтому усложнение системы связей приводит к повышению степени устойчивости экосистем.

В. Особенности эволюции общественных систем

(особенности антропогенеза)

Новое качественное усложнение объекта исследования – появление общественных систем – естественно приводит к расширению принципов, изменению действия общих закономерностей. Сложность процессов, протекающих в общественной природе, неизбежно ведет к необходимости при изучении этих процессов сочетания формальных математических методов и неформального мышления. Описание этих процессов предполагает введение представлений о переплетающихся между собой целях, обратных связях и потоках информации.

Вначале о направлении развития общественных организмов.

Естественный отбор в живой природе привел к двум результатам.

Первое направление эволюции привело к слиянию отдельных организмов в общий организм так, что самостоятельное существование отдельного организма стало бессмысленным (например, муравейник). Этот путь эволюции оказался тупиковым.

Второе направление эволюции – развитие индивида, его способности к выбору лучшего движения, к повышению гомеостатической стабильности. Это направление привело к возникновению все более интеллектуальных форм живой материи, в которых развитие сообщества предполагает не только существование у индивидов личных целей, но и развитие индивидуальностей.

Эволюция живого организма создавала все новые и новые элементы самопознания. Переход к нерефлексивным формам организации явил собою некоторый скачок эволюционного развития. Это было началом периода антропогенеза, занявшего всего несколько миллионов лет.

Трудовые навыки ускорили процесс совершенствования головного мозга. По мере того как трудовые навыки, способности к целенаправленной деятельности стали передаваться от индивида к индивиду, от одного поколения к другому, все большее значение приобретали коллективная память и учителя общества. Для использования орудий труда мало генетической памяти. Появился новый вид памяти – коллективная память. Опыт прежних поколений может в полной мере передаваться через отдельных субъектов –

учителей. Один из механизмов коллективной памяти – обучение. Передача информации в стаде не носит генетический характер. Старший учит младших – делай, как я.

Память и наследственность не одно и то же. Память – это конкретный механизм кодирования, хранения и передачи информации. Наследственность – описание процессов самоорганизации различной природы.

Целенаправленные действия наших предков со временем начали управляться интеллектом. Появились большие возможности реализации общих целей, появилось понятие моральных основ функционирования общества. Стадо человекообразных (неантропов), которое могло лучше сохранить носителей памяти и, следовательно, совершенствовать накопленные знания и навыки, создать систему запретов, ограничивающих внутривидовую борьбу, и брать под защиту всех членов общества, приобрело преимущества, которые полностью компенсировали замедление биологического совершенствования индивидов.

Действительно, эволюция человека как биологического вида в основном прекратилась. На смену пришла эволюция общественных отношений, общественных групп, состоящих из индивидов, имеющих свой гомеостаз и входящих в группу с общим гомеостазом. Успеху в отборе способствовало появление коллективного разума. Это последний этап антропогенеза.

Для социального уровня организации ранжирование функционалов, формирование их свертки – прерогатива интеллекта. Стохастичность реализуется через субъективный подход. Изменчивость определяется различием в целях, оценке обстановки и путей достижения целей. Особенность общественных систем – наличие прогнозных оценок изменчивости внешней среды.

Участие интеллекта убыстряет процессы ранжирования функционалов, поиск оптимумов. Убыстрению эволюции способствуют конфликтные ситуации, наличие многокритериальной оптимизации. Например, недостаток энергетических ресурсов заставляет искать энергосберегающие технологии. В результате столкновения интересов возникают неоднозначность и неопределенность. Появляются условия действия бифуркационных механизмов. Отсюда скачкообразная, ускоренная эволюция.

Модели организационных систем – это модели общественных процессов. Особенность этих процессов и соответственно их моделей заключается в том, что в обществе осуществлен переход от эволюции индивида к эволюции общественных групп, состоящих из индивидов, имеющих свой гомеостазис и входящих в группу с общим гомеостазисом.

В общественных отношениях закон сохранения энергии и материи проявляется в производственной деятельности. В экономике этот закон проявляется в балансных соотношениях. Функции поведения как реакция на внешние воздействия обеспечивают замыкание модели. Для общественных процессов характерны многокритериальность и неоднозначность реакций (функций поведения) в цепях обратных связей. В функциях поведения учитываются гипотезы относительно прогнозов последствий решений. Те системы, где функции поведения определены однозначно, называются рефлексными.

Особенностью является также то, что имеет место разная информированность и разные интеллекты, так что необходимо изучать не только цели, но и логические цепочки, объясняющие, как эти цели достигаются.

По мере развития общества усиливаются его внутренние противоречия и рассогласования, увеличиваются численно и усложняются контуры обратных связей. Без понимания процессов, возникающих при столкновении интересов, создать модель общества невозможно. Таким образом, общество – это совокупность иерархически организованных цепочек гомеостатических общностей, каждая из которых имеет свои цели и средства их достижения. Каждое звено этой совокупности должно осознать влияние реализации целей верхнего уровня на свою стабильность. В конечном счете развитие общественных отношений должно привести к превращению человечества в единую гомеостатическую общность, т. е. такую общность, где приоритет всегда принадлежит общим целям. В противном случае человечество погибнет.

Раздел 4. Моделирование технических систем. Основные понятия.

Определение понятия «модель». Классификация моделей. Общие требования к моделям. Структура моделей. Этапы моделирования. Значение и содержание этапа «Постановка задачи». Формализация задачи. Некоторые типовые проблемы, возникающие при исследовании. Интерполяция, экстраполяция, прогнозирование. Линейность и нелинейность. Дискретность и непрерывность. Детерминированность и случайность. Планирование эксперимента. Проверка модели. Анализ результатов и внедрение рекомендаций. Использование ЭВМ в моделях. Измерительные шкалы.

Определение понятия «модель».

Под аппаратной реализацией в системном анализе понимается моделирование поведения сложной системы и процессов принятия решения в ней, а также способы (методология) использования моделей. Модель – способ познания мира – основной и единственный инструмент решения всех задач, возникающих перед человеком, инструмент научных исследований: анализа и синтеза.

Существует множество определений понятия «модель». Приведем некоторые из них.

1. Любое абсолютное знание познается через бесконечную цепочку относительных истин, приближенно отражающих те или иные черты объективной реальности. Эти относительные истины и есть модели. Язык описания модели определяет её характер. На математическом языке получается математическая модель.

2. Модель является намеренно упрощенной схемой некоторой части реальной жизни, с помощью которой мы надеемся получить рекомендации к решению реальных проблем.

3. Объект M является моделью объекта A относительно некоторой системы S характеристик, если M имитирует A по этим характеристикам.

Модель может применяться в одном из следующих качеств:

- средства познания мира, изучения характеристик и поведения реальных объектов в различных условиях;
- средства синтеза объектов с требуемыми характеристиками, заданным поведением;
- средства обучения и тренировки;
- средства общения (язык, письменность).

Модель строит исследователь. Модель базируется на объективных законах, но и способствует их пониманию.

Модели могут служить для достижения описательной или предписывающей цели. Описательные модели служат для лучшего понимания, объяснения объекта, предписывающие позволяют предсказать и (или) воспроизвести характеристики объекта, определяющие его поведение. Предписывающие модели всегда и описательные.

Математическая модель по мере накопления фактов перерастает в математическую теорию, которая сама начинает служить источником информации.

Классификация моделей.

Существует много классификаций моделей, характеризующих свойства моделей, особенности их применения, происхождение. Понимание классификаций моделей является одним из условий их грамотного применения. При этом оказывается полезным ответить на следующие вопросы.

Какого вида (типа) модель более всего подходит для решения поставленной задачи? К какому классу относится разрабатываемая модель и в чём особенности её использования?

Приведём некоторые основные классификации.

1. В зависимости от особенностей возникновения модели могут быть разделены на три группы:

а) **феноменологические**, возникающие в результате наблюдения объекта, явления, его осмысливания;

б) **асимптотические** – их появление результат дедукции. Новая модель появляется как частный случай более общей модели. Переход от феноменологических моделей к асимптотическим характеризует определённую зрелость науки;

в) **модели ансамблей** – возникли в результате процесса индукции.

Новая модель является обобщением или синтезом отдельных моделей. В моделях ансамблей свойства отдельных объектов исследуются с учётом взаимодействия объектов. Модели ансамблей не могут быть получены путем механического объединения моделей отдельных объектов в модель системы. При объединении объектов в систему внутренние свойства объектов могут изменяться, что особенно заметно при изучении социально-экономических систем.

2. В зависимости от способа описания свойств моделируемого объекта различают модели **вербальные, изобразительные, аналоговые, символические**.

Вербальные – это словесные, описательные модели. В **изобразительных** моделях изучаемые свойства (отношения) объекта представлены этими же свойствами (отношениями), но, как правило, в другом масштабе. Например, модель самолёта для продувки в аэродинамической трубе, модель солнечной системы в планетарии, модель гидроузла в конструкторской организации.

В **аналоговых** моделях свойства объекта отображаются набором специфических свойств модели. Так, при аналоговом моделировании полёта

самолёта параметры (координаты, скорость) самолёта отображаются в модели значениями напряжения, силы тока. Другой пример: множество точек земной поверхности с одинаковой высотой над уровнем моря отображаются на карте соответствующей линией – горизонталью.

В *символических* (знаковых) моделях представление величин и отношений между ними осуществляется с помощью букв, чисел и других знаков. Основное преимущество этих моделей – «вариантность». Одним знаковым описанием кодируются физически различные системы. Большое число конкретных значений параметров системы и соответственно число вариантов её поведения могут быть изучены на одной и той же модели.

При исследовании объекта могут быть использованы все четыре типа моделей. Вербальные и изобразительные модели при этом могут рассматриваться в качестве инструмента первого приближения решения задачи. Возможны комбинации различных типов моделей. Так, в тренажёры включают и аналоговые, и знаковые блоки.

3. В зависимости от способа отображения объекта различают модели *аналитические и имитационные*.

В *аналитических* моделях используются полученные из различных соображений зависимости между выходными и входными переменными модели, в том числе, при необходимости, зависимости для вычисления критериальной функции. При этом для заданных входных возмущений обеспечивается вычисление исходов модели без имитации реальных процессов, протекающих в объекте. Для аналитических моделей наиболее характерны вербальные и знаковые способы описания.

Имитационная модель имитирует исследуемый объект, течение реального процесса. Для имитационных моделей используются все способы описания.

Термин «реальный процесс» здесь и далее используется в смысле процесс «существующий» или «способный принять форму существования». Это равным образом относится к аналитическим и имитационным моделям.

Выбор между аналитической и имитационной моделями определяется задачами исследования, уровнем знаний об объекте и квалификацией исследователя. Для лучшего уяснения разницы между аналитическими и имитационными моделями рассмотрим пример моделирования случайного блуждания частицы по целочисленным точкам действительной прямой, при котором на каждом шаге частица с вероятностью p смещается по числовой оси на $+1$ и с вероятностью $q = 1-p$ – на -1 .

Пусть i – начальное положение частицы, j – положение частицы через n -шагов,

$n = 0, 1, 2, \dots$, $P_n(i \rightarrow j)$ – вероятность перехода частицы за n -шагов из состояния i в состояние j .

Попасть из i в j возможно, если в направлении от i к j сделано m из n шагов, где $n = (n + |j - i|)/2$ должно быть целым, т.е. разность $|j - i|$ должна иметь ту же четность, что и n . Естественно, переход из состояния i в состояние j невозможен, если $n < |j - i|$.

Вероятность перехода из i в j будет зависеть от двух величин m и n .

$$P_n(i \rightarrow j) = P_n(m) = C_n^m \cdot p^m \cdot q^{n-m}$$

Таким образом, построена аналитическая модель (распределение вероятностей), с помощью которой можно получить вероятность нахождения частицы через n -шагов в любом j -ом состоянии, если начальное i -ое состояние частицы известно.

При имитационном моделировании, чтобы получить искомую вероятность, потребуется провести серию из N испытаний. При каждом отдельном испытании моделируется движение частицы длительностью в n шагов, начиная с i -го начального состояния. При этом для определения направления движения частицы на каждом шаге разыгрывается случайная величина, принимающая значение $+1$ или -1 с заданными вероятностями.

При каждом испытании записывается, где оказалась частица после n -шагов.

Пусть после N испытаний, каждое из которых состояло из n -шагов, частица K -раз оказалась в состоянии j . Тогда $P_n(i \rightarrow j) = K/N$.

Для получения результата потребуется $n \cdot N$ раз разыгрывать случайную величину, и «хорошая» точность может быть получена при $N = 40 - 50$.

Для данного простого случая преимущество аналитической модели очевидно. В более сложных случаях, например трёхмерного блуждания или блуждания с поглощающими экранами, преимущество аналитической модели (такие модели известны) будет неочевидным.

4. По отношению к управлению модели разделяются на **описательные** (не содержащие управлений) и **конструктивные**.

В конструктивных моделях, содержащих управление, может ставиться задача достижения одного из трёх видов оптимумов: равномерного, статистического, минимаксного.

5. В зависимости от цели исследования можно выделить модели **функциональные**, созданные для изучения преобразования системой входных сигналов, и структурные, предназначенные для изучения внутренней структуры системы.

6. По отношению к предметной области (ПО) модели делятся на *независимые* от ПО, *настраиваемые* на ПО, *ориентированные* на ПО.

Модели, предназначенные для изучения внутренней структуры объекта, необходимо перед их применением наполнить конкретной информацией. Модель без наполнения конкретной информацией называется *общей, абстрактной*. При этом возможны различные уровни абстракции. Модели с высоким уровнем абстракции изучаются самостоятельно. Полученные при этом результаты имеют общую значимость для всех случаев их наполнения конкретной информацией.

Модель, наполненная информацией из конкретной предметной области, называется конкретной. Задача наполнения общей модели информацией при существенном объеме последней привела к разработке баз и банков данных. Базы обеспечивают хранение данных, в банках, кроме хранения информации, указания способа и форм её вызова, предусматривается совокупность обслуживающих операций, в том числе набор алгоритмов обработки информации.

В зависимости от характеристик объекта, вида входной информации и цели исследования разрабатываются следующие виды моделей:

- 7) *детерминистические, стохастические, модели с неопределенностями;*
- 8) *непрерывные, дискретные и дискретно-непрерывные;*
- 9) *статические и динамические;*
- 10) *линейные и нелинейные.*

В последней классификации используются отдельные свойства модели. В реальной модели будет иметь место «набор» свойств. Так, например, некоторая модель является дискретной, стохастической, линейной, динамической. Существуют и другие, кроме рассмотренных выше, классификации моделей.

Общие требования к моделям.

Общие требования к моделям непосредственно вытекают из особенностей методологии системного подхода и могут быть сформулированы следующим образом.

1 ***Требование адекватности*** модели моделируемой системе относительно совокупности характеристик, обеспечивающих достижение поставленной цели исследования.

Поскольку модель ориентирована на решение конкретной задачи, в ней должны быть учтены все те свойства, которые, безусловно, влияют на результаты решения этой задачи. Излишние подробности, не влияющие или

слабо влияющие на результаты, должны быть исключены. Подобные подробности могут заметно усложнить эксперимент и ухудшить точность решения.

Введем понятие «фактор-система» («фактор-действительность»). Под фактор-системой будем понимать результат отождествления элементов системы друг с другом, т.е. объединения элементов системы в классы эквивалентности, причем каждый класс эквивалентности может быть представлен любым своим членом. Отождествление проводится таким образом, что несущественные для решаемой задачи второстепенные детали опускаются, но на фактор-системе сохраняются все отношения и свойства между элементами системы, а также между системой и окружающей средой, существенные для этой задачи. Между элементами системы и фактор-системы существует неоднозначное соответствие. Фактор-система является так называемым гомоморфным отображением системы, соответственно множеству элементов системы, отнесенных при отождествлении к одному классу, соответствует в фактор-системе один элемент – представитель этого класса. Модель, в свою очередь, можно рассматривать как изоморфное представление фактор-системы, т.е. гомоморфное отображение исходной системы. Создание модели, изоморфной моделируемой системе, невозможно, так как реальный мир, реальная действительность имеет бесконечную размерность.

Какими бы разнообразными ни были модели любой сложной системы, все они содержатся во множестве подмножеств этой системы.

Таким образом, модель, адекватная моделируемой системе, – это модель, изоморфная фактор-системе, в которой обеспечивается совпадение модели с объектом в той мере и с такой степенью точности (степенью закругления), с которой это достаточно для решения поставленной задачи.

Справедливо следующее положение: точность любого описания (модели) – это точность соглашения о неразличимости отождествляемого.

При построении модели, адекватной решаемой задаче, возникает проблема равнопрочности этапов исследования. Причём существует равнопрочность различного «уровня». Обратимся к рис.1. Выделяемая из реального мира фактор-действительность должна быть, как отмечалось выше, адекватна задаче исследования.

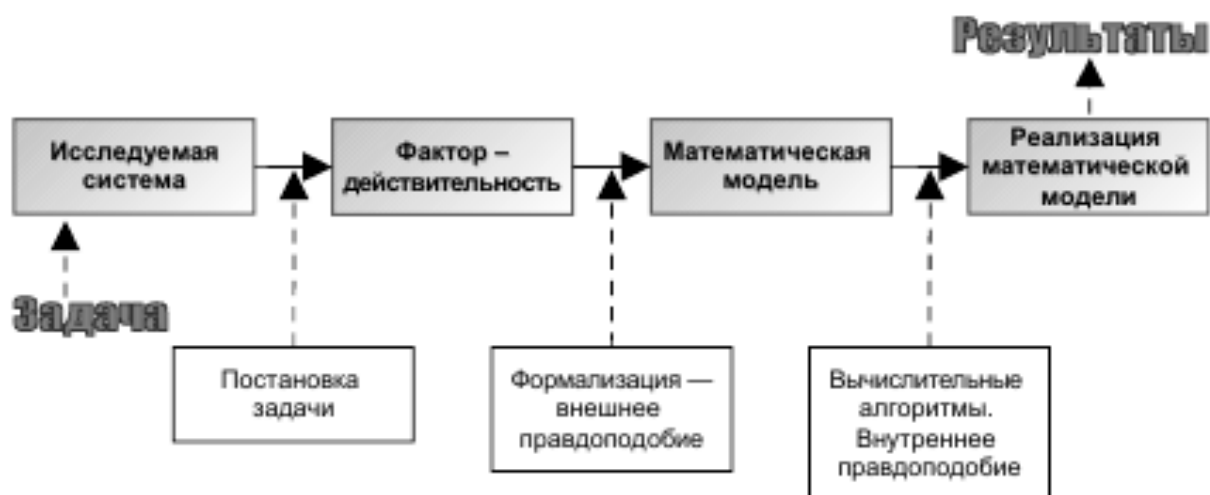


Рис. 1 Построение правдоподобной модели.

Далее, при моделировании различают внешнее и внутреннее правдоподобие. При наиболее полном внешнем правдоподобии математическая модель полностью изоморфна (точно отображает) выделенной фактор-действительности, т.е. есть уверенность, что математическая модель обеспечит при её реализации результат, который мог бы быть получен при экспериментировании на реальном объекте при игнорировании деталей, не влияющих на решение поставленной задачи. Внутреннее правдоподобие определяет, насколько конкретная реализация модели совпадает с математической моделью. Чтобы определить внутреннее правдоподобие, необходимо сравнить реакцию на входной сигнал конкретной реализации модели с реакцией на тот же сигнал математической модели. Внутреннее правдоподобие зависит от принятых вычислительных методов и используемой при реализации модели техники.

Определяют также адекватность качественную (адекватность функционального описания) и количественную (совпадение исходов модели и объекта при одинаковых входах).

Трудности возникают как при выделении фактор–действительности и формализации задачи, так и при реализации модели. Известны две крайние точки зрения. Первая – это стремление во всех случаях обеспечить максимальное внешнее правдоподобие. После чего не исключено, что для реализации модели потребуется вводить существенные упрощения. Другая крайность – при формализации модель упрощается так, что можно было бы, используя известные вычислительные методы, полностью обеспечить внутреннее правдоподобие. Модели, в которых при небольшом внешнем правдоподобии используются весьма точные математические методы, весьма

распространены, хотя оценка целесообразности такого подхода обычно не делается.

Может оказаться оправданным стремление к некоторому компромиссу между внешним и внутренним правдоподобиями, т.е. к «равнопрочности» этих двух этапов создания модели. Разумная степень такой равнопрочности должна быть выбрана в каждом конкретном случае.

Иногда возникают и чисто модельные трудности в реализации модели, являющиеся следствием не сложности системы, а неудачно выбранной структуры математической модели.

Своеобразный уровень равнопрочности должен быть также установлен между качеством входной информации и внутренним правдоподобием. Нет смысла применять сложные вычислительные методы, если необходимые для расчета исходные данные отсутствуют или они известны с большими погрешностями. Если для расчетов на разработанной модели необходимо знание параметров и переменных, которые в ближайшем будущем не будут получены, надо отказаться от этой модели и заменить её другой, пусть менее точной, но опирающейся на доступную информацию. Пренебрежение при создании модели к оценке доступности источников информации – ошибка типичная. Во многих случаях исследования, претендующие на роль прикладных, начинаются с перечисления параметров, которые полагаются известными. Как, с какой точностью они будут получены – такой вопрос даже не ставится. Модели, созданные без учета имеющейся информации, следует называть «информационно-уродливыми», а соответствующие «прикладные исследования» – бессмысленными абстрактными упражнениями.

Всё это в полной мере относится к использованию математических моделей социально-экономических, биологических и других систем, которые называют мягкими вследствие характерных для этих систем слабой конструктивности, расплывчатости причинно-следственных связей, неоднозначности реакции на внешние возмущения. Для подобных систем справедлив принцип конструктивного поведения Дж. Форестера, согласно которому дать удовлетворительный прогноз о поведении сложной системы, используя только собственный опыт и интуицию, как правило, невозможно – сложная система реагирует на внешнее воздействие зачастую совсем иначе, чем это ожидает интуиция, основанная на общении с достаточно простыми системами. Ранее уже отмечалось, что в этом случае требуется перейти к интуиции более высокого порядка и для изучения подобных систем развиваются новые методологические подходы, при этом система исследуется не как часть реального мира, а как системно организованный процесс её изучения, предполагающий возможность различных интерпретаций

исследуемой системы. В таких случаях конструируется сразу несколько моделей, отвечающих различным картинам мира участников исследования, и создается некоторая структура для сравнения результатов, полученных на различных моделях, отвечающих различным картинам мира. То есть модель мягкой системы на обеспечение необходимой адекватности в общем случае не претендует. Результаты исследования, полученные на моделях, сравниваются с реалиями мира, возможные последствия рекомендаций, полученных с помощью моделей, тщательно изучаются.

2. Требование *достаточной простоты*.

Требования простоты и адекватности в общем случае взаимосвязаны. Могут быть случаи, когда требуемую адекватность получить не удастся вследствие невозможности создания модели соответствующей сложности. Однако не исключаются случаи, когда более простая модель обеспечивает лучшую адекватность – ввод в модель второстепенных, не нужных для решения задачи деталей не способствует лучшему пониманию существа дела. Справедливо положение: из всех моделей лучшей является наиболее простая, обеспечивающая необходимую адекватность.

3. Требование *замкнутости* модели.

Если известно начальное состояние системы и известны на некотором интервале внешние воздействия и управления, то модель объекта должна позволить определить на этом интервале все переменные, характеризующие состояние объекта.

4. Требование *устойчивости*.

Модель должна быть устойчива (вычислительный процесс не должен расходиться) для тех условий и возмущений, для которых устойчив моделируемый объект. Следует отметить, что существует много показателей устойчивости.

Устойчивость модели (сходимость метода) в каждом конкретном случае связана с определенными условиями. Например, иногда при включении в модель аналоговой ЭВМ неустойчивость возникает вследствие собственных «люфтов» ЭВМ. И при использовании в модели цифровой ЭВМ неустойчивость может, вследствие особенностей вычислительного процесса, появиться там, где в моделируемом непрерывном процессе устойчивость гарантирована.

5. Требование *аддитивности*.

Должна быть предусмотрена возможность уточнения структуры модели и обновления модельной информации.

6. Требование *удобства*.

Вся используемая в модели информация, в том числе все промежуточные и конечные результаты должны представляться оперативно в удобной форме. Соответственно в модель должен быть включен набор средств, способствующих плодотворному взаимодействию человека и модели, в том числе сервисные программы, обеспечивающие простоту и удобство использования модели.

Структура моделей.

В самом общем виде модель может быть представлена в виде схемы, показанной на рис. 2.

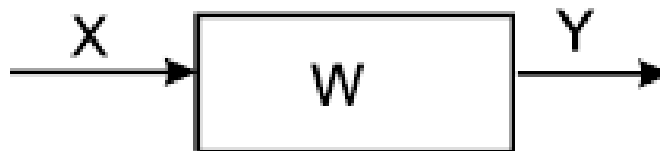


Рис.2. Общий вид модели. X – вектор входных (экзогенных) переменных, Y – вектор выходных переменных (исходы модели); W – оператор модели.

Оператор модели обеспечивает преобразование входной информации в выходную в соответствии с задачей, решаемой на модели.

Также в общем случае в состав модели входят компоненты, параметры, переменные, функциональные зависимости, ограничения, целевая (критериальная) функция.

Под компонентами модели реальной системы (объекта) понимаются модели отдельных элементов (подсистем) моделируемой системы (объекта).

Параметры после их определения и ввода в модель являются постоянными величинами. Некоторые параметры могут быть переменными. Определение значений параметров модели может рассматриваться как самостоятельная задача.

Переменные величины модели делятся на экзогенные и эндогенные. Экзогенные переменные (внешние по отношению к модели, «входные») являются следствием воздействия на систему окружающей среды или управлений. Эндогенные переменные характеризуют процессы, протекающие в модели. В каждый момент времени они либо характеризуют состояние модели – такие переменные также называются фазовыми координатами, либо определяют исходы, генерируемые моделью, – такие эндогенные переменные называются выходными или исходами системы.

Следует также различать управляемые и неуправляемые переменные.

W – оператор системы, определяет функциональные соотношения между переменными модели.

Ограничения устанавливают пределы изменения переменных, а также и допустимые пределы расхода ресурсов и средств на решение задачи, в том числе на время, которое можно использовать на исследование, чтобы получить результат к требуемому моменту. Ограничения могут быть искусственными – устанавливаются разработчиком модели или естественными – являются следствием свойств, присущих системе и окружающей среде.

Целевые (критериальные) функция (функционалы, отношения предпочтения) отражают цели исследования и содержат правила вычисления соответствующих критериев.

Возможны следующие варианты задач, решаемых на моделях:

- 1) Прямая задача: известны X и W , необходимо найти Y .
- 2) Обратная задача 1: известны Y и W , необходимо найти X .
- 3) Обратная задача 2: известны X и Y , необходимо найти W .

В задаче 1 в состав модели может включаться реальная система или её подсистемы. Для обратной задачи 2 возможны два варианта: 1) анализ структуры оператора системы, 2) поиск оператора, обеспечивающего требуемое преобразование входной информации. В обратной задаче 2 при умелом подборе входной информации по анализу реакции системы на входное возмущение вскрывается структура системы. Здесь возможны случаи «черного ящика» – оператор системы полностью не известен, и «серого ящика» – структура известна, но не известны значения параметров. Обратная задача может быть задачей синтеза. Поиск оператора для получения требуемого преобразования входного сигнала обеспечивается специальными оптимизирующими процедурами, реализуемыми в моделях.

Этапы моделирования

Этапы моделирования показаны на блок-схеме рис.3.

На схеме видны многочисленные обратные связи – возвращение к предыдущим этапам после анализа промежуточных и конечных результатов моделирования. Это характерно для прикладных исследований. В процессе эксперимента уточняются постановка задачи, её формализация, допущения, совершенствуются вычислительные алгоритмы.

При моделировании сложной системы часто оказывается удобным, а порой и необходимым провести декомпозицию – разделение системы на модули, после чего модель сложной системы будет состоять из связанных между собой моделей этих модулей. Структура полученной таким образом

сложной модели должна соответствовать структуре и иерархии исходной системы, точнее, полученная модель должна быть адекватна исходной модели в том смысле, как это определено выше.

Соответственно создание модели сложной системы включает две дополнительные операции: декомпозицию системы, деление её на модули и согласование отдельных модулей, их входов и выходов.

Для моделей сложных систем характерно:

- одна и та же информация оказывается необходимой для разных блоков – моделей модулей системы;
- при совместной работе блоков сложной модели требуется видоизменение информации при передаче её от одного блока к другому (т.е. интерфейсная адаптация). В связи с этим при моделировании сложной системы особое внимание уделяется способам хранения информации и организации информационных потоков.

Декомпозицию и согласование при создании модели сложной системы следует отнести к этапу 2 (рис. 3).

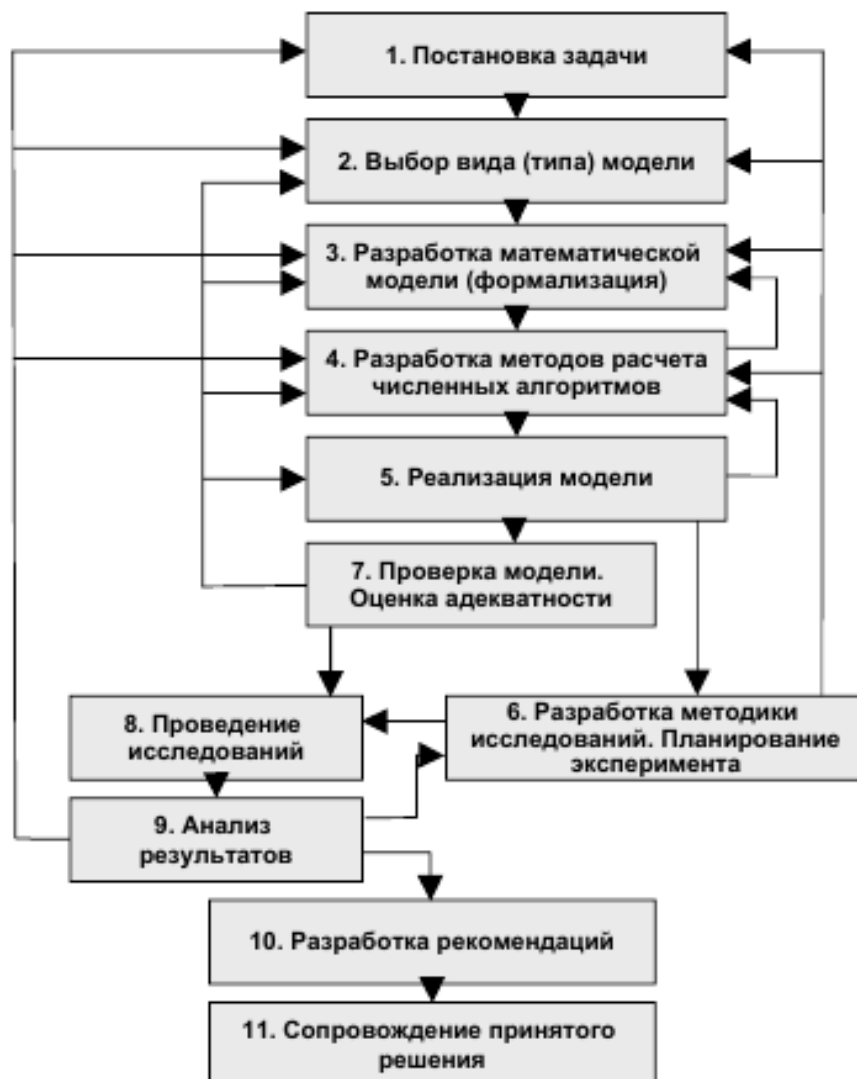


Рис. 3 Этапы построения модели

Достоинство математики – применение одинаковых моделей для изучения различных по физической природе и решаемым задачам систем. Это не противоречит утверждению, что для решения каждой конкретной проблемы нужна своя индивидуальная модель.

Как бы ни была сложна и «индивидуальна» модель, всегда при её создании используются разработанные ранее для других целей блоки моделей и методы, а также накопленный методический опыт.

Значение и содержание этапа «постановка задачи».

Постановка задачи является 1-м этапом моделирования. Решающее значение этого этапа для успеха исследования отмечается во всех работах, посвященных методологии моделирования.

Сформулировать задачу на языке математики – это значит более чем наполовину решить её. Ошибка в постановке задачи может однозначно определить неудачу дальнейших исследований. Как писал Валерий Брюсов: «Однажды ошибаясь при выборе дороги, / шли вдаль ученые, глядя на свой компас. / И был их труд высок, шаги их были строги, / но уводил их прочь от цели каждый час».

Правильное формулирование задачи – это научная проблема не менее сложная, чем решение задачи, и не нужно надеяться, что кто-то другой сделает это за вас».

Проблема постановки задачи возникает зачастую, как состояние неудовлетворенности. Ситуация становится проблемной, когда действие какой либо системы, течение какого либо процесса не приводят к желаемому результату.

Известна следующая оценка времени на отдельные этапы моделирования:

- постановка задачи – 40-50%;
- разработка модели – 20-30%;
- эксперимент, анализ результатов – 20-30%.

При постановке задачи решаются следующие взаимосвязанные задачи:

1. Уяснение цели (задачи) исследования.
2. Изучение объекта моделирования (системы, процесса).
3. Анализ доступной информации.
4. Выявление релевантных факторов.
5. Формулирование альтернатив.

6. Определение ограничений и допущений. Определение диапазона изменения параметров и переменных.

7. Выбор критерия, системы критериев качества достижения цели.
8. Установление масштаба предстоящего эксперимента.
9. Математическая постановка (формулировка) задачи.

Вследствие взаимосвязанности перечисленных задач строгой последовательности их решения не существует. Так, уяснить задачи исследования и грамотно даже на доматематическом уровне сформулировать эти задачи возможно только после определенного уровня ознакомления с объектом; изучение объекта продолжается в течение всего этапа постановки задачи, например, после анализа доступной информации может последовать определенная корректировка задачи исследования.

В приведенном перечислении этапов постановки задачи предполагается, что система существует и в процессе прикладного исследования могут исследоваться характеристики системы, разрабатываться рекомендации по изменению ее параметров, вырабатываться рекомендации по управлению системой, решаться и некоторые другие задачи. Существенно сложнее обстоит дело, когда создается новая система. В таком случае на этапе 2 необходимо уяснить цели создания системы, задачи, которые она должна решать, предполагаемое ее взаимодействие с внешней средой и с другими системами и еще многие обстоятельства, обеспечивающие в дальнейшем существование системы. Только после этого можно вернуться к этапу 1 - уяснению задач прикладного исследования.

Далее приводятся краткие пояснения существа перечисленных задач.

1. Без четкой формулировки на вербальном уровне задач исследования дальнейшая работа может оказаться просто бессмысленной и выбор лучшего решения окажется лишь математическим упражнением.

Здесь еще раз уместно подчеркнуть, что любое серьезное исследование начинается с изучения системы: ее целей, структуры, взаимодействия с окружающей средой, перспектив существования и развития. Только после этого можно четко понять задачи исследования. Формирование задачи заказчиком, если таковой имеется, следует рассматривать лишь как первое приближение. При рассмотрении требующей решения задачи одновременно с уяснением ее сущности происходит и «расширение» задачи.

2. Характер изучения системы решающим образом зависит от следующих обстоятельств: физической природы системы, ее целей и задачи (цели) исследования. При изучении системы необходимо понять ее назначение, структуру, границы, взаимодействие с окружающей средой, перспективы существования и развития. В общем случае цель системы заключается в достижении наиболее эффективным (оптимальным) способом желаемого, наилучшего, в каком-то смысле, состояния с учетом реальных

ограничений. Предполагается, что цель системы («желаемое» состояние системы) известна. Но как раз это зачастую либо совсем неясно, либо сформулировано в общем виде и без понимания, что не все желаемое достижимо. Особое внимание следует уделять отношениям, реально существующим между элементами системы, сути существующих в системе проблем и причин, вызвавших эти проблемы.

Проблема возникает как ощущение неудовлетворенности состоянием системы. Существо проблемы зачастую отчетливо не осознается. Причинами неудовлетворенности могут быть внутрисистемные трудности на пути достижения цели или изменение внешних условий, следствием которых оказывается необходимость изменения целей или корректировки траектории движения к цели.

Проблемы могут быть простыми, выяснение причин которых не требует специальных исследований, сложными – уяснение их причин связано со специальными исследованиями и очень сложными, возможно требующими изменения фундаментальных концепций системы или разработки принципиально нового методического аппарата для уяснения причин проблемы. В общем случае для понимания сути проблемы, ее формулировки на доматематическом уровне и выявления причин возникновения проблемы требуются значительные усилия.

При возникновении проблем естественно возникает вопрос, была ли эта проблема известна ранее, если «да», то принимались ли в связи с этим какие-либо решения. Возможны следующие варианты:

- проблема новая, ранее не известная;
- проблема была известна ранее, но решение не принималось, или решение принималось, но было неверным, или решение было верным, но было не выполнено.

В зависимости от варианта ответа предпринимаются действия по уяснению проблемы, выработке решения и обеспечению выполнения решения.

Проблема может быть выявлена руководителем или любым сотрудником организации. В сложных системах (организациях) целесообразно иметь специальную группу сотрудников для выявления отклонений реального состояния системы от желаемого. Важно улавливать симптомы причин, могущих вызвать проблему, своевременно реагировать на них, не дожидаясь, когда причины породят проблему. Если проблема возникла, необходимо не только разрешить проблему, но и устранить причины, которые ее вызвали. При уяснении проблемы должны быть раскрыты все неопределенности, выявлены релевантные причины, исключены

из рассмотрения причины второстепенные. При возможности должны быть собраны количественные данные относительно параметров рассогласования реального и желаемого состояний системы, а также параметров, характеризующих причины проблемы. Удобным инструментом для углубленного понимания проблемы, анализа причинно-следственных отношений, выявления возможных последствий изменения этих отношений является когнитивная структуризация – новое направление системного анализа. Цель когнитивной структуризации в формировании и уточнении исследуемого объекта (оргсистемы), рассматриваемого как сложная система, состоящая из отдельных элементов – подсистем.

Для анализа сложной системы строится структурная схема причинно-следственных связей, называемая когнитивной картой и являющаяся знаковым ориентированным графом. Два элемента, А и В, изображаются в виде вершин графа, соединенных ориентированной дугой: $A \rightarrow B$. Здесь А – причина, В – следствие. Причинно-следственные связи (отношения) разделены на два типа:

- положительные, если увеличение (усиление) А ведет к увеличению (усилению) В, а уменьшение А ведет к уменьшению В;
- отрицательные, если увеличение А ведет к уменьшению В, а уменьшение А – к увеличению В.

Положительная связь помечается на схеме знаком «плюс» над дугой, отрицательная – знаком «минус».

Количественная оценка отношений в сложных системах трудоемка. Требуется привлечение экспертов, анкетирование с последующей статистической обработкой данных и пр. Однако нередко оказывается возможным получить содержательные выводы с помощью только качественных оценок, основанных на опыте и интуиции исследователя.

Исследователи зачастую чрезмерно упрощают ситуацию из-за трудностей учета большого числа факторов, их сложного динамического взаимодействия. Причиной необоснованных упрощений могут быть и недостаток опыта или знаний у исследователя. Только немногие общественные явления зависят от одной причины. Обычно общественные явления включают много различных событий, тенденций, определяемых взаимосвязанными факторами. Образуется сеть причинных ограничений, т.е. причинность носит системный характер.

Приобретение опыта построения и анализа когнитивных карт избавит исследователя от ошибок, свойственных несистемному мышлению, научит пониманию, что событие может иметь множество причин. Это, в свою

очередь, позволит более полно разбираться в сложных проблемах, принимать обоснованные решения.

Использование когнитивных карт в организациях для анализа проблем и планирования может быть связано с анализом нескольких тысяч причинно-следственных связей. Соответственно потребуется привлечение ЭВМ и специально разработанного программного обеспечения.

3. Информация нужна не любая, а только та, которая действительно обеспечит решение задачи. Излишние подробности могут только помешать. «Информацию нужно профильтровать, отделить важное от неважного, нужное от ненужного, а отсеянное нужно представить в наиболее выразительной легко усвояемой форме. И это тоже задача прикладной математики, которой на этот раз приходится работать на грани психологии и социологии». Необходимо также получить надежные оценки точностных характеристик исходной информации. «Для успеха исследования настолько важно иметь беспристрастные, независимые от субъективных оценок фактические данные, что все они должны быть проверены и перепроверены независимо от того, из какого источника они получены».

Типичной ошибкой является начало исследований со сбора информации, т.е. до того, как уяснена постановка задачи и намечена, хотя бы в первом приближении, методика исследования. Если информация собиралась до выяснения перечисленных обстоятельств, то велика вероятность, что будет собрано много ненужной информации, а что-нибудь очень необходимое отсутствует. Важно также учитывать фактор старения информации.

Характеристики доступной информации (полнота, достоверность, точность) влияют на структуру модели, методику проведения эксперимента. Недооценка этих обстоятельств приводит к появлению моделей, называемых информационно уродливыми.

4. Релевантными называются факторы, существенным, решающим образом влияющие на результаты исследования. После определения релевантных факторов производится выбор тех из них, которые могут быть описаны количественно, уточнение списка этих факторов путем объединения их по общим признакам и исключения существенно коррелированных факторов. После уточнения списка релевантных факторов потребуется убедиться, не приведет ли отказ от некоторых факторов к недопустимому снижению точности решения задачи или что существует такая вероятность. При внимательном рассмотрении может выясниться, что некоторые факторы, отнесенные вначале к неизмеримым, могут быть оценены косвенно.

5. На начальном этапе необходимо сохранить все возможные, в том числе кажущиеся нелепыми альтернативы решения задачи. Пренебрежение

«нелепыми» альтернативами, поспешность в их отбрасывании, уступка соблазну поскорее начать вычисления, «развернуть работу» и ухватиться за первую показавшуюся хорошей альтернативу могут обернуться потерей действительно хорошего решения. В простейшем случае вместо выбора альтернатив требуется определить диапазоны изменения переменных и параметров модели.

Существует несколько организационных форм генерирования альтернатив:

а) Мозговой штурм. Формируется группа специалистов, состав которой зависит от характера проблемы и вида системы. Члены группы высказывают различные альтернативы решения проблемы, которые фиксируются, причем на этом этапе критика выдвигаемых альтернатив запрещена.

Обращается внимание на взаимосвязь альтернатив, возникновение новых идей как развитие ранее выдвинутых предложений.

б) Синектика – генерирование идей путем ассоциативного мышления. Среди задач, решение которых известно, находятся аналоги исследуемой проблеме. Например, в /17/ задача столкновения двух вражеских группировок решена на основе аналога – процесса взаимного проникновения молекул двух соприкасающихся химических веществ.

в) Разработка сценариев. Проводится описание будущего течения процесса при различных альтернативах, но при одинаковых начальных условиях. При этом важно учесть все релевантные факторы, влияющие на процесс.

г) Морфологический анализ. Определяются все возможные значения основных переменных и рассматриваются все возможные комбинации значений этих переменных. Например, при выборе вида проектируемого телевизора переменными являются цвет (черно-белый, двухцветный ... семицветный), размер изображения, градации яркости и пр. Всего возможно более 300 комбинаций переменных. Безусловно, при рассмотрении комбинаций некоторые варианты могут быть отброшены как не удовлетворяющие очевидным требованиям.

д) Деловые игры. Создаются имитационные человеко-машинные системы для анализа течения процессов при различных решениях участников игры – лиц, которым надлежит принимать решения в реальной ситуации.

6. Отказ от факторов, отнесенных к нерелевантным, сознательное упрощение ряда зависимостей, ограничение области изменения некоторых переменных и прочее способствуют упрощению модели, удешевлению эксперимента. Однако при упрощении модели может быть потеряна ее адекватность. Поэтому при постановке задачи необходимо составить список

принятых допущений с тем, чтобы вернуться к нему при анализе результатов моделирования. Не исключено, что на полученные результаты сильное влияние оказали неоправданные допущения и необходимо вернуться к уточнению постановки задачи.

7. Критериальная (целевая) функция – это отражение целей исследования и правило (алгоритм) оценки этой цели. Критерии должны обеспечить наилучшее, в определенном смысле, решение. В общем случае проблема выбора критерия – это установление признака, по которому определяется предпочтительность. В явном виде критерий может быть и не сформулирован, но характер, вид предпочтительности определен. Задача упрощается, если удастся ограничиться одним критерием, но для реальных задач более свойственна многокритериальность – т.е. векторный критерий.

Примеры задач, в которых используется векторный критерий:

а) Задачи оптимизации на множестве целей, каждая из которых должна быть учтена при выборе лучшего решения (альтернативы).

б) Задачи оптимизации на множестве объектов (подсистем). Качество функционирования каждой подсистемы оценивается своим, частным критерием, а системы в целом – некоторым общим, векторным критерием, составленным из частных критериев.

в) Задачи оптимизации на множестве условий (или временных этапов). Качество функционирования для каждого условия (этапа) оценивается частным критерием, а для всех условий (этапов) – векторным критерием, составленным из частных.

г) Многоуровневые векторные задачи оптимизации, в которых компоненты векторного критерия являются не скалярами, а более сложными образованиями.

К векторным критериям предъявляются следующие дополнительные требования:

– полнота, ввод дополнительных критериев не должен повлиять на результаты решения;

– минимальность, набор частных критериев должен быть наименьшим из всех возможных наборов, обеспечивающих оптимальный выбор.

Частный критерий $k_j(x)$ ($x \in X$, X – множество альтернатив) выбирается так, чтобы по мере улучшения решения (приближения к заданной цели) критерий монотонно увеличивался или уменьшался. Далее будем полагать, что для всех частных критериев предпочтительным является увеличение значения критерия. Чтобы воспользоваться таким предположением, достаточно изменить знак у тех критериев, уменьшение которых соответствует лучшему решению.

В простейшем случае для многокритериальных задач правило достижения лучшего решения – принцип оптимальности – можно сформулировать по аналогии с однокритериальными задачами следующим образом:

оптимальное решение задачи с векторным критерием $K = \{k_j(x)\}$ $j \in (1, 2, \dots, n)$ достигается, если все частные критерии $k_j(x)$ достигают максимума одновременно, т.е. существует такая альтернатива x^* , что $k_j(x^*) \geq k_j(x)$ для всех $x \in X$ и $j \in (1, 2, \dots, n)$, причем хотя бы для одного частного критерия имеет место строгое неравенство.

Однако подобная ситуация для реальных задач не типична. Обычно увеличение одних критериев сопровождается уменьшением других. В подобных случаях оказывается необходимым прибегнуть к некоторому компромиссу и сформулировать принцип оптимальности в следующем виде: лучшей альтернативой (оптимальным решением) считается такая альтернатива, которая хотя и не обеспечивает максимальное значение каждого критерия, но при привлечении дополнительных соображений, в том числе об относительной приоритетности частных критериев, но обеспечивает в каком-то смысле лучшее значение векторного критерия.

Таким образом, задачу с векторным критерием можно сформулировать следующим образом: требуется найти альтернативу x^* (оптимальное решение x^*), удовлетворяющую двум условиям:

- 1) $x^* \in X$, где X – множество всех возможных альтернатив;
- 2) x^* – наилучшее решение согласно принципу оптимальности, учитывающему принятую схему компромисса между частными целями.

Задачи поиска лучшего решения для трех распространенных схем компромисса можно сформулировать следующим образом.

Схема 1. Ищется альтернатива, доставляющая максимум одному, наиболее предпочтительному критерию при условии, что значения остальных критериев будут не менее некоторых заданных заранее величин – c_j .

$$k_1(x) \rightarrow \max; x \in X; k_j(x) \geq c_j; j = \overline{2, n},$$

здесь $k_1(x)$ – наиболее предпочтительный критерий;

c_j – заданное минимально допустимое значение j -го критерия.

Схема 2. Ищется альтернатива $x \in X$, на которой достигается максимум минимального частного критерия.

$$\min_j f_j(k_j(x)) \rightarrow \max_{x \in X}$$

f_j – функции, нормализующие критерии, т.е. приводящие их к единой размерности и масштабу. Нормализация необходима, если частные критерии имеют различный физический смысл и измеряются в различных единицах.

Схема 3. Строится обобщенная функция частных критериев

$$L(x) = F(k_1(x), k_2(x), \dots, k_t(x))$$

и ищется альтернатива, доставляющая максимум этой функции. Распространенной, но не обязательно лучшей, в конкретной задаче, является функция свертки вида

$$L(x) = \sum_{j=1}^n \alpha_j f_j(k_j(x)), \alpha_i > 0, \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

α_i – коэффициенты, учитывающие приоритетность частных критериев.

Здесь приведены схемы поиска решений. Алгоритм реализации этих схем должен учитывать особенности конкретной задачи и определенные условия возможности применения схемы. Так, например, в 1 необходимо вначале построить множество Парето, свертка 3 может быть использована в специально оговоренных условиях.

Часто в критерий закладываются одновременно оценки качества решения задачи и какой ценой это качество достигается (критерии вида эффективность-стоимость). Критерии должны быть, по возможности, нечувствительны к небольшим ошибкам во входной информации.

Вследствие сложности реальных задач иногда приходится прибегать к приближенным критериям, которые зачастую дают хороший результат.

Очевидно, что от вида критерия может существенно зависеть оценка относительной ценности альтернатив. Рекомендуется проводить сравнение результатов, полученных при различных критериях.

8. Окончательное определение масштаба эксперимента производится на этапе «Планирование эксперимента». Однако уже при постановке задачи необходимо оценить предполагаемый масштаб эксперимент, в том числе ограничения, которые могут возникнуть в связи с недостатком ресурсов и средств. Последние ограничения достаточно типичны для прикладных исследований и соответственно влияют на вид создаваемой модели. При разработке модели учитывается и предполагаемый характер использования модели – будет ли модель использоваться неоднократно.

Формализация задачи

Математическая постановка (формализация) задачи – создание математической модели – завершает этап постановки задачи.

Математическая модель начинается с момента, когда формулируется система аксиом, описывающая не только сам объект, но некоторую алгебру, т.е. совокупность правил, определяющих допустимые операции над объектом.

При формализации задачи должны быть определены функциональные зависимости, связывающие переменные и параметры модели.

Формализация задачи существенно зависит от знания исследуемого объекта, задачи исследования, а также вида создаваемой модели. Общего метода подбора зависимостей (отношений, функций) не существует. Чем больше функциональных зависимостей известно исследователю, чем больше он может привлечь и критически осмыслить аналогий, тем успешнее будет его деятельность по разработке модели. Полезными могут так-же оказаться, благодаря наглядности, графические представления.

Относительно просто устанавливается структура асимптотических моделей. Задача сводится к уточнению структуры модели, определению значения ее параметров и входных переменных.

В моделях ансамблей обязательной и сложной задачей является выявление изменений в свойствах подсистем при объединении их в систему.

Наибольшие трудности возникают при разработке феноменологических моделей.

На основе опыта разработки моделей предложены основные варианты (принципы) подхода к разработке моделей при различной доступности информации относительно структуры системы и протекающих в ней процессов.

Принцип 1. Система достаточно проста и прозрачна, так что ее можно обследовать и понять, например, путем наблюдения или расспросов людей, работающих с системой. Непосредственно по результатам изучения системы можно сконструировать ее модель.

Принцип 2. Если структура системы очевидна, но методы описания не ясны, можно воспользоваться сходством исследуемой системы с другой, в том числе, возможно, более простой, описание которой известно.

Принцип 3. Структура системы неизвестна, но ее можно определить путем анализа данных о функционировании системы. Фактически будет получена гипотеза о структуре, которую затем необходимо проверить экспериментально.

Принцип 4. Анализ данных о работе системы не позволяет определить влияние отдельных переменных на показатели работы системы, возникает необходимость в проведении эксперимента с целью выявления релевантных факторов и их влияния на работу системы. При этом предполагается возможность проведения соответствующего эксперимента на системе.

Принцип 5. Достаточные описательные данные о системе отсутствуют, проведение эксперимента на системе не допустимо. В этом случае может быть построена достаточно подробная модель искусственной действительности,

используемая для накопления статистики о возможном функционировании системы путем статистических испытаний гипотез о реальном мире.

Рекомендуется при создании математической модели действовать в следующем порядке:

- подыскать аналогии;
- подобрать и рассмотреть специальные примеры, характерные для решаемой задачи;
- принять решение о выборе класса (типа) модели, в том числе решить будет модель аналитической, имитационной, комбинированной;
- записать соображения, характеризующие закономерности, имеющие место в системе, при необходимости провести дополнительные исследования;
- если модель не поддается описанию, найти способы упрощения проблемы.

При определении отношений между элементами системы, а также между системой и окружающей средой необходимо точно установить причинно-следственные связи.

Различают связи:

- реактивные: система (элементы системы) реагирует на событие (при повороте выключателя – зажглась лампа);
- ответные: одно событие влечет за собой другое (стемнело – включаем освещение);
- автономные: появление события ничем непосредственно не обусловлено (зачастую это поведение человека).

Причинно-следственные связи могут быть детерминированными и вероятностными. При выявлении этих связей иногда возникают грубые (иногда преднамеренные) ошибки.

В общем случае некоторые модельные соотношения выводятся непосредственно при анализе системы, но часть соотношений принимаются без вывода и являются постулатами модели, от их качества в значительной мере зависит адекватность модели.

Постулаты имеют различное происхождение.

1. Некоторые постулаты вытекают из универсальных физических законов, в том числе законов с ограниченной областью действия.
2. Феноменологические законы – хорошо эмпирически обоснованные, но имеющие ограниченную область действия. Применение такого закона должно быть обусловлено попаданием исследуемого явления в зону действия закона.
3. Полуэмпирические законы, действенность которых зависит от условий применения. Чаще всего эти законы базируются на «слепой»

обработке экспериментальных данных. Применение подобных законов следует контролировать рациональными рассуждениями.

На этапе формализации важно правильно ограничить число степеней свободы, не «заложить» вычислительную неразрешимость задачи.

Проблема размерности существенно ограничивает возможности эффективного применения многих математических методов.

При разработке модели сложной системы очень часто полезно начать с создания «грубой» модели, в которой учитывается по возможности наименьшее число «основных» переменных и параметров. По мере уточнения подробностей относительно функционирования системы переменные и параметры можно выстроить в некоторую иерархическую последовательность. Классический пример подобной иерархии – небесная механика.

1-я грубая модель – планеты – материальные точки, подчиняющиеся законам Ньютона. Определены законы Кеплера.

2-й шаг – учитывается размер планет и движение солнца. Уточняются траектории движения всех тел.

3-й шаг – учет релятивистских эффектов.

Иногда удобно иерархию переменных связывать с масштабами переменных, например, различать переменные быстро, нормально и медленно меняющиеся. Последние на некотором временном интервале при моделировании можно «заморозить».

После получения первого варианта формализации проанализировать все допущения и уточнить математическую постановку.

Некоторые типовые проблемы, возникающие при исследовании.

Интерполяция, экстраполяция, прогнозирование

При разработке моделей часто возникает задача поиска аналитических зависимостей, близких к функциям, описывающих реальные закономерности. Простейшая задача заключается в следующем. На интервале наблюдения T в некоторые фиксированные моменты t_1, t_2, \dots наблюдаются значения функции $f(t_1), f(t_2), \dots$. Требуется восстановить ее значение в другие моменты. Пусть из каких-либо соображений известен вид функции $f(t, a_1, a_2, \dots, a_m)$, где a_1, a_2, \dots, a_m – неизвестные коэффициенты. Если коэффициенты определяются из условия совпадения $f(t)$ в точках t_1, t_2, \dots с данными наблюдений, то имеет место способ приближения, называемый интерполяцией. Ясно, что для вычисления параметров функции необходимо определенное число наблюдений (измерений) в зависимости от вида искомой функции. Так, для определения

коэффициентов полинома n -ой степени необходимо (в детерминированном случае) не менее $n+1$ наблюдений.

Если вид функций заранее неизвестен, приходится прибегать к оценке выдвигаемых гипотез о виде функции. Поскольку обычно значения функций в точках наблюдения определяются с ошибками, возникает задача наилучшего в каком-либо смысле приближения к реальной зависимости при минимальном (или заданном) числе измерений и конкретном виде (спектре) ошибок наблюдения. Проблема минимизации ошибок вычисления параметров искомой функции рассматривается в теории вероятностей. При этом необходимо учитывать наличие ошибок двух видов: систематических – следствие несовпадения выбранной аналитической функции реальной зависимости и случайных – результат ошибок единичных замеров, которые на интервале наблюдения могут иметь различный спектральный состав.

С целью снижения случайных составляющих увеличивается интервал наблюдения и количество измерений, но это далеко не всегда дает желаемый результат. Может оказаться, что на интервале наблюдения процесс не стационарен, т.е. аппроксимируемая функция на интервале наблюдения меняет свой вид, при этом появляется еще один источник систематических ошибок. Качество сглаживания случайных составляющих не однозначно связано с количеством измерений на интервале наблюдения, поскольку зависит от спектрального состава ошибок измерения. Для учета различных обстоятельств разработаны специальные алгоритмы.

Продолжение полученной в результате приближения функции за пределы интервала наблюдения называется экстраполяцией. Известно, что всякое научное представление есть экстраполяция (с наблюдаемых ситуаций на ненаблюдаемые, с измеренных величин на неизмеренные и т.д.).

Систематическое использование методов экстраполяции может служить признаком зрелости той или иной области знаний как науки. Задача экстраполяции значительно, порой принципиально, усложняется, если на интервале экстраполяции условия существования системы меняются.

Прогнозирование можно рассматривать как расширение понятия экстраполяции на общий случай существования системы в будущем, в том числе, когда условия существования системы – характер экзогенных переменных на интервале экстраполяции изменяется, что может привести к изменению целей и структуры системы. В таком случае классические методы экстраполяции – продолжение подобранной на интервале наблюдения аналитической зависимости на время экстраполяции – приводят к неверным результатам и выводам.

Задача подбора функций и отношений между экзогенными и эндогенными переменными в общем случае статистическая. Для прогноза поведения системы на заданном интервале необходима гипотеза относительно релевантных факторов, воздействующих на систему на этом интервале.

Если релевантные факторы на интервалах наблюдения и прогноза неизменны, то могут быть найдены устойчивые (неизменные для этих интервалов) зависимости – «тренды». Будет иметь место так называемое прогнозирование «от прошлого к будущему». В настоящее время темпы изменения производительных сил настолько высоки, что гипотеза о неизменности релевантных факторов, определяющих поведение системы, оказывается чаще неверной как для интервала наблюдения, так и интервала прогноза. Вместе с тем взаимосвязь систем в мире стала столь тесной, что состояние и развитие конкретной системы невозможно рассматривать вне этих связей. Вероятностные связи усложнились, вид и число неопределенностей возросли. В этих условиях потребовалось перейти к так называемому прогнозированию «от настоящего к будущему». При этом в результате наблюдения системы отправными для прогноза полагаются значения параметров системы в конце интервала наблюдения – текущие значения. Для прогноза изменения параметров в будущем выдвигаются гипотезы относительно окружающей среды, релевантных факторов, влияющих на поведение системы, экзогенных переменных, реализующих это влияние. Прогноз имеет вариантный характер, и только в лучшем случае удастся выявить все возможные варианты развития системы и дать им вероятностные оценки.

Линейность и нелинейность

Приведем некоторые высказывания, предостерегающие от необоснованного пренебрежения нелинейностями.

«Мир, в котором мы живем, удивительно нелинеен. Конечно, это делает нашу жизнь сложнее, но зато интереснее, перспективнее, освобождает нас от чувства монотонности, вселяет в нас оптимизм. Ловушкой при математическом моделировании является пристрастие человека к линейности. Это особенно проявляется в тех случаях, когда соответствующие гипотезы и допущения сформулированы заранее. Представление о линейности мира привело к тому, что большинство аналитических методов, которым отдавалось предпочтение в прошлом, основано на использовании линейных систем уравнений. Ошибки и искажения возникают часто исключительно по этой причине».

Необходимо помнить эти предостережения. В то же время следует иметь в виду, что методы исследования линейных систем очень развиты и

обоснованное применение линейной модели для нелинейной системы часто оказывается весьма эффективным. Линейная модель полезна в начале цепочки моделей, последовательно приближающихся к модели с требуемой адекватностью. Линейная модель часто позволяет сразу получить оценку порядка значений выходных переменных. Иногда нелинейную задачу удается просто свести к последовательности линейных моделей. Линеаризацией нелинейной задачи (например, методом «замораживания коэффициентов») можно получить линейную модель для достаточно корректной оценки воздействия на систему малых возмущений.

Вопрос о возможности и целесообразности перехода от нелинейности к линейности решается в каждой задаче конкретно на рациональном уровне.

Дискретность и непрерывность

Вне зависимости от характера исследуемой системы может оказаться более предпочтительной дискретная или непрерывная модель. Для исследования сложных систем зачастую требуется создание аналого-цифровой модели. Решение о дискретности или непрерывности модели принимается на этапе постановки задачи также на рациональном уровне.

Детерминированность и случайность

Все реальные процессы носят в той или иной степени стохастический характер. При решении одних задач случайные составляющие практически не влияют на результат и в модели не учитываются. В других задачах решение может быть получено только при учете случайных составляющих или различных неопределенностей и соответствующие математические методы закладываются в модель. Достаточность детерминированной модели или необходимость создания стохастической модели иногда очевидна, иногда переход к стохастической модели происходит вследствие неудовлетворенности результатами, полученными на детерминированной модели.

Планирование эксперимента

При планировании экспериментов ставится задача обеспечить достижение цели исследования при минимальных затратах ресурсов всех видов. Трудности получения необходимой достоверности результатов связана

с наличием помех различного рода, в том числе ошибок измерения входной информации.

При планировании вычислительного эксперимента необходимо, как минимум, определить область существования параметров и переменных, оценить хотя бы качественно или грубо количественно влияние изменения всех параметров и переменных на исходы модели и выбранные критерии качества решения задачи, подобрать примеры для анализа зависимостей исходов модели от параметров модели и входных переменных. Если модель статистическая, необходимо принять решение о том, как будет задаваться входная информация и порядок обработки исходов. С учетом этих соображений разрабатывается методика проведения эксперимента, включающая порядок проведения частных экспериментов и количество испытаний в каждом частном эксперименте, порядок обработки результатов, способы контроля течения эксперимента и порядок его корректировки в зависимости от промежуточных и конечных результатов.

Различают стратегическое и тактическое планирование.

Стратегическое планирование имеет целью создание общего плана эксперимента, экономного с точки зрения потребных ресурсов и соответственно предусматривающего разумную последовательность частных экспериментов и промежуточных проверок, а также создание структурной основы для обучения самого исследователя.

Тактическое планирование связано с решением задач двух типов:

- 1) определение начальных условий в той мере, в какой они влияют на достижение установившегося режима, минимизацию потерь на переходной режим;
- 2) минимизация дисперсии исходов при одновременном уменьшении, по возможности, объема выборок.

В теории планирования эксперимента модельные переменные разделяются на «факторы» и «отклики». Термин «фактор» эквивалентен терминам «входная переменная», «экзогенная переменная», а «отклик» – терминам «зависимая переменная», «выходная переменная», «эндогенная переменная». Планирование экспериментов получило вначале распространение в биологии, сельском хозяйстве, где термины «отклик», «фактор» были понятны практикам.

Несмотря на развитую теорию планирования экспериментов, наиболее полное достижение целей планирования в значительной степени зависит от наличия соответствующего опыта у исследователя, так как планирование эксперимента в какой-то мере является искусством.

Проверка модели

Модель необходимо проверять (испытывать) постоянно с момента ее создания до получения требуемого результата. До начала эксперимента модель необходимо испытать в целом, что является последним этапом разработки модели.

Испытание проводится с целью:

1) выявления правдоподобия модели в 1-м приближении, «качественно», чтобы убедиться, что модель ведет себя, как и предполагалось, т.е. существует качественное соответствие между поведением моделируемой системы и модели, в том числе совпадают порядок их исходов, а также поведение и результаты в «крайних» ситуациях;

2) проверки количественной адекватности – точности преобразования информации, что достигается калибровкой модели. Калибровкой модели называется определение (уточнение) коэффициентов модели – коэффициентов отношений, связывающих экзогенные и эндогенные переменные модели. Калибровка осуществляется путем сравнения результатов, полученных на моделях, с результатами, получаемыми при испытаниях реальной системы, или с результатами аналитических расчетов, для чего используются эталонные примеры и задачи. Модель системы в целом проверяется так называемыми эталонными задачами, охватывающими все свойства модели. Однако целесообразно структурировать задачу – построить такую совокупность примеров, чтобы с помощью одного примера охватить только какую-то часть модельных зависимостей и определить часть коэффициентов.

Одной из задач испытания является проверка модели на чувствительность, т.е. насколько исходы модели чувствительны к изменению входных переменных.

В общем случае испытание и калибровка модели – задача статистическая, т.е. задача проблемного анализа – формирования статистически значимых выводов на основе данных, полученных на модели. При испытаниях широко применяются такие статистические методы, как регрессионный, корреляционный и дисперсионный анализы. Важно помнить, что статистические методы могут привести к неверным результатам, если исследователь не имеет ясного представления о моделируемой системе и характеристиках используемой информации. Для обеспечения адекватности модели предусматриваются при ее разработке и эксплуатации следующие виды контроля:

1) контроль размерностей: сравниваться и складываться могут только величины одинаковой размерности;

- 2) контроль порядков: выделение основных и уточняющих слагаемых;
- 3) контроль характера зависимостей между переменными: выявление качественного совпадения вида модельных зависимостей с видом аналогичных зависимостей в реальной системе;
- 4) контроль экстремальных ситуаций: в подобных ситуациях поведение модели должно совпадать с поведением системы в аналогичных ситуациях (поведение системы в экстремальных ситуациях часто легко оценивается);
- 5) контроль граничных условий: на границе функции должны принимать определенные значения;
- 6) контроль математической замкнутости: выяснение имеет ли задача решение в том виде как она записана в модели;
- 7) контроль устойчивости модели;
- 8) контроль соответствия значений переменных их физическому смыслу: знаки и величины переменных модели не должны противоречить возможным значениям моделируемых физических величин.

Поскольку испытания моделей сложных систем связаны с существенными затратами, необходимо к планированию испытаний относиться предельно строго.

Результаты испытаний, в конечном счете, должны обеспечить необходимый уровень адекватности модели на всех этапах ее использования. При обоснованном выборе тестовых примеров и эталонных задач эта задача решается при минимальных затратах средств и ресурсов.

3.11. Анализ результатов и внедрение рекомендаций

Целью анализа результатов вычислительного эксперимента является выяснение, решена ли поставленная задача на должном уровне корректности, и формулировка выводов (рекомендаций), вытекающих из результатов исследований.

При анализе результатов необходимо:

- 1) убедиться, что результаты эксперимента полностью понятны, как качественно, т.е. не противоречат здравому смыслу, так и количественно. Если здравый смысл не согласуется с исходами эксперимента, необходимо его «поправить», т.е. попытаться объяснить полученные исходы. Если это не удастся, следует запланировать дополнительные исследования для уяснения и подтверждения результатов;
- 2) вернуться к сделанным допущениям. Уточнить возможные влияния допущения на результат. При необходимости также провести дополнительные эксперименты;

3) оценить точность полученных результатов. Если подобные оценки заранее не были запланированы, следует их сделать. Убедиться, что точность результатов достаточна для выработки рекомендаций, принятия решения.

При трактовке результатов опираться в возможно максимальной степени на идею «соревнования моделей» (использование моделей различного типа и сравнение исходов этих моделей), в том числе на сравнение исходов «точных» моделей с результатами «грубых» аналитических расчетов.

Анализ результатов моделирования может завершиться выработкой рекомендаций по существу решаемой задачи, однако возможна неудовлетворенность результатами и подготовка предложений по проведению дополнительных испытаний или уточнению модели. Не исключается и вывод о непригодности модели вследствие ее неадекватности исследуемой системе или невозможности проведения на модели необходимого для получения обоснованных выводов объема испытаний. Все результаты анализа должны представляться в удобном для использования виде. Главное, о чем необходимо помнить, что при моделировании исследуется реальная система, т.е. модель не самоцель.

Внедрение принятых рекомендаций, полученных на модели, должно происходить при участии лиц, проводивших модельный эксперимент. Только в процессе реализации рекомендаций становится до конца ясным, насколько адекватной была модель, насколько корректно был проведен вычислительный эксперимент и обоснованы рекомендации. И только при участии исследователей возможно наиболее грамотно реализовать рекомендации, убедиться в их справедливости, а в противном случае своевременно выявить недостаточность или ошибочность рекомендаций и ввести необходимые коррективы. Процесс реализации рекомендаций должен быть управляемым, для чего необходимо предусмотреть оперативную обратную связь. Запланированное участие исследователей в реализации полученных рекомендаций обеспечит более ответственное отношение всех лиц, участвующих в исследовании, к организации исследований.

Использование ЭВМ в моделях.

В математических моделях используются цифровые ЭВМ, аналоговые ЭВМ, комбинированные (гибридные) вычислительные комплексы.

В цифровых ЭВМ все величины записываются в цифровом виде. Точность таких ЭВМ зависит главным образом от объема регистров памяти, количества значащих числовых разрядов и выбранных вычислительных методов. Время решения сложной задачи зависит от сложности задачи и

требуемой точности решения. Данные могут храниться в памяти цифровых ЭВМ неограниченное время. Успешно реализуются в цифровых ЭВМ различные логические операции. Трудности применения цифровых ЭВМ связаны с тем, что в сложных задачах не всегда удастся получить адекватную цифровую модель, а иногда, когда такую модель получить можно, ее использование потребует недопустимо большого времени.

Область успешного применения цифровых ЭВМ непрерывно по мере совершенствования вычислительной техники расширяется. Например, длительное время в качестве недостатка таких ЭВМ отмечалась невозможность одновременного выполнения нескольких операций. Этот недостаток устранен созданием параллельно работающих вычислителей.

В аналоговых ЭВМ возможно выполнение операций в реальном масштабе времени, простое подключение к модели реальной аппаратуры.

Точность аналоговых моделей ограничена качеством компонент электрических элементов модели. Имеются также ограничения в части возможностей накопления и хранения информации и моделирования логических операций.

В гибридных ЭВМ появляется возможность объединения преимуществ цифровых и аналоговых ЭВМ. На аналогово-цифровых комплексах можно анализировать сложнейшие системы, решать задачи синтеза систем, поиска оптимальных управлений, относительно просто обеспечивается включение в модель реальной системы или ее подсистем.

Примером использования ЭВМ для решения весьма сложных задач может служить вычислительный комплекс, названный имитационной системой (ИС), который был создан в 70-е годы в ВЦ АН СССР. Использование подобного комплекса позволило коллективу исследователей под руководством академика Н.Н.Моисеева получить оценку последствий одновременного подрыва большего числа ядерных зарядов.

ИС включает следующие три части:

- 1) имитационную модель системы (процесса) вместе с программой (совокупностью программ), реализуемых на ЭВМ;
- 2) внешнее математическое обеспечение ИС – совокупность упрощенных моделей системы (процесса) или ее отдельных частей и алгоритмов, позволяющих решать задачи оптимизации и выбора управлений;
- 3) внутреннее математическое обеспечение ИС – совокупность программ, реализующих в должной степени удобство общения с ЭВМ в процессе проведения эксперимента.

Приведенный состав ИС следует, очевидно, полагать обязательным для моделей, создаваемых для решения наиболее сложных задач.

Успешное применение ЭВМ в управлении социально-экономическими системами в настоящее время сдерживается из-за непонимания со стороны управленцев возможностей ЭВМ по решению сложных задач и неумения подобные задачи осмыслить и поставить для решения на ЭВМ.

Определенные достижения имеют место в автоматизации рутинных расчетов, ранее выполняемых вручную, например, в бухгалтерии, при создании информационно-справочных систем различного назначения, в издательском деле, в ряде случаев при планировании и контроле различных аспектов производственной деятельности.

Измерительные шкалы

При проведении исследований всегда необходимо точно представлять, какая измерительная шкала может быть использована при измерении (оценке) наблюдаемых величин (явлений, процессов, объектов).

Измерение – это операция, которая ставит в соответствие наблюдаемому явлению определенные обозначения: числа, номера, символы. При этом должны быть соблюдены следующее условие: различным состояниям явления соответствуют различные обозначения, не различным – одинаковые.

В зависимости от вида (характера) измеряемого явления используются следующие шкалы:

1. Шкала наименований (номинальная, классификационная).

Существует конечное число классов эквивалентности явлений (объектов). Каждому классу присваивается свое обозначение. Измерение заключается в определении, к какому классу относится объект. Возможна иерархия классов. Характерный пример иерархии классов – почтовые адреса. Данные в номинальных шкалах – всегда только символы, если это даже цифры. Единственная допустимая операция – проверка совпадения, для чего введен символ Кронекера – δ_{ij} .

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i = x_j \\ 0, & \text{если } x_i \neq x_j \end{cases}, \text{ где } x_i, x_j - \text{разные измерения.}$$

На этой основе возможны более сложные операции:

- количество совпадений: $n_i = \sum_j \delta_{ij}$;
- относительная частота класса: $\rho_i = \frac{n_i}{n}$ здесь n – общее число измерений;
- различные статистические процедуры.

2. Порядковые (ранговые) шкалы.

Используются для сравнения объектов, классов по каким-либо признакам, качествам. Пример – шкала родственных отношений:

отец = мать > сын = дочь;

дядя = тетя < брат = сестра.

В порядковых шкалах справедливо:

если $A > B$, то $B < A$;

если $A > B$, $B > C$, то $A > C$.

Понятия дистанции между шкалами нет. Для сравнения вводится ранг R_i – ранг i -го объекта:

$$R_i = \sum_{j=1}^{n-1} c(x_i - x_j)$$

Используется также и символ Кронекера.

3. Модифицированные ранговые шкалы.

Эти шкалы имеют место при арифметизации качественных измерений.

Примеры таких шкал.

а) Шкала твердости по Мозесу.

1 – тальк, 2 – гипс, 3 – кальций, 4 – флюорит, 5 – апатит, 6 – ортоклаз, 7 – кварц, 8 – топаз, 9 – корунд, 10 – алмаз. Это не значит, что разность по твердости между корундом и алмазом такая же, как, например, между тальком и гипсом.

б) Шкала силы ветра по Бофорту.

в) Шкала землетрясений по Рихтеру.

г) Бальные шкалы оценки знаний.

д) Порядковые шкалы Акоффа-Черчмена для упорядочения альтернатив с учетом силы предпочтения.

4. Шкалы интервалов.

Проводится упорядочение объектов с точностью до интервалов между ними. Единицы измерений произвольны, но постоянны по всей шкале, т.е. при произвольном выборе 0 и 1 справедливо $\frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} = \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2}$, Δx_1 и Δx_2 – расстояния между объектами в одной шкале, а Δy_1 и Δy_2 – расстояния между теми же объектами в другой шкале.

Таким образом, связь между шкалами линейная:

$$y = ax + b, \quad a > 0, \quad -\infty < b < +\infty.$$

Имеют смысл только действия над интервалами, а не над отсчетами шкал. Возможны любые арифметические операции. При статистических оценках центральные моменты имеют смысл, а начальные – нет, поэтому не имеет смысла и коэффициент вариации.

5. Шкалы отношений.

Измерения являются полноправными числами. 0 – единственный.

Для двух шкал отношений справедливо $\frac{x_1}{x_2} = \frac{y_1}{y_2}$, где x_1 и x_2 измерения в одной шкале, а y_1 и y_2 – измерения тех же величин в другой шкале. Соответственно справедливо: $y = ax$, $a > 0$.

Примеры: шкалы измерения длин, весов, денег.

6. Шкалы разностей (периодические, циклические).

Шкалы инвариантны к сдвигу на некоторую постоянную (период). Справедливо, что $y = x + b$, b – постоянная величина. 0 здесь условен, иначе это шкала интервалов. При вводе условного нуля возможны арифметические действия.

Примеры: шкалы часов, компаса.

7. Абсолютная шкала.

0 и 1 зафиксированы. Единица измерения безразмерна. Эта числовая шкала может быть как самостоятельной, так и вспомогательной для других шкал.

8. Шкалы размытых множеств.

Размытое множество A – это совокупность упорядоченных пар вида $A = \{x, \mu A(x)\}$, где $\mu A(x)$ – функция принадлежности x множеству A , $0 \leq \mu A(x) \leq 1$.

Для уяснения особенностей построения шкал размытых множеств необходимо обратиться к алгебре размытых множеств, а для построения самих шкал нужно ввести ряд дополнительных определений.

Перевод полученных измерений в другую, более сильную шкалу возможен, но требует аккуратности.

Раздел 5. Принципы и закономерности исследования и моделирования систем.

Закономерности взаимодействия части и целого. Закономерности иерархической упорядоченности систем. Закономерности осуществимости систем. Закономерности развития систем. Закономерности возникновения и формулирования целей.

Закономерности взаимодействия части и целого

Целостность/эмерджентность

Закономерность целостности/эмерджентности проявляется в системе в появлении у нее новых свойств, отсутствующих у элементов.

Для того чтобы глубже понять закономерность целостности, необходимо, прежде всего, учитывать две ее стороны:

1. свойства системы (целого) Q_s не является простой суммой свойств составляющих ее элементов (частей): $Q_s \neq \sum Q_i$
2. свойства системы (целого) зависят от свойств составляющих ее элементов (частей): $Q_s = f(q_i)$

Кроме этих двух основных сторон, следует иметь в виду, что объединенные в систему элементы, как правило, утрачивают часть своих свойств, присущих им вне системы, т.е. система как бы подавляет ряд свойств элементов. Но, с другой стороны, элементы, попав в систему, могут приобрести новые свойства.

Обратимся к закономерности, двойственной по отношению к закономерности целостности. Ее называют физической аддитивностью, независимостью, суммативностью, обособленностью. Свойство физической аддитивности проявляются у системы, как бы распавшейся на независимые элементы; тогда становится справедливым

$$Q_s = \sum Q_i$$

В этом крайнем случае и говорить о системе уже нельзя.

Рассмотрим промежуточные варианты – две сопряженные закономерности, которые можно назвать прогрессирующей факторизацией – стремлением системы к состоянию с все более независимыми элементами, и прогрессирующей систематизацией – стремлением системы к уменьшению самостоятельности элементов, т. е. к большей целостности.

Интегративность

Этот термин часто употребляется как синоним целостности. Однако некоторые исследователи выделяют эту закономерность как самостоятельную, стремясь подчеркнуть интерес не к внешним факторам проявления целостности, а к более глубоким причинам, обуславливающим возникновение этого свойства, к факторам, обеспечивающим сохранение целостности.

Интегративными называют системообразующие, системосохраняющие факторы, в числе которых важную роль играют неоднородность и противоречивость элементов (исследуемые большинством философов), с одной стороны, и стремление их вступать в коалиции – с другой.

Закономерности взаимодействия части и целого	Степень целостности α	Коэффициент использования элементов β
Целостность/эмерджентность	1	0
Прогрессирующая систематизация	$\alpha > \beta$	
Прогрессирующая факторизация	$\alpha < \beta$	
Аддитивность (суммативность)	0	1

Закономерности иерархической упорядоченности систем

Эта группа закономерностей характеризует и взаимодействие системы с ее окружением – со средой (значимой или существенной для системы), надсистемой, подчиненными системами.

Коммуникативность

Эта закономерность составляет основу определения системы, где система не изолирована от других систем, она связана множеством коммуникаций со средой, представляющей собой, в свою очередь, сложное и неоднородное образование, содержащее надсистему (метасистему – систему более высокого порядка, задающую требования и ограничения исследуемой системе), подсистемы (нижележащие, подведомственные системы), и системы одного уровня с рассматриваемой.

Такое сложное единство со средой названо закономерностью коммуникативности, которая, в свою очередь легко помогает перейти к иерархичности как закономерности построения всего мира и любой выделенной из него системы.

Иерархичность

Закономерности иерархичности или иерархической упорядоченности были в числе первых закономерностей теории систем, которые выделил и исследовал Л. фон. Берталанфи.

Необходимо учитывать не только внешнюю структурную сторону иерархии, но и функциональные взаимоотношения между уровнями. Например, в биологических организациях более высокий иерархический уровень оказывает направляющее воздействие на нижележащий уровень, подчиненный ему, и это воздействие проявляется в том, что подчиненные члены иерархии приобретают новые свойства, отсутствовавшие у них в изолированном состоянии (подтверждение положения о влиянии целого на элементы, приведенного выше), а в результате появления этих новых свойств формируется новый, другой «облик целого» (влияние свойств элементов на целое). Возникшее таким образом новое целое приобретает способность осуществлять новые функции, в чем и состоит цель образования иерархий.

Выделим основные особенности иерархической упорядоченности с точки зрения полезности их использования в качестве моделей системного анализа:

1. В силу закономерности коммуникативности, которая проявляется не только между выделенной системой и ее окружением, но и между уровнями иерархии исследуемой системы, каждый уровень иерархической упорядоченности имеет сложные взаимоотношения с вышестоящим и

нижележащим уровнями. По метафорической формулировке, каждый уровень иерархии обладает свойством «двуликого Януса»: «лик», направленный в сторону нижележащего уровня, имеет характер автономного целого (системы), а «лик», направленный к узлу (вершине) вышестоящего уровня, проявляет свойства зависимой части (элемента вышестоящей системы). Эта конкретизация закономерности иерархичности объясняет неоднозначность использования в сложных организационных системах понятий «система» и «подсистема», «цель» и «средство» (элемент каждого уровня иерархической структуры целей выступает как цель по отношению к нижележащим и как «подцель», а начиная с некоторого уровня, и как «средство» по отношению к вышестоящей цели), что часто наблюдается в реальных условиях и приводит к некорректным терминологическим спорам.

2. Важнейшая особенность иерархической упорядоченности как закономерности заключается в том, что закономерность целостности/эмерджентности (т.е. качественные изменения свойств компонентов более высокого уровня по сравнению с объединяемыми компонентами нижележащего) проявляется в ней на каждом уровне иерархии. При этом объединение элементов в каждом узле иерархической структуры приводит не только к появлению новых свойств у узла и утрате объединяемыми компонентами свободы проявления некоторых своих свойств, но и к тому, что каждый подчиненный член иерархии приобретает новые свойства, отсутствовавшие у него в изолированном состоянии.

Закономерности осуществимости систем.

Проблема осуществимости систем является наименее исследованной. Рассмотрим некоторые из закономерностей, помогающие понять эту проблему и учитывать ее при определении принципов проектирования и организации функционирования систем управления.

Эквифинальность

Эта закономерность характеризует как бы предельные возможности системы. Л. фон Берталанфи, предложивший этот термин, определил эквифинальность как «способность в отличие от состояния равновесия в закрытых системах, полностью детерминированных начальными условиями,...достигать не зависящего от времени состояния, которое не зависит от ее начальных условий и определяется исключительно параметрами системы».

В соответствии с данной закономерностью система может достигнуть требуемого конечного состояния, не зависящего от времени и определяемого

исключительно собственными характеристиками системы при различных начальных условиях и различными путями. Это форма устойчивости по отношению к начальным и граничным условиям.

Закон «необходимого разнообразия»

На необходимость учитывать предельную осуществимость системы при создании впервые в теории систем обратил внимание У.Р. Эшби. Он сформулировал закономерность, известную под названием закон «необходимого разнообразия».

Для задач принятия решений наиболее важным является одно из следствий этой закономерности, которое можно упрощенно пояснить на следующем примере.

Когда исследователь (ЛПР – лицо, принимающее решение, наблюдатель) N сталкивается с проблемой D , решение которой для него неочевидно, то имеет место некоторое разнообразие возможных решений V_d . Этому разнообразию противостоит разнообразие мыслей исследователя (наблюдателя) V_n . Задача исследователя заключается в том, чтобы свести разнообразие $V_d - V_n$ к минимуму, в идеале – к 0.

Эшби доказал теорему, на основе которой формулируется следующий вывод: «Если V_d дано постоянное значение, то $V_d - V_n$ может быть уменьшено лишь за счет соответствующего роста V_n . только разнообразие в N может уменьшить разнообразие, создаваемое в D ; только разнообразие может уничтожить разнообразие».

Применительно к системам управления закон «необходимого разнообразия» может быть сформулирован следующим образом: разнообразие управляющей системы (системы управления) V_{su} должно быть больше (или, по крайней мере, равно) разнообразию управляемого объекта V_{ou} :

$$V_{su} > V_{ou}.$$

Возможны следующие пути совершенствования управления при усложнении производственных процессов:

1. увеличение V_{su} , что может быть достигнуто путем роста численности аппарата управления, повышения его квалификации, механизации и автоматизации управленческих работ;

2. уменьшение V_{ou} , за счет установления более четких и определенных правил поведения компонентов системы: унификация, стандартизация, типизация, введение поточного производства, сокращение номенклатуры деталей, узлов, технологической оснастки и т.п.;

3. снижение уровня требований к управлению, т.е. сокращение числа постоянно контролируемых и регулируемых параметров управляемой системы;

4. самоорганизация объектов управления путем ограничения контролируемых параметров с помощью создания саморегулирующихся подразделений (цехов, участков с замкнутым циклом производства, с относительной самостоятельностью и ограничением вмешательства централизованных органов управления предприятием и т.п.).

Закономерности развития систем

В последнее время все больше начинает осознаваться необходимость учета при моделировании систем принципов их изменения во времени, для понимания которых могут помочь рассматриваемые ниже закономерности.

Историчность

Хотя, казалось бы, очевидно, что любая система не может быть неизменной, что она не только возникает, функционирует, развивается, но и погибает, и каждый легко может привести примеры становления, расцвета, упадка (старения) и даже смерти (гибели) биологических и социальных систем, все же для конкретных случаев развития организационных систем и сложных технических комплексов трудно определить эти периоды. Не всегда руководители организаций и конструкторы технических систем учитывают, что время является неременной характеристикой системы, что каждая система подчиняется закономерности историчности, и что эта закономерность – такая же объективная, как целостность, иерархическая упорядоченность и др.

При этом закономерность историчности можно учитывать не только пассивно, фиксируя старение, но и использовать для предупреждения «смерти» системы, разрабатывая «механизмы» реконструкции, реорганизации системы для сохранения ее в новом качестве.

Закономерность самоорганизации

В числе основных особенностей самоорганизующихся систем с активными элементами названы способность противостоять энтропийным (энтропия в данном случае – степень неопределенности, непредсказуемости состояния системы и внешней среды) тенденциям, способность адаптироваться к изменяющимся условиям, преобразуя при необходимости свою структуру и т.п. В основе этих внешне проявляющихся способностей лежит более глубокая закономерность, базирующаяся на сочетании в любой реальной развивающейся системе двух противоречивых тенденций: с одной стороны, для всех явлений, в том числе и для развивающихся, открытых систем справедлив второй закон термодинамики («второе начало»), т.е. стремление к возрастанию энтропии; а с другой стороны, наблюдаются

негэнтропийные (противоположные энтропийным) тенденции, лежащие в основе эволюции.

Важные результаты в понимании закономерности самоорганизации получены в исследованиях, которые относят к развивающейся науке, называемой синергетикой.

Синергетикой называют междисциплинарное научное направление, изучающее универсальные закономерности процессов самоорганизации, эволюции и кооперации. Ее цель состоит в построении общей теории сложных систем, обладающих особыми свойствами. В отличие от простых, сложные системы имеют следующие основные характеристики:

- множество неоднородных компонентов;
- активность (целенаправленность) компонентов;
- множество различных, параллельно проявляющихся взаимосвязей между компонентами;
- семиотическая (слабоформализуемая) природа взаимосвязей;
- кооперативное поведение компонентов;
- открытость;
- распределенность;
- динамичность, обучаемость, эволюционный потенциал;
- неопределенность параметров среды.

Особое место в синергетике занимают вопросы спонтанного образования упорядоченных структур различной природы в процессах взаимодействия, когда исходные системы находятся в неустойчивых состояниях. Следуя ученому И.Пригожину, ее можно кратко охарактеризовать как «комплекс наук о возникающих системах».

Согласно синергетическим моделям, эволюция системы сводится к последовательности неравновесных фазовых переходов. Принцип развития формулируется как последовательное прохождение критических областей (точек бифуркаций (раздвоения, разветвления)). Вблизи точек бифуркации наблюдается резкое усиление флуктуации (от лат. *fluctuatio* – колебание, отклонение). Выбор, по которому пойдет развитие после бифуркации, определяется в момент неустойчивости. Поэтому зона бифуркации характеризуется принципиальной непредсказуемостью – неизвестно, станет ли дальнейшее развитие системы хаотическим или родится новая, более упорядоченная структура. Здесь резко возрастает роль неопределенности: случайность на входе в неравновесной ситуации может дать на выходе катастрофические последствия. В то же время, сама возможность спонтанного

возникновения порядка из хаоса – важнейший момент процесса самоорганизации в сложной системе.

Главные принципы синергетического подхода в современной науке таковы:

1. Принцип дополнительности Н. Бора. В сложных системах возникает необходимость сочетания различных, ранее казавшихся несовместимыми, а ныне взаимодополняющих друг друга моделей и методов описания.

2. Принцип спонтанного возникновения И. Пригожина. В сложных системах возможны особые критические состояния, когда малейшие флуктуации могут внезапно привести к появлению новых структур, полностью отличающихся от обычных (в частности, это может вести к катастрофическим последствиям – эффекты «снежного кома» или эпидемии).

3. Принцип несовместимости Л. Заде. При росте сложности системы уменьшается возможность ее точного описания вплоть до некоторого порога, за которым точность и релевантность (смысловая связанность) информации становятся несовместимыми, взаимно исключающими характеристиками.

4. Принцип управления неопределенностями. В сложных системах требуется переход от борьбы с неопределенностями к управлению неопределенностями. Различные виды неопределенности должны преднамеренно вводиться в модель исследуемой системы, поскольку они служат фактором, благоприятствующим инновациям (системным мутациям).

5. Принцип незнания. Знания о сложных системах принципиально являются неполными, неточными и противоречивыми: они обычно формируются не на основе логически строгих понятий и суждений, а исходя из индивидуальных мнений и коллективных идей. Поэтому в подобных системах важную роль играет моделирование частичного знания и незнания.

6. Принцип соответствия. Язык описания сложной системы должен соответствовать характеру располагаемой о ней информации (уровню знаний или неопределенности). Точные логико-математические, синтаксические модели не являются универсальным языком, также важны нестрогие, приближенные, семиотические модели и неформальные методы. Один и тот же объект может описываться семейством языков различной жесткости.

7. Принцип разнообразия путей развития. Развитие сложной системы многовариантно и альтернативно, существует «спектр» путей ее эволюции. Переломный критический момент неопределенности будущего развития сложной системы связан с наличием зон бифуркации – «разветвления» возможных путей эволюции системы.

8. Принцип единства и взаимопереходов порядка и хаоса. Эволюция сложной системы проходит через неустойчивость; хаос не только

разрушителен, но и конструктивен. Организационное развитие сложных систем предполагает своего рода конъюнкцию порядка и хаоса.

9. Принцип колебательной (пульсирующей) эволюции. Процесс эволюции сложной системы носит не поступательный, а циклический или волновой характер: он сочетает в себе дивергентные (рост разнообразия) и конвергентные (свертывание разнообразия) тенденции, фазы зарождения порядка и поддержания порядка. Открытые сложные системы пульсируют: дифференциация сменяется интеграцией, разбегание – сближением, ослабление связей – их усилением и т. п.

Нетрудно понять, что перечисленные принципы синергетической методологии можно разбить на три группы: принципы сложности (1-3), принципы неопределенности (3-6) и принципы эволюции (7-9).

Закономерности возникновения и формулирования целей.

Обобщение результатов исследований процессов целеобразования, проводимых философами, психологами, кибернетиками, и наблюдение процессов обоснования и структуризации целей в конкретных условиях позволили сформулировать некоторые общие принципы, закономерности, которые полезно использовать на практике.

Зависимость представления о цели и формулировки цели от стадии познания объекта (процесса) и от времени

Анализ определений понятия «цель» позволяет сделать вывод о том, что, формулируя цель нужно стремиться отразить в формулировке или в способе представления цели основное противоречие: ее активную роль в познании, в управлении, и в то же время необходимость сделать ее реалистичной, направить с ее помощью деятельность на получение определенного полезного результата. При этом формулировка цели и представление о цели зависит от стадии познания объекта, и по мере развития представления о нем цель может переформулироваться.

Зависимость цели от внешних и внутренних факторов.

При анализе причин возникновения и формулирования целей нужно учитывать, что на цель влияют как внешние по отношению к системе факторы (внешние требования, потребности, мотивы, программы), так и внутренние факторы (потребности, мотивы, программы самой системы и ее элементов, исполнителей цели); при этом последние являются такими же объективно влияющими на процесс целеобразования факторами, как и внешние (особенно при использовании в системах управления понятия цели как средства побуждения к действию).

Проявление в структуре целей закономерности целостности

В иерархической структуре закономерность целостности (эмерджентности) проявляется на любом уровне иерархии. Применительно к структуре целей это означает, что, с одной стороны, достижение цели вышестоящего уровня не может быть полностью обеспечено достижением подчиненных ей подцелей, хотя и зависит от них, а, с другой стороны, потребности, программы (как внешние, так и внутренние) нужно исследовать на каждом уровне структуризации, и получаемые разными ЛПР расчленения подцелей в силу различного раскрытия неопределенности могут оказаться разными, т.е. разные ЛПР могут предложить разные иерархические структуры целей и функций, даже при использовании одних и тех же принципов структуризации и методик.

Закономерности формирования иерархических структур целей

Учитывая, что наиболее распространенным способом представления целей в системах организационного управления являются древовидные иерархические структуры («деревья целей»), рассмотрим основные рекомендации по их формированию:

- приемы, применяющиеся при формировании древовидных иерархий целей, можно свести к двум подходам: а) формирование структур «сверху» – методы структуризации, декомпозиции, целевой или целенаправленный подход, б) формирование структур целей «снизу» – морфологический, лингвистический, тезаурусный, терминальный подход; на практике обычно эти подходы сочетаются;
- цели нижележащего уровня иерархии можно рассматривать как средства для достижения целей вышестоящего уровня, при этом они же являются целями для уровня нижележащего по отношению к ним;
- в иерархической структуре по мере перехода с верхнего уровня на нижний происходит как бы смещение рассмотренной выше «шкалы» от цели-направления (цели-идеала, цели-мечты) к конкретным целям и функциям, которые на нижних уровнях структуры могут выражаться в виде ожидаемых результатов конкретной работы с указанием критериев оценки ее выполнения, в то время как на верхних уровнях иерархии указание критериев может быть либо выражено в общих требованиях (например, «повысить эффективность»), либо вообще не приводится в формулировке цели;
- для того чтобы структура целей была удобной для анализа и организации управления, к ней рекомендуется предъявлять некоторые требования – число уровней иерархии и число компонентов в каждом узле должно быть (в силу гипотезы Миллера или числа Колмогорова) $K = 5 \pm 2$ (предел восприятия человеком).

И еще несколько важных законов.

Закон простоты сложных систем – Реализуется, выживает, отбирается тот вариант сложной системы, который обладает наименьшей сложностью.

Закон простоты сложных систем реализуется природой в ряде конструктивных принципов:

- Оккама,
- иерархического модульного построения сложных систем,
- симметрии,
- симморфоза (равнопрочности, однородности),
- полевого взаимодействия (взаимодействия через носитель),
- экстремальной неопределенности (функции распределения характеристик и параметров, имеющих неопределенные значения, имеют экстремальную неопределенность).

Закон конечности скорости распространения взаимодействия – Все виды взаимодействия между системами, их частями и элементами имеют конечную скорость распространения. Ограничена также скорость изменения состояний элементов системы. Автором закона является А.Эйнштейн.

Теорема Геделя о неполноте – В достаточно богатых теориях (включающих арифметику) всегда существуют недоказуемые истинные выражения. Поскольку сложные системы включают в себя (реализуют) элементарную арифметику, то при выполнении вычислений в ней могут возникнуть тупиковые ситуации (зависания).

Закон эквивалентности вариантов построения сложных систем – С ростом сложности системы доля вариантов ее построения, близких к оптимальному варианту, растет.

Закон Онсагера максимизации убывания энтропии – Если число всевозможных форм реализации процесса, согласных с законами физики, не единственно, то реализуется та форма, при которой энтропия системы растет наиболее медленно. Иначе говоря, реализуется та форма, при которой максимизируется убывание энтропии или рост информации, содержащейся в системе.

Раздел 6. Функциональное описание и моделирование систем.

Графические способы функционального описания систем. Описание синтаксиса языка моделирования.

Изучение любой системы предполагает создание модели системы, позволяющей произвести анализ и предсказать ее поведение в определенно диапазоне условий, решать задачи анализа и синтеза реальной системы. В зависимости от целей и задач моделирования оно может проводиться на различных уровнях абстракции.

Описание системы целесообразно начинать с трех точек зрения: функциональной, морфологической и информационной.

Всякий объект характеризуется результатами своего существования, местом, которое он занимает среди других объектов, ролью, которую он играет в среде. Функциональное описание необходимо для того, чтобы осознать важность системы, определить ее место, оценить отношения с другими системами.

Функциональное описание (функциональная модель) должно создать правильную ориентацию в отношении внешних связей системы, ее контактов с окружающим миром, направлениях ее возможного изменения.

Функциональное описание исходит из того, что всякая система выполняет некоторые функции: просто пассивно существует, служит областью обитания других систем, обслуживает системы более высокого порядка, служит средством для создания более совершенных систем.

Как нам уже известно, система может быть однофункциональной и многофункциональной.

Во многом оценка функций системы (в абсолютном смысле) зависит от точки зрения того, кто ее оценивает (или системы, ее оценивающей).

Функционирование системы может описываться числовым функционалом, зависящем от функций, описывающих внутренние процессы системы, либо качественным функционалом (упорядочение в терминах «лучше», «хуже», «больше», «меньше» и т.д.)

Функционал количественно или качественно описывающий деятельность системы называют функционалом эффективности.

Функциональная организация может быть описана:

- алгоритмически,
- аналитически,
- графически,

- таблично,
- посредством временных диаграмм функционирования,
- вербально (словесно).

Описание должно соответствовать концепции развития систем определенного класса и удовлетворять некоторым требованиям:

- должно быть открытым и допускать возможность расширения (сужения) спектра функций, реализуемых системой;
- предусматривать возможность перехода от одного уровня рассмотрения к другому, т.е. обеспечивать построение виртуальных моделей систем любого уровня.

При описании системы будем рассматривать ее как структуру, в которую в определенные моменты времени вводится нечто (вещество, энергия, информация), и из которой в определенные моменты времени нечто выводится.

В самом общем виде функциональное описание системы в любой динамической системе изображается семеркой:

$$Sf = \{T, x, C, Q, y, \varphi, \eta\},$$

где T – множество моментов времени, x – множество мгновенных значений входных воздействий, $C = \{c: T \rightarrow x\}$ – множество допустимых входных воздействий; Q – множество состояний; y – множество значений выходных величин; $Y = \{u: T \rightarrow y\}$ – множество выходных величин; $\varphi = \{T \times T \times T \times C \rightarrow Q\}$ – переходная функция состояния; $\eta: T \times Q \rightarrow y$ – выходное отображение; c – отрезок входного воздействия; u – отрезок выходной величины.

Такое описание системы охватывает широкий диапазон свойств.

Недостаток данного описания – не конструктивность: трудность интерпретации и практического применения. Функциональное описание должно отражать такие характеристики сложных и слабо познанных систем как параметры, процессы, иерархию.

Примем, что система S выполняет N функций $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_s, \dots, \psi_N$, зависящих от n процессов $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$. Эффективность выполнения s -й функции

$$\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_s(\psi_s) = \mathcal{E}(F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n) = \mathcal{E}_s(\{F_i\}), i = 1 \dots n, s = 1 \dots N.$$

Общая эффективность системы есть вектор-функционал $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_s\}$. Эффективность системы зависит от огромного количества внутренних и внешних факторов. Представить эту зависимость в явной форме чрезвычайно сложно, а практическая ценность такого представления незначительна из-за многомерности и многосвязности. Рациональный путь формирования функционального описания состоит в применении такой многоуровневой

иерархии описаний, при которой описание более высокого уровня будет зависеть от обобщенных и факторизованных переменных низшего уровня.

Иерархия создается по уровневой факторизацией процессов $\{Fi\}$ при помощи обобщенных параметров $\{Qi\}$, являющихся функционалами $\{Fi\}$. Предполагается, что число параметров значительно меньше числа переменных, от которых зависят процессы. Такой способ описания позволяет построить мост между свойствами взаимодействующих со средой элементов (подсистемами низшего уровня) и эффективностью системы.

Процессы $\{Fi(1)\}$ можно обнаружить на выходе системы. Это процессы взаимодействия со средой. Будем называть их процессами первого уровня и полагать, что они определяются:

- параметрами системы первого уровня – $Q1(1), Q2(1), ..., Qj(1), ..., Qm(1)$;
- активными противодействующими параметрами среды, непосредственно направленными против системы для снижения ее эффективности – $b1, b2, ..., bk, ..., bK$;
- нейтральными (случайными параметрами среды) $c1, c2, ..., cl, ..., cL$;
- благоприятными параметрами среды $d1, d2, ..., dp, ..., dP$.

Среда имеет непосредственный контакт с подсистемами низших уровней, воздействуя через них на подсистемы более высокого уровня иерархии, так что $Fi^* = Fi^*({bk}, {cl}, {dp})$. Путем построения иерархии (параметры β -го уровня – процессы $(\beta-1)$ -го уровня – параметры $(\beta-1)$ -го уровня) можно связать свойства среды с эффективностью системы.

Параметры системы $\{Qj\}$ могут изменяться при изменении среды, они зависят от процессов в системе и записываются в виде функционалов состояния $Qj1(t)$.

Собственным функциональным пространством системы W называется пространство, точками которого являются все возможные состояния системы, определяемое множеством параметров до уровня b :

$$Q = \{Q(1), Q(2), ... Q(\beta)\}.$$

Состояние может сохраняться постоянным на некотором интервале времени T .

Процессы $\{Fi(2)\}$ не могут быть обнаружены на выходе системы. Это процессы второго уровня, которые зависят от параметров $Q(2)$ подсистем системы (параметров второго уровня). И так далее.

Образуется следующая иерархия описания: эффективность (конечное множество функционалов) – процессы первого уровня (функции) – параметры первого уровня (функционалы) – процессы второго уровня (функции) – параметры второго уровня (функционалы) и т.д. На каком-то уровне наши знания о функциональных свойствах системы исчерпываются, и

иерархия обрывается. Обрыв может произойти на разном уровне для разных параметров (процессов), причем как на процессе, так и на параметре.

Внешние характеристики системы определяются верхним уровнем иерархии, поэтому часто удается ограничиться описанием вида $(\{\mathcal{E}i\}, \{\psi S\}, \{Fi(1)\}, \{Qj(1)\}, \{bk\}, \{cl\}, \{dp\})$. Число уровней иерархии зависит от требуемой точности представления входных процессов.

Графические способы функционального описания систем

Выше был рассмотрен способ обобщенного аналитического функционального описания систем. Очень часто при анализе и синтезе систем используется графическое описание, разновидностями которого являются:

- дерево функций системы,
- стандарт функционального моделирования IDEF0.

Все функции, реализуемые сложной системой, могут быть условно разделены на три группы:

- целевая функция;
- базисные функции системы;
- дополнительные функции системы.

Целевая функция системы соответствует ее основному функциональному назначению, т.е. целевая (главная) функция – отражает назначение, сущность и смысл существования системы.

Основные функции отражают ориентацию системы и представляют собой совокупность макрофункций, реализуемых системой. Эти функции обуславливают существование системы определенного класса. Основные функции – обеспечивают условия выполнения целевой функции (прием, передача, приобретение, хранение, выдача).

Дополнительные (сервисные) функции расширяют функциональные возможности системы, сферу их применения и способствуют улучшению показателей качества системы. Дополнительные функции – обеспечивают условия выполнения основных функций (соединение (разведение, направление, гарантирование)).

Описание объекта на языке функций представляется в виде графа.

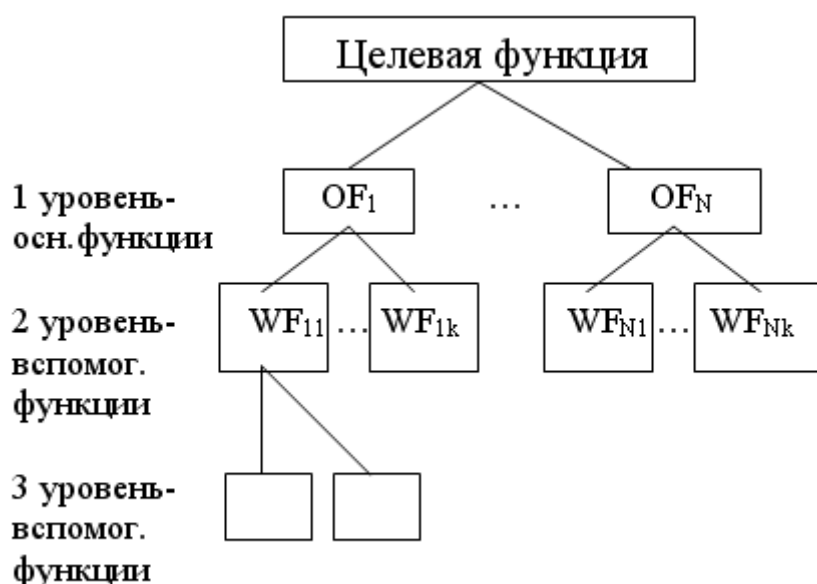


Рис. – Описание объекта на языке функций в виде графа

Формулировка функции внутри вершин должна включать 2 слова: глагол и существительное «Делать что».

Дерево функций системы представляет декомпозицию функций системы и формируется с целью детального исследования функциональных возможностей системы и анализа совокупности функций, реализуемых на различных уровнях иерархии системы. На базе дерева функций системы осуществляется формирование структуры системы на основе функциональных модулей. В дальнейшем структура на основе таких модулей покрывается конструктивными модулями (для технических систем) или организационными модулями (для организационно-технических систем). Таким образом, этап формирования дерева функций является одним из наиболее ответственных не только при анализе, но и при синтезе структуры системы. Ошибки на этом этапе приводят к созданию «систем-инвалидов», не способных к полной функциональной адаптации с другими системами, пользователем и окружающей средой.

Исходными данными для формирования дерева функций являются основные и дополнительные функции системы.

Формирование дерева функций представляет процесс декомпозиции целевой функции и множества основных и дополнительных функций на более элементарные функции, реализуемые на последующих уровнях декомпозиции.

При этом каждая из функций конкретно взятого i -ого уровня может рассматриваться как макрофункция по отношению к реализующим ее функциям на $(i+1)$ -го уровня, и как элементарная функция по отношению к соответствующей функции верхнего $(i-1)$ -го уровня.

Описание функций системы с использованием IDEF0-нотации основано на тех же принципах декомпозиции, но представляется не в виде дерева, а набора диаграмм.

Краткое описание методологии IDEF0

Объектами моделирования являются системы.

Описание IDEF0 модели построено в виде иерархической пирамиды, в вершине которой представляется самое общее описание системы, а основание представляет собой множество более детальных описаний.

IDEF0 методология построена на следующих принципах:

Графическое описание моделируемых процессов. Графический язык Блоков и Дуг IDEF0 Диаграмм отображает операции или функции в виде Блоков, а взаимодействие между входами/выходами операций, входящими в Блок или выходящими из него, Дугами.

Лаконичность. За счет использования графического языка описания процессов достигается с одной стороны точность описания, а с другой – краткость.

Необходимость соблюдения правил и точность передачи информации. При IDEF0 моделировании необходимо придерживаться следующих правил:

- На Диаграмме должно быть не менее 3-х и не более 6-и функциональных Блоков.
- Диаграммы должны отображать информацию, не выходящую за рамки контекста, определенного целью и точкой зрения.
- Диаграммы должны иметь связанный интерфейс, когда номера Блоков, Дуги и ICOM коды имеют единую структуру.
- Уникальность имен функций Блоков и наименований Дуг.
- Четкое определение роли данных и разделение входов и управлений.
- Замечания для Дуг и имена функций Блоков должны быть краткими и лаконичными.
- Для каждого функционального Блока необходима как минимум одна управляющая Дуга.
- Модель всегда строится с определенной целью и с позиций конкретной точки зрения.

В процессе моделирования очень важным является четко определить направление разработки модели – ее контекст, точку зрения и цель.

Контекст модели очерчивает границы моделируемой системы и описывает ее взаимосвязи с внешней средой.

Точка зрения определяет позицию автора, т.е. что будет рассматриваться и под каким углом зрения.

Необходимо помнить, что одна модель представляет одну точку зрения. Для моделирования системы с нескольких точек зрения используется несколько моделей.

Цель отражает причину создания модели и определяет ее назначение. При этом, все взаимодействия в модели рассматриваются именно с точки зрения достижения поставленной цели.

В рамках методологии IDEF0 модель системы описывается при помощи Графических IDEF0 Диаграмм и уточняется за счет использования ГЕО, Текстовых и Диаграмм Глоссария. При этом модель включает в себя серию взаимосвязанных Диаграмм, разделяющих сложную систему на составные части. Диаграммы более высокого уровня (А-0, А0) – являются наиболее общим описанием системы, представленным в виде отдельных Блоков. Декомпозиция этих Блоков позволяет достигать требуемого уровня детализации описания системы.

Разработка IDEF0 Диаграмм начинается с построения самого верхнего уровня иерархии (А-0) – одного Блока и интерфейсных Дуг, описывающих внешние связи рассматриваемой системы. Имя функции, записываемое в Блоке 0, является целевой функцией системы с принятой точки зрения и цели построения модели.

При дальнейшем моделировании Блок 0 декомпозируется на Диаграмме А0, где целевая функция уточняется с помощью нескольких Блоков, взаимодействие между которыми описывается с помощью Дуг. В свою очередь, функциональные Блоки на Диаграмме А0 могут быть также декомпозированы для более детального представления.

В результате, имена функциональных Блоков и интерфейсные Дуги, описывающие взаимодействие всех Блоков, представленных на Диаграммах, образуют иерархическую взаимосогласованную модель.

Хотя вершиной модели является Диаграмма уровня А-0, настоящей «рабочей вершиной или структурой» является Диаграмма А0, поскольку она является уточненным выражением точки зрения модели. Ее содержание показывает, что будет рассматриваться в дальнейшем, ограничивая последующие уровни в рамках цели проекта. Нижние уровни уточняют содержание функциональных Блоков, детализируя их, но, не расширяя границ модели.

Описание синтаксиса языка моделирования

Основными элементами на IDEF0 Диаграммах являются Блоки и Дуги.

Блоки служат для отображения функций (действий), выполняемых моделируемой системой. Сформулированные функции должны содержать глагольный оборот.

глагол + объект действия + [дополнение].

Например: обрабатывать деталь на станке, передать документы в отдел, разработать план-график проведения анализа, опубликовать материалы...

Дуги служат для отображения информации или материальных объектов, которые необходимы для выполнения функции или появляются в результате ее выполнения (объекты, обрабатываемые системой). Под объектами в рамках функционального моделирования могут пониматься документы, физические материалы, инструменты, станки, информация, организации и даже системы.

Место соединения дуги с блоком определяет тип интерфейса.

Управляющие выполнением функции данные входят в блок сверху, в то время как информация, которая подвергается воздействию функции, показана с левой стороны блока; результаты выхода показаны с правой стороны.

Механизм (человек или автоматизированная система), который осуществляет функцию, представляется дугой, входящей в блок снизу (см.рис.).

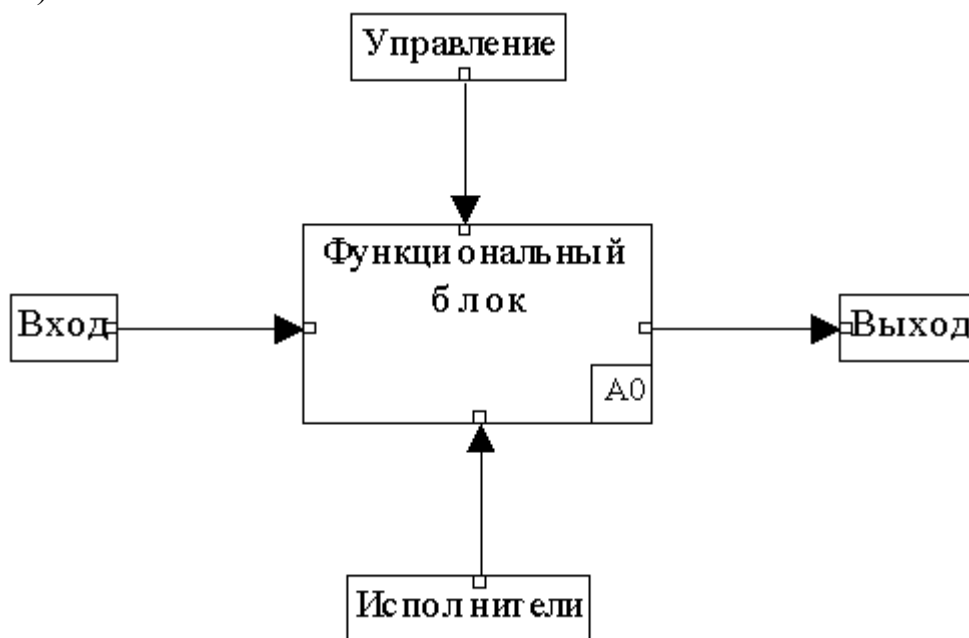


Рис. – Типы дуг

Функциональный блок преобразует входную информацию (данные, материалы, средства, задачи, цели и др.) в выходную (что требуется получить в результате выполнения данной функции). Управление определяет, когда и

За каждой Дугой закрепляется Замечание, которое отображает суть информации или объекта. Замечание формулируется в виде оборота существительного, отвечающего на вопрос: «Что?».

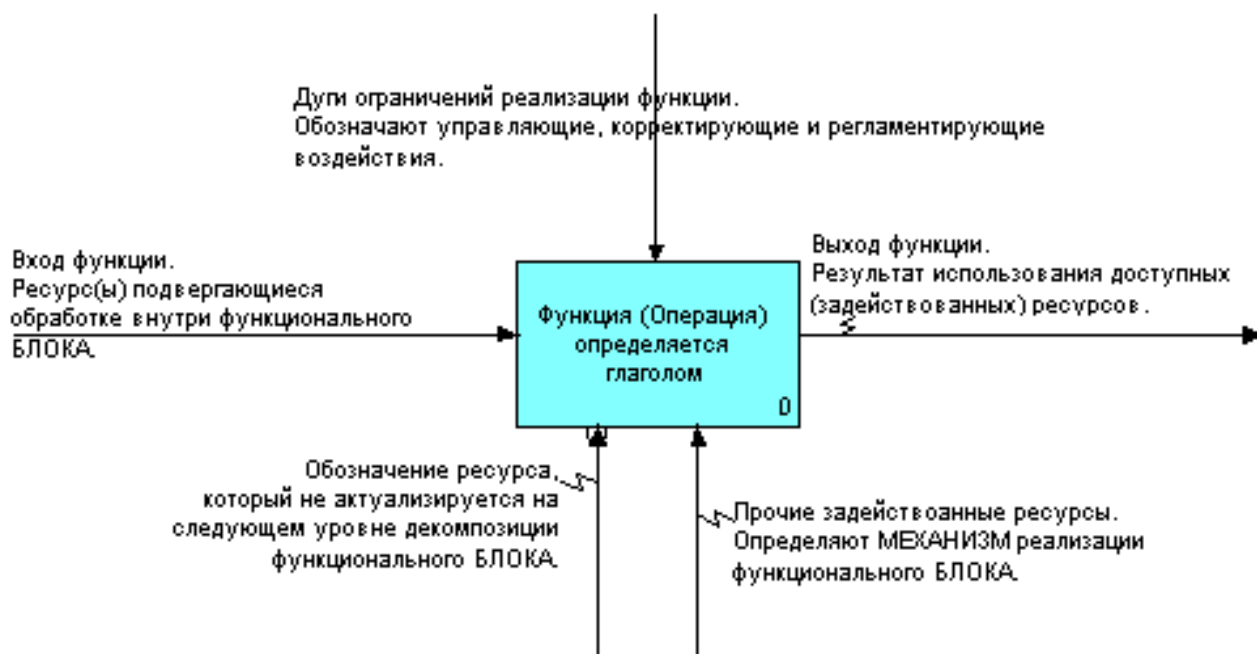


Рис. – Дуги, как ограничивающие и уточняющие факторы Блока

ИСПОЛЬЗУЮТСЯ: АВТОР: ДАТА: 18.ноя.1996 РАБОЧАЯ ВЕРСИЯ ЧИТАТЕЛЬ ДАТА КОНТЕКСТ:

ПРОЕКТ: Проект 0 ПЕРСМОТР: 1+ дек.1996 ЭСКИЗ РЕКОМЕНДОВАНО ПУБЛИКАЦИЯ

ЗАМЕЧАНИЯ: 1 2 3 + 5 6 7 8 9 10

Управлять выполнением заказа 1

Принять заказ 2

Обеспечить снабжение производства 3

Произвести партию продукции 4

Поставить продукцию Заказчику 5

Администрация

Служба сбыта

Вспомог. службы

Производ. службы

Подразделения

Нормативы

Распоряжения

Техзадание

Заявки

Основы материалы

Ресурсы

Партия продукции

Продукция у Заказчика

Служба сбыта

Рис. – Пример A0 диаграммы

Функциональные Блоки на Диаграмме изображаются в виде прямоугольников, внутри которых записывается имя функции и номер Блок (в правом нижнем углу прямоугольника).

Блоки располагаются на Диаграмме согласно их степени важности (по мнению автора модели). При этом доминирующим является тот Блок, выполнение функции которого оказывает влияние на выполнение всех остальных функций, представленных на Диаграмме. К примеру, это может быть Блок, содержащий контролирующую или планирующую функцию, выходы которого являются управляющими для всех остальных функциональных Блоков Диаграммы.

Доминирующий Блок помещается, как правило, в верхнем левом углу листа Диаграммы, а наименее важный Блок – в правом нижнем углу. Таким образом, ступенчатость Блоков на Диаграмме отражает мнение автора о доминировании одних Блоков относительно других.

Очень важно помнить, что доминирование блоков на диаграмме не задаёт чёткой временной зависимости операций.

Стороны Блока также имеют определенное значение. К левой границе Блока присоединяются входные Дуги, к верхней – управляющие Дуги, к правой – выходные Дуги, а к нижней – Дуги механизмов.

Дуги на IDEF0 Диаграмме изображаются в виде стрелок.

При IDEF0 моделировании используются пять типов взаимосвязей между Блоками, для описания их отношений.

Взаимосвязь по управлению, – когда выход одного Блока влияет (является управляющей) на выполнение функции в другом Блоке.

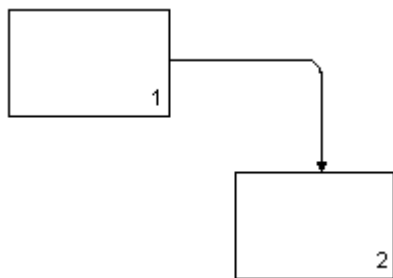


Рис. – Взаимосвязь по управлению

Взаимосвязь по входу, – когда выход одного Блока является входом для другого.

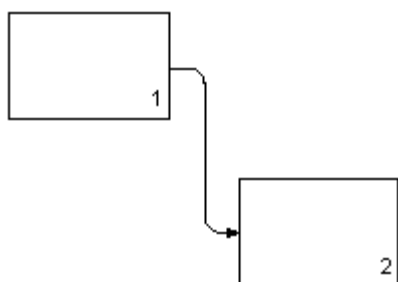


Рис. – Взаимосвязь по входу

Обратная связь по управлению, – когда выходы из одной функции влияют на выполнение других функций, выполнение которых в свою очередь влияет на выполнение исходной функции.

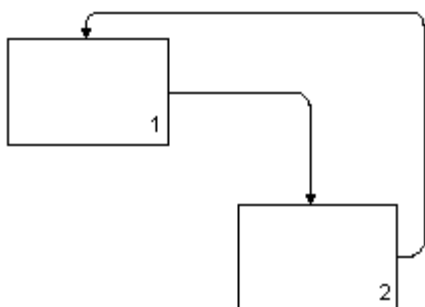


Рис. – Обратная связь по управлению

Обратная связь по входу, – когда выход из одной функции является входом для другой функции, выход которой является для него входом.

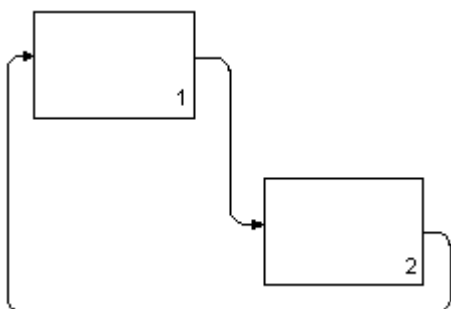


Рис. – Обратная связь по входу

Взаимосвязь «выход-механизм», – когда выход одной функции является механизмом для другой. Иначе говоря, выходная Дуга одного Блока является Дугой механизма для другого. Такой тип связи встречается редко и относится чаще всего к подготовительным операциям.

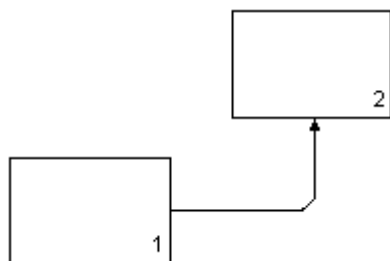


Рис. – Взаимосвязь «выход-механизм»

Поскольку содержание IDEF0 Диаграмм уточняется в ходе моделирования постепенно, Дуги на Диаграммах редко изображают один объект. Чаще всего они отображают определенный набор объектов и могут иметь множество начальных точек (источников) и определенное количество конечных точек (приемников). В ходе разработки графической Диаграммы для отражения этой особенности используют механизм разветвления/слияния Дуг. Это позволяет не только уточнить с использованием Замечаний содержание каждой ветви разветвленной Дуги (потока объектов), но и более точно описать из каких наборов объектов состоит входящая в функциональный Блок Дуга, если она получена путем слияния.

Раздел 7. Морфологическое (структурное) описание и моделирования систем.

Описание структуры системы, анализ элементного состава, виды связей, отношения координации и субординации. Методы описания структур.

Современные технические и технологические объекты и их системы управления характеризуются большим числом элементов, множеством связей и взаимосвязей, значительным объемом перерабатываемой информации. Такие системы называют сложными, большими или системами со сложной структурой.

Для систем, состоящих из большого числа взаимосвязанных подсистем, наиболее эффективно вначале наметить основные подсистемы и установить главные взаимосвязи между ними, а затем уже переходить к детальному моделированию механизмов функционирования различных подсистем.

Характерной особенностью начального этапа проектирования является ограниченность информации о свойствах будущей системы, что заставляет в первую очередь обращаться к структуре системы и содержащейся в ней информации. Изучение особенностей этой информации и является предметом морфологического (структурного) анализа систем.

Таким образом, морфологическое описание должно давать представление о строении системы (морфология – наука о форме, строении). Глубина описания, уровень детализации, т.е. определение какие компоненты системы будут рассматриваться в качестве элементарных (элементов), обуславливается назначением описания системы. Морфологическое описание иерархично. Конфигурация морфологии дается на стольких уровнях, сколько их требуется для создания представления об основных свойствах системы.

Целями структурного анализа являются:

- разработка правил символического отображения систем;
- оценка качества структуры системы;
- изучение структурных свойств системы в целом и ее подсистем;
- выработка заключения об оптимальности структуры системы и рекомендаций по дальнейшему ее совершенствованию.

В структурном подходе можно выделить два этапа: определение состава системы, т.е. полное перечисление ее подсистем, элементов, и выяснение связей между ними.

Изучение морфологии системы начинается с элементного состава. Он может быть:

- гомогенным (однотипные элементы);
- гетерогенным (разнотипные элементы);
- смешанным.

Однотипность не означает полной идентичности и определяет только близость основных свойств.

Гомогенности, как правило, сопутствует избыточность и наличие скрытых (потенциальных) возможностей, дополнительных резервов.

Гетерогенные элементы специализированы, они экономичны и могут быть эффективными в узком диапазоне внешних условий, но быстро теряют эффективность вне этого диапазона.

Иногда элементный состав определить не удастся – неопределенный.

Важным признаком морфологии является назначение (свойства) элементов. Различают элементы:

- информационные;
- энергетические;
- вещественные.

Следует помнить, что такое деление условно и отражает лишь преобладающие свойства элемента. В общем же случае, передача информации не возможна без энергии, перенос энергии не возможен без информации.

Информационные элементы предназначены для приема, запоминания (хранения), преобразования и передачи информации. Преобразование может состоять в изменении вида энергии, которая несет информацию, в изменении способа кодирования (представления в некоторой знаковой форме) информации, в сжатии информации путем сокращения избыточности, принятия решений и т.д.

Различают обратимые и необратимые преобразования информации.

Обратимые не связаны с потерей (либо созданием новой) информации. Накопление (запоминание) является обратимым в том случае, если не происходит потерь информации в течение времени хранения.

Преобразование энергии состоит в изменении параметров энергетического потока. Поток входной энергии может поступать извне, либо от других элементов системы. Выходной энергетический поток направлен в другие системы, либо в среду. Процесс преобразования энергии, естественным образом, нуждается в информации.

Процесс преобразования вещества может быть механическим (например, штамповка), химическим, физическим (например, резка), биологическим. В сложных системах преобразование вещества носит смешанный характер.

В общем случае, следует иметь в виду, что любые процессы, так или иначе, приводят к преобразованию вещества, энергии и информации.

Морфологические свойства системы существенно зависят от характера связей между элементами. Понятие связи входит в любое определение системы. Оно одновременно характеризует и строение (статику) и функционирование (динамику) системы. Связи обеспечивают возникновение и сохранение структуры и свойств системы. Выделяют информационные, вещественные и энергетические связи, определяя их в том же смысле, в каком были определены элементы.

Характер связи определяется удельным весом соответствующего компонента (или целевой функцией).

Связь характеризуется:

- направлением,
- силой,
- видом.

По первым двум признакам связи делят на направленные и ненаправленные, сильные и слабые, а по характеру – подчинения, порождения (генетические), равноправные и связи управления.

Некоторые из этих связей можно раздробить еще более детально. Например, связи подчинения на связи «род-вид», «часть-целое»; связи порождения – «причина-следствие».

Их можно разделить также по месту приложения (внутренние – внешние), по направленности процессов (прямые, обратные, нейтральные).

Прямые связи предназначены для передачи вещества, энергии, информации или их комбинаций от одного элемента другому в соответствии с последовательностью выполняемых функций.

Качество связи определяется ее пропускной способностью и надежностью.

Очень важную роль, как мы уже знаем, играют обратные связи – они являются основной саморегулирования и развития систем, приспособления их к изменяющимся условиям существования. Они в основном служат для управления процессами и наиболее распространены информационные обратные связи.

Нейтральные связи не относятся к функциональной деятельности системы, непредсказуемы и случайны. Однако нейтральные связи могут сыграть определенную роль при адаптации системы, служить исходным ресурсом для формирования прямых и обратных связей, являться резервом.

Морфологическое описание может включать указания на наличие и вид связи, содержать общую характеристику связи либо их качественные и количественные оценки.

Структурные свойства систем определяются характером и устойчивостью отношений между элементами. По характеру отношений между элементами структуры делятся на:

- многосвязные,
- иерархические,
- смешанные.

Наиболее устойчивы детерминированные структуры, в которых отношения либо постоянны, либо изменяются во времени по детерминированным законам. Вероятностные структуры изменяются во времени по вероятностным законам. Хаотические структуры характерны отсутствием ограничений, элементы в них вступают в связь в соответствии с индивидуальными свойствами. Классификация производится по доминирующему признаку.

Структура играет основную роль в формировании новых свойств системы, отличных от свойств ее компонентов, в поддержании целостности и устойчивости ее свойств по отношению к изменению элементов системы в некоторых пределах.

Важными структурными компонентами являются отношения координации и субординации.

Координация выражает упорядоченность элементов системы «по - горизонтали». Здесь идет речь о взаимодействии компонент одного уровня организации.

Субординация – «вертикальная» упорядоченность подчинения и субподчинения компонент. Здесь речь идет о взаимодействии компонент различных уровней иерархии.

Иерархия (hiezosazche – священная власть, греч.) – это расположение частей целого в порядке от высшего к низшему. Термин «иерархия» (многоступенчатость) определяет упорядоченность компонентов системы по степени важности. Между уровнями иерархии структуры могут существовать взаимоотношения строгого подчинения компонент нижележащего уровня одному из компонент вышележащего уровня, т.е. отношения древовидного порядка. Такие иерархии называют сильными или иерархиями типа «дерево».

Однако между уровнями иерархической структуры необязательно должны существовать отношения древовидного характера. Могут иметь место связи и в пределах одного уровня иерархии. Нижележащий компонент может подчиняться нескольким компонентами вышележащего уровня – это иерархические структуры со слабыми связями.

Для иерархических структур характерно наличие управляющих и исполнительных компонент. Могут существовать компоненты, являющиеся одновременно и управляющими и исполнительными.

Различают строго и нестрого иерархические структуры.

Система строгой иерархической структуры имеют следующие признаки:

- в системе имеется один главный управляющий компонент, который имеет не менее двух связей;
- имеются исполнительные компоненты, каждый из которых имеет только одну связь с компонентом вышележащего уровня;
- связь существует только между компонентами, принадлежащим двум соседним уровням, при этом компоненты низшего уровня связаны только с одним компонентом высшего уровня, а каждый компонент высшего уровня не менее, чем с двумя компонентами низшего.

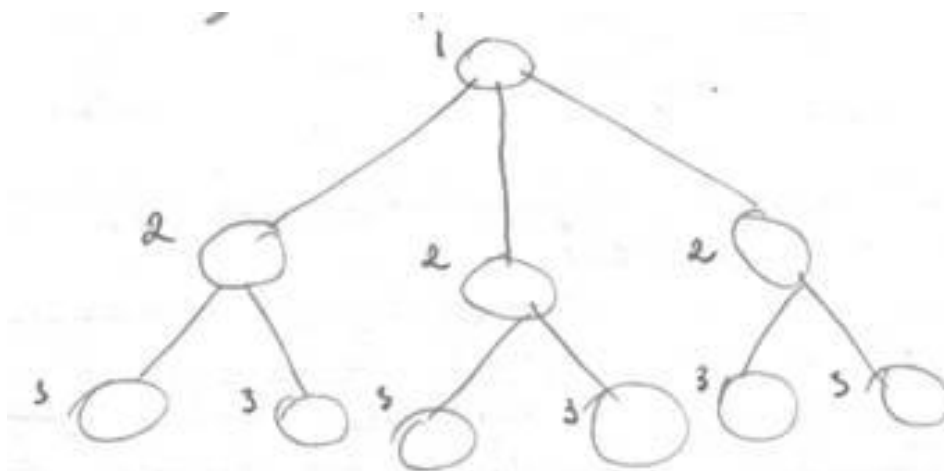


Рис. 1 – Граф строго-иерархической структуры

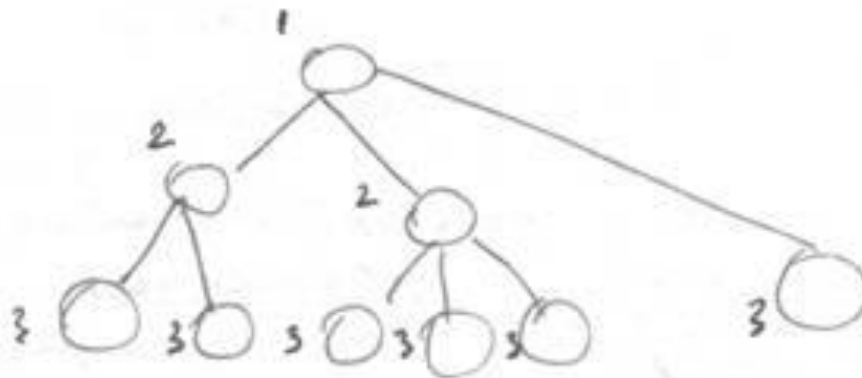


Рис. 2 – Граф нестрогой иерархической структуры

На рис.1 приведен граф строго иерархической структуры, на рис.2 – граф нестрогой иерархической структуры. Обе структуры трехуровневые.

Так на рис.1 элемент 1-го уровня иерархии может представлять собой ректора университета, элементы 2-го уровня – проректоров, 3-го уровня – деканов, остальные элементы (4-го уровня, не отраженного на рисунке) будут представлять заведующих кафедрами. Понятно, что все элементы и связи представленной структуры не равноправны.

Как правило, наличие иерархии является признаком высокого уровня организации структуры, хотя могут существовать и не иерархические высокоорганизованные системы.

В функциональном отношении иерархические структуры более экономичны.

Для не иерархических структур не существует компонент, которые являются только управляющими или только исполнительными. Любой компонент взаимодействует более чем с одним компонентом.

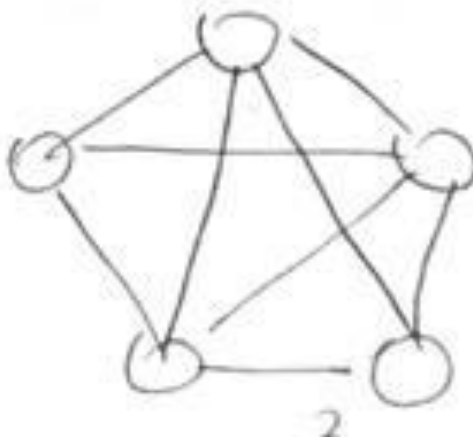


Рис. 3 – Граф многосвязной структуры системы

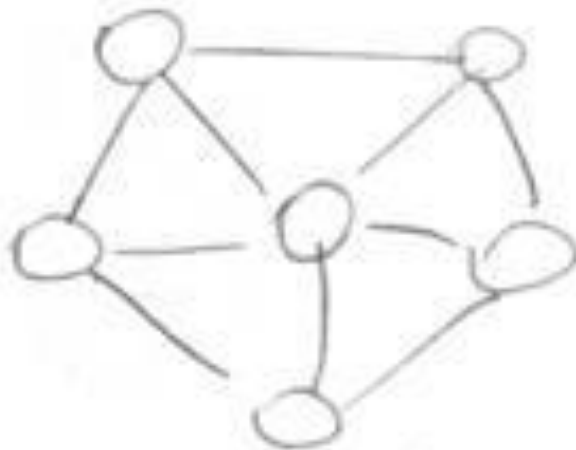


Рис. 4 – Граф сотовой структуры системы

Смешанные структуры представляют собой различные комбинации иерархических и неиерархических структур.

Введем понятие лидерства.

Лидирующей называется подсистема, удовлетворяющая следующим требованиям:

1. подсистема не имеет детерминированного взаимодействия ни с одной подсистемой;
2. подсистема является управляющей (при непосредственном или опосредованном взаимодействии) по отношению к части (наибольшему числу подсистем);
3. подсистема либо не является управляемой (подчиненной), либо управляется наименьшим (по сравнению с другими) числом подсистем.

Лидирующих подсистем может быть больше одной, при нескольких лидирующих подсистемах возможна главная лидирующая подсистема. Подсистема высшего уровня иерархической структуры одновременно должна быть главной лидирующей, если же этого нет, то предполагаемая иерархическая структура либо неустойчива, либо не соответствует истинной структуре системы.

Смешанные структуры представляют собой различные комбинации иерархических и неиерархических структур. Стабильность структуры характеризуется временем ее изменения. Структура может изменяться без преобразования класса или преобразованием одного класса в другой. В частности, возникновение лидера в неиерархической структуре может привести к преобразованию ее в иерархическую, а возникновение лидера в иерархической структуре – к установлению ограничивающей, а затем детерминированной связи между лидирующей подсистемой и подсистемой

высшего уровня. В результате этого подсистема высшего уровня заменяется лидирующей подсистемой, либо объединяется с ней, или иерархическая структура преобразуется в неиерархическую (смешанную).

Равновесными называются неиерархические структуры без лидеров. Чаще всего равновесными бывают многосвязные структуры. Равновесность не означает покомпонентной идентичности метаболизма, речь идет только о степени влияния на принятие решений.

Особенностью иерархических структур является отсутствие горизонтальных связей между элементами. В этом смысле данные структуры являются абстрактными построениями, поскольку в реальной действительности трудно найти производственную или какую-либо другую действующую систему с отсутствующими горизонтальными связями.

Важное значение при морфологическом описании системы имеют ее композиционные свойства. Композиционные свойства систем определяются способом объединения элементов в подсистемы. Будем различать подсистемы:

- эффекторные (способные преобразовывать воздействие и воздействовать веществом или энергией на другие подсистемы и системы, в том числе на среду),
- рецепторные (способные преобразовывать внешнее воздействие в информационные сигналы, передавать и переносить информацию)
- рефлексивные (способные воспроизводить внутри себя процессы на информационном уровне, генерировать информацию).

Композиция систем, не содержащих (до элементного уровня) подсистем с выраженными свойствами, называется слабой. Композиция систем, содержащих элементы с выраженными функциями, называется соответственно с эффекторными, рецепторными или рефлексивными подсистемами; возможны комбинации. Композицию систем, включающих подсистемы всех трех видов, будем называть полной. Элементы системы (т.е. подсистемы, в глубь которых морфологический анализ не распространяется) могут иметь эффекторные, рецепторные или рефлексивные свойства, а также их комбинации.

На теоретико-множественном языке морфологическое описание есть четверка:

$$S_M = \{S, V, d, K\},$$

где $S = \{S_i\}_i$ – множество элементов и их свойств (под элементом в данном случае понимается подсистема, вглубь которой морфологическое описание не проникает); $V = \{V_j\}_j$ – множество связей; d – структура; K – композиция.

Все множества считаем конечными.

Будем различать в S :

Состав:

- гомогенный,
- гетерогенный,
- смешанный (большое количество гомогенных элементов при некотором количестве гетерогенных),
- неопределенный.

Свойства элементов:

- информационные,
- энергетические,
- информационно-энергетические,
- вещественно-энергетические,
- неопределенные (нейтральные).

Будем различать во множестве V :

Назначение связей:

- информационные,
- вещественные,
- энергетические.

Характер связей:

- прямые,
- обратные,
- нейтральные.

Будем различать в d :

Устойчивость структуры:

- детерминированная,
- вероятностная,
- хаотическая.

Построения:

- иерархические,
- многосвязные,
- смешанные,
- преобразующиеся.

Будем различать во множестве K :

Композиции:

- слабые,
- с эффекторными подсистемами,
- с рецепторными подсистемами,
- с рефлексивными подсистемами,

- полные,
- неопределенные.

Морфологическое описание, как и функциональное, строится по иерархическому (многоуровневому) принципу путем последовательной декомпозиции подсистем. Уровни декомпозиции системы, уровни иерархии функционального и морфологического описания должны совпадать. Морфологическое описание можно выполнить последовательным расчленением системы. Это удобно в том случае, если связи между подсистемами одного уровня иерархии не слишком сложны. Наиболее продуктивны (для практических задач) описания с единственным членением или с небольшим их числом. Каждый элемент структуры можно, в свою очередь, описать функционально и информационно. Морфологические свойства структуры характеризуются временем установления связи между элементами и пропускной способностью связи. Можно доказать, что множество элементов структуры образует нормальное метрическое пространство. Следовательно, в нем можно определить метрику (понятие расстояния). Для решения некоторых задач целесообразно введение метрики в структурном пространстве.

Методы описания структур

Структурные схемы

Формирование структуры является частью решения общей задачи описания системы. Структура выявляет общую конфигурацию системы, а не определяет систему в целом.

Если изобразить систему как совокупность блоков, осуществляющих некоторые функциональные преобразования, и связей между ними, то получим структурную схему, в обобщенном виде описывающую структуру системы. Под блоком обычно понимают, особенно в технических системах, функционально законченное и оформленное в виде отдельного целого устройство. Членение на блоки может осуществляться исходя из требуемой степени детализации описания структуры, наглядности отображения в ней особенностей процессов функционирования, присущих системе. Помимо функциональных, в структурную схему могут включаться логические блоки, позволяющие изменять характер функционирования в зависимости от того, выполняются или нет некоторые заранее заданные условия.

Структурные схемы наглядны и вмещают в себя информацию о большом числе структурных свойств системы. Они легко поддаются уточнению и конкретизации, в ходе которой не надо изменять всю схему, а

достаточно заменить отдельные ее элементы структурными схемами, включающими не один, как раньше, а несколько взаимодействующих блоков.

Однако, структурная схема – это еще не модель структуры. Она с трудом поддается формализации и является скорее естественным мостиком, облегчающим переход от содержательного описания системы к математическому, чем действительным инструментом анализа и синтеза структур.

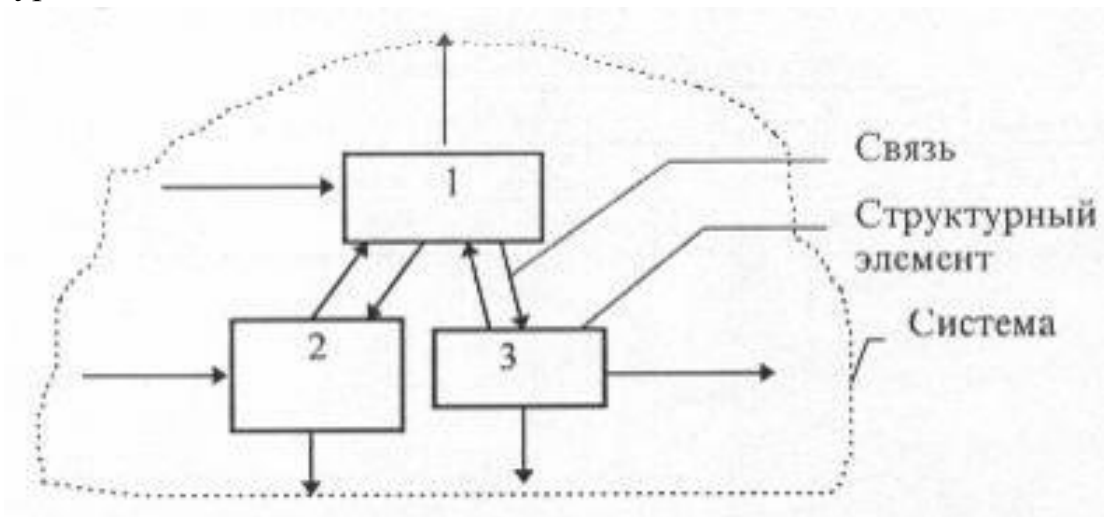


Рис. – Пример структурной схемы

Графы

Отношения между элементами структуры могут быть представлены соответствующим графом, что позволяет формализовать процесс исследования инвариантных во времени свойств систем и использовать хорошо развитый математический аппарат теории графов.

Определение. Графом называют тройку $G=(M, R, P)$, где M – множество вершин, R – множество ребер (или дуг графа), P – предикат инцидентности вершин и ребер графа. $P(x, y, r) = 1$ означает, что вершины $x, y \in M$ инцидентны (связаны, лежат на) ребру графа $r \in R$.

Для того чтобы облегчить работу с графом, вершины его обычно нумеруют. Граф с пронумерованными вершинами называется отмеченным.

Каждое ребро графа связывает две вершины, называемые в этом случае смежными. Если граф отмечен, то ребро задается парой (i, j) , где i и j – номера смежных вершин. Очевидно, что ребро (i, j) инцидентно вершинам i и j , и обратно.

Если все ребра графа заданы упорядоченными парами (i, j) , в которых порядок расположения смежных вершин имеет значение, то граф называется ориентированным. Неориентированный граф не содержит ориентированных ребер. В частично ориентированном графе ориентированы не все ребра.

Геометрически графы изображают в виде диаграмм, на которых вершины отображаются точками (окружностями, прямоугольниками), а ребра – отрезками, соединяющими смежные вершины. Ориентированное ребро задают отрезком со стрелкой.

Использование диаграмм настолько распространено, что обычно, говоря о графе, представляют себе именно диаграмму графа.

Если ребра графа имеют некоторые числовые характеристики связи, то такие графы называются взвешенными. В этом случае матрица инцидентности содержит веса соответствующих связей, знак перед числом определяет направление ребра.

Важной характеристикой структурного графа является число возможных путей, по которым можно пройти от одной вершины к другой. Чем больше таких путей, тем совершеннее структура, но тем она избыточнее. Избыточность обеспечивает надежность структуры. Например, разрушение 90% нервных связей головного мозга не ощущается и не влияет на поведение. Может существовать и бесполезная избыточность, которая в структурном графе изображается в виде петель.

Раздел 8. Информационное описание и моделирование систем.

Необходимость информационного описания. Организованность системы. Синтаксический, семантический и прагматический аспекты информации. Ценность информации.

Главное отличие подхода к изучению любого объекта как системы состоит в том, что исследователь не ограничивается рассмотрением и описанием только вещественной и энергетической его сторон, но и (прежде всего) проводит исследование его информационных аспектов: целей, информационных потоков, управления, организации и т.д. Создание новых и совершенствование существующих объектов (систем) зависят от решения вопросов, позволяющих анализировать имеющуюся информацию, отсеивать ее избыточную часть, выделять основную, производить оценку и обеспечивать формирование альтернатив для принятия решений.

Любая более или менее сложная экономическая система в процессе своего существования потребляет и вырабатывает большой объем информации. Более того, сегодня можно однозначно утверждать, что объем информации, необходимый для нормального функционирования экономических объектов, и требования к скорости восприятия информации

экономической системой неуклонно возрастает. Предприятия производят обмен информацией как внутри себя, так и во вне (в «горизонтальном» и «вертикальном» направлении). Ни для кого не секрет, что в рамках достаточно крупного промышленного предприятия годовой оборот документированных данных может достигать двухмиллионного рубежа и содержать совершенно фантастическую цифру показателей – более ста миллионов единиц. Однако сразу отметим, что количество данных в отчетах не адекватно содержащейся в них информации. Обычно под информацией понимают только те данные, которые способствуют решению задач, поставленных перед исследователем. Из литературных источников известно, что только 10-30% данных, циркулирующих в экономических системах, непосредственно используются при решении задач. Остальные данные не используются вообще.

Рыночные условия хозяйствования и современные компьютерные технологии потребовали от экономических систем новых форм организации информационных потоков. В качестве примера можно привести систему маркетинговой информации, которая сама по себе представляет постоянно меняющуюся сложную систему из четырех подсистем: системы внутренней отчетности, системы исследований, системы сбора текущей внешней информации, системы анализа информации.

Информационное описание должно давать представление об организации и управлении системой.

Термин информация имеет несколько значений:

1. совокупность каких либо сведений, знаний о чем-либо;
2. сведения, являющиеся объектом хранения, передачи и переработки;
3. совокупность количественных данных, выражаемых при помощи цифр или кривых, графиков и используемых при сборе и обработке каких-либо сведений;
4. сведения, сигналы об окружающем мире, которые воспринимают организмы в процессе жизнедеятельности;
5. в биологии – совокупность химически закодированных сигналов, передающихся от одного живого организма другому (от родителей – потомкам) или от одних клеток, тканей, органов другим в процессе развития особи;
6. в математике, кибернетике – количественная мера устранения энтропии (неопределенности), мера организации системы;
7. в философии – свойство материальных объектов и процессов сохранять и порождать определенное состояние, которое в различных вещественно-энергетических формах может быть передано от одного

объекта другому; степень, мера организованности какого-либо объекта (системы).

Определения 1-4 трактуют информацию как сведения, данные, сообщения, сигналы, подлежащие передаче, приему, обработке, хранению и отражающие реальную действительность или интеллектуальную деятельность. В этом смысле информация – отображение в некоторое пространство символов. В дальнейшем будем называть ее отображающей информацией.

Во всех определениях, кроме последнего, информация рассматривается как объединяющая категория, которую можно определить через более простые категории. В последнем определении информация – изначальная, неопределяемая категория, которую нужно изучать через ее свойства, то есть информация материальна (как и вещество и энергия), проявляется в тенденции (свойстве) материи к организации (как энергия к способности к взаимодействию), выражает способность организованной материи к предопределению своих состояний (связывающей пространственные свойства с временными).

То, что это действительно так, вытекает из следующих, наблюдаемых в повседневной практике, свойств систем. При неизменной морфологии их поведение и функционирование в значительной степени определяются информацией, доставляемой рецепторными подсистемами. Аналогично энергия определяется как общая мера различных процессов и видов взаимодействия.

Физически информация определяет предсказуемость свойств и поведения объекта во времени. Чем выше уровень организации (больше информации), тем менее подвержен объект действию среды.

Возможно, что формы организации взаимно преобразуются в строгих количественных соотношениях, выражаемых при помощи информации. Доказать это можно только экспериментально (как и для количественных форм движения, т.е. энергетических эквивалентов). Количество и ценность информации – взаимодополняющие категории. Можно говорить о количестве ценной информации применительно к заданной цели подобно тому, как мы говорим о количестве ценного вида энергии или вещества.

Формальное определение первичных понятий всегда сложно. Определяя энергию как способность производить работу, мы с самого начала допускаем ошибку: энергия – не способность, а нечто, обладающее способностью. Не смотря на это, мы пользуемся этим определением, понимая и признавая его неполноценность. Энтропия есть мера беспорядка, неэнтропия – мера порядка, организованности. Но определения организованности в физике нет,

существует интуитивное восприятие этого понятия. Организованность есть первичная категория.

Организованность, упорядоченность системы – способность предопределять свою перспективу, свое будущее. Разумеется, перспектива системы зависит и от среды. Но ведь и способность системы совершать работу зависит от среды, что не влияет на определение энергии.

Чем беспорядочнее система, тем больше зависит ее перспектива от случайных факторов (внутренних и внешних). Повышение упорядоченности означает увеличение зависимости между факторами, определяющими поведение (состояние) системы. Применительно к внешним случайным факторам это означает наличие в системе возможностей установления соответствия между свойствами среды и функциями системы. Установление соответствия требует отображения среды в системе.

Таким образом, меру организованности можно понимать как потенциальную меру предсказуемости будущего системы, количественную характеристику возможности предвидения состояния (поведения) системы. Информация об организации системы – это количественная характеристика возможности предвидения ее состояния (поведения) на соответствующем уровне детализации системы. Информация о среде – количественная характеристика возможности предвидения воздействия среды. Информация об организации системы составляет часть ее внутренней информации.

В теории информации рассматривают синтаксический, семантический и прагматический аспекты информации.

На синтаксическом уровне рассматриваются внутренние свойства текста (структура), т.е. отношение между знаками (алфавита), отражающие структуру данной знаковой системы.

На семантическом уровне анализируются отношения между знаками и обозначаемыми ими предметами, действиями, качествами, т.е. смысловое содержание текста.

На прагматическом уровне рассматриваются отношения между текстом и тем, кто его использует, т.е. ценность информации для потребителя. При этом информацию оценивают как и любой продукт по тем потребительским свойствам, которыми она обладает (например, содержательностью информации, удобством для восприятия, своевременностью). Кроме того, ценность информации характеризуется ее актуальностью, надежностью, достоверностью.

Часто ценность информации выражается через приращение вероятности достижения цели: если до получения информации вероятность достижения

цели была p_0 , а после получения информации – p_1 , то величина ценности информации определяется по формуле Харкевича:

$$I_0 = \log_2(p_1/p_0).$$

Очевидно, что она может быть и отрицательной, если $p_1 < p_0$

Информация со временем снижает свою ценность. Возможны 2 причины:

1. обесценение информации в конечном источнике по мере ее использования;
2. старение информации, из-за задержки при ее передаче и переработке.

При информационном подходе исследуемая система в наиболее абстрактном виде может быть представлена иерархической структурой, на нижнем уровне которой находятся участки технологического процесса, а на более высоких – узлы управления, связанные с объектами управления и между собой каналами связи.

Первый информационный уровень – это уровень непосредственного управления технологическими операциями, который осуществляют рабочие и автоматы (роботы). На следующих образуются производственно-технологические подразделения (участки, цехи) и предприятия. В зависимости от поставленных задач исследователь сам определяет количество уровней в системе, существо каждого элемента структуры системы и их количество.

Информация, циркулирующая в системе может проявляться в 3-х формах:

- осведомляющая – движущаяся преимущественно от объектов управления к соответствующим узлам управления (как правило, осведомляющая информация передается по каналам обратной связи);
- управляющая – движется в обратном направлении и содержит указания, директивы и т.п.;
- преобразующая – определяет закономерности поведения узла управления и алгоритмы функционирования его отдельных элементов.

Узлы управления преобразуют осведомляющую информацию в управляющую с помощью преобразующей информации, заключенной в структуре и алгоритмах узла управления.

По мере движения вверх по иерархии информация постепенно обобщается, преобразуется в различных узлах управления и поступает в находящийся на вершине иерархии главный узел управления.

Этот узел, используя полученную осведомляющую информацию, генерирует управляющую информацию, которая двигаясь вниз детализируется в нижележащих узлах. Чем меньше требуется информации от вышестоящих узлов для формирования информации управления в некотором i -ом узле, тем более автономен этот узел.

Для достижения цели и подцелей управления (реализации дерева целей) весьма важно, чтобы в соответствующие узлы управления стекалась только ценная информация и чтобы ее было достаточно. Поэтому в процессе управления сложными системами на первый план выступают смысловые и ценностные характеристики информации.

Осведомляющая и управляющая информация может генерироваться и потребляться как внутри системы управления, так и вне ее, образуя информационные потоки, связывающие систему управления с внешней средой.

Фактически информационные потоки системы являются отображением функциональной и структурной организации изучаемого объекта в ракурсе механизма принятия решений внутри системы.

К параметрам информационных потоков относят:

1. общее время реагирования;
2. интенсивность;
3. избыточность;
4. дублирование;
5. нестабильность;
6. погрешность;
7. формы представления.

Для количественной оценки информационных потоков в экономических системах известны следующие характеристики:

1. коэффициент трансформации x/y , где x – число входных показателей, а y – число выходных показателей, имеющих размерность потока за определенное время- час, день, месяц, год. В вертикальных связях данный коэффициент получил название коэффициента сжатия.
2. коэффициент комплексности $\sum k_i/x$, где k_i – число участий входного показателя i в разработке других показателей.
3. коэффициент стабильности s/x , где s – число оставшихся неизменными за определенный период показателей (показывает степень устойчивости информационных массивов).

При информационном описании систем принято также использовать понятие количество разнообразия. При одном единственном состоянии системы разнообразие отсутствует, оно появляется, как минимум, при

наличии двух возможных состояний изучаемой системы. В общем случае объект наблюдения А может с некоторой вероятностью находиться в одном из k различных состояний.

Количество разнообразия или неопределенность, характеризующую объект, принято оценивать средневзвешенной величиной логарифмов вероятностей различных состояний (исходов). Мету неопределенности, $H(p)$, или энтропию (по аналогии с известным понятием термодинамики) ввел К. Шеннон:

$$H(p) = \sum p_i \cdot \text{Log}_2(1/p_i),$$

где p_i – вероятность i-го состояния системы.

Информация противоположна энтропии, являющейся мерой неопределенности состояний изучаемого объекта. Информация ограничивает разнообразие, снижает энтропию, устраняет неопределенность частично или полностью. По Шеннону, показатель информации о событии равен уменьшению энтропии в системе, вызванной неопределенностью наступления события. Однако не следует забывать, что теория информации разрабатывалась Шенноном для решения задач передачи информации по каналам связи в технических системах, а следовательно, ее применение при информационном описании сложных экономических систем весьма проблематично и в каждом отдельном случае требует отдельного доказательства.

Информация для узла управления проявляется в 2-х видах – как задающая цель и как изменяющая или задающая алгоритм управления. Все это приводит к тому, что информационная структура управления сложной системой является графом с преимущественно упорядоченными вершинами, который лишь в частном случае сводится к иерархическому дереву.

В ходе информационного анализа в системе выделяют уровни иерархии управления, отдельные узлы управления (информационные элементы) и связывающие их потоки информации. Вся система представляется в виде направленного графа, вершинами которого служат узлы управления, а ребрами – информационные потоки. Направление ребер соответствует направлению информационных потоков. Поскольку потоки управляющей и осведомляющей информации имеют, как правило, противоположную направленность, то в общем случае строится 2 графа.

Движение информации в экономической системе носит довольно сложный характер и полностью отражает иерархическую структуру экономического объекта (см. рис.).

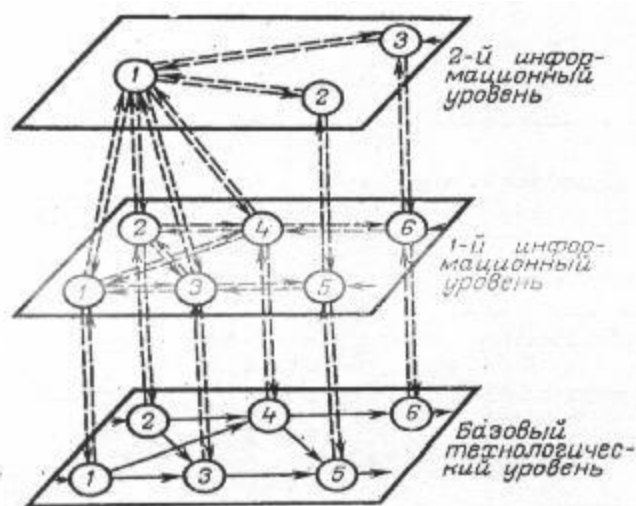


Рис. – Движение информации в экономической системе

Результатом информационного описания системы является:

1. определение состава информационных элементов,
2. состава и структуры информационных потоков между ними,
3. количество и ценность информации, поступающей (исходящей) в (из) информационных элементов;
4. алгоритмов преобразования информации в соответствующих информационных элементах.

Совокупность функционального, морфологического и информационного описаний позволяет отразить главные свойства систем.

Функциональные процессы в системе тесно связаны с информационными. Источником информации для функционирования системы является внутренний ресурс и среда, а носителем – вещество (морфологическая информация) и энергия (сигналы). Восприятие и использование информации из среды также требует внутренней информации.

Пример 1. При износе механической детали или электронного блока теряется информация (потери вещества могут быть либо незначительными, либо вовсе отсутствовать). Заменить деталь исправной означает восполнить информационную потерю системы (в данном случае при помощи системы более высокого порядка). Априорная информация заключена в остальных деталях (блоках) системы, которые предполагаются исправными и без которых новая деталь бесполезна.

Пример 2. Живые существа воспринимают морфологическую информацию через пищу и используют ее для восстановления и развития организма. Информация, определяющая функции пищеварения и усвоения морфологической информации, сосредоточена главным образом в ДНК, РНК и ферментах пищеварительных органов.

Пример 3. Человек воспринимает образную и семантическую информацию, поступающую от рецепторов, благодаря понятийному и категориальному аппарату, выработанному ранее. Язык эмоций категорий искусства не может быть выражен ни на каком естественном или формальном языке. Искусство требует для восприятия априорных данных, т.е. определенной подготовки. Фраза «Истинное искусство понятно всем» означает только то, что эстетическое наслаждение, порождаемое некоторыми видами искусства, основано на весьма распространенных и легко усваиваемых понятиях, возникающих у человека в ранние годы жизни в процессе общения с природой и другими людьми. Ассоциация возникает в процессе формирования личного опыта: «Запах может напоминать нам весь цветок, но только если он был нам ранее известен». Общественное мнение формируется на основании обобщенных наблюдений и укоренившихся представлений.

Существует экстремальная зависимость количества воспринимаемой информации от количества априорной информации. При нулевой и бесконечной априорной информации из носителя черпается нулевая информация. Существует некоторое значение априорной информации, при котором усваивается максимальная информация. Для максимального усвоения, морфология носителя априорной информации должна быть достаточно близкой к морфологии носителя новой информации (элементы новой детали должны сопрягаться с остальными деталями машины).

Результатом структурного, функционального и информационного описания системы должно быть полное представление о механизме ее функционирования. Особенности системного подхода в данном случае заключаются в следующем:

1. при системном рассмотрении объектов мы получаем информацию о связи их возможных состояний с состояниями других объектов;
2. применение системного подхода в отдельных случаях дает неискаженное представление об истинном механизме функционирования системы, что является лучшей альтернативой распространенному методу "черного ящика";
3. при рассмотрении практически любого объекта обнаруживаются определенные ограничения, накладываемые на его возможные состояния. Эти ограничения являются важным фактором, воздействующим на процесс управления объектом. Применение системного подхода позволяет максимально уточнить модель ограничений состояния объекта путем учета ограничений,

накладываемых структурой и механизмом функционирования системы на возможные состояния объекта;

4. при решении задач планирования и оптимизации относительно сложных систем применение системного подхода дает решение, оптимальное именно при учете системного характера рассматриваемого объекта, которое может качественно отличаться от решения, полученного без применения системного подхода.

Раздел 9. Основы теоретико-множественного описания и анализа систем.

Система объекта. Структура системы. Полное множество состояний системы. Функция ограничения на полном множестве состояний. Мера нечеткости множества состояний системы. Системная сложность. Предел Бремермана. Вычислительная сложность задачи. Мера сложности системы. Классы систем. Методы упрощения систем. Характеристическая функция. Динамическая система. Устойчивость динамических систем. Управляемость динамических систем. Интегративные свойства систем. Качество системы. Эффективность. Показатели эффективности.

Система объекта

Объектом познания является часть реального мира, которая выделяется и воспринимается как единое целое в течение длительного времени. Объект может быть материальным и абстрактным, естественным и искусственным. Реально объект обладает бесконечным набором свойств различной природы. Практически в процессе познания взаимодействие осуществляется с ограниченным множеством свойств, лежащих в пределах возможности их восприятия и необходимости для цели познания. Система объекта задаётся на множестве отобранных для наблюдения свойств. Процедура задания системы включает ряд операций: назначение переменных, параметров и канала наблюдения.

Каждому свойству объекта назначается переменная, с помощью которой суммируется изменение проявлений свойства. Множеству наблюдаемых проявлений свойства ставится в соответствие множество значений переменной.

$$D: S_i = [S_{i,j}, j=\{1,N\}] \rightarrow X_i = [X_{i,j}, j=\{1,N\}],$$

где S_i – i -ое свойство, X_i – переменная.

Процедура наблюдения свойств объекта включает базу и канал наблюдения. Под базой наблюдения понимается признаки различения одного проявления свойства от другого. Типовыми базами являются время, пространство, группа и их комбинации. Операционное выражение базы будем

познавать параметром наблюдения. Операцию назначения значению параметра значения переменной назовём каналом наблюдения. В этом смысле необходимо различать чёткий и нечёткий канал наблюдения. Чёткий канал назначает одному значению параметра одно значение переменной. В этом случае система задаётся на чётком множестве значений переменных. В нечётном канале наблюдения не существует однозначного решения о том, какое значение переменной назначить определённому значению параметра. Поэтому система задаётся в виде нечётких множеств состояний переменных.

Формально система может быть представлена в виде множества:

$$S = (X, T, R, Z),$$

где X – множество переменных, T – множество параметров, R – отношения на множества X и T , Z – цель исследований.

Отношения между переменными и параметрами здесь понимаются в самом широком смысле, включая как ограничение, сцепление, соединение и т.д. В дальнейшем изложении материала смысл отношений будет ограничен понятиями следующего вида:

1. Отношения эквивалентности, имеющее смысл «соседства» значений переменных системы на полном множестве состояний;

$$X_{1,j}, X_{2,p}, \dots, X_{k,c} \in C1$$

где $X_{k,n}$ – значение k -ой переменной.

2. Отношения упорядоченности переменных по роли, вкладу и т. д в достижение цели

$$C2 \subset X \times X$$

3. Отношения упорядоченности переменных на множестве параметров

$$D \subset X \times T$$

4. Отношения упорядоченности вида

$$\mathcal{E} \subset C1 \times C2 \times D$$

Эти виды отношения отражают соответственно структурные (C_1, C_2), динамические (X) и интегративные свойства системы (\mathcal{E}), которые объединяют структурные и динамические (качество, эффективность, безопасность, живучесть и т.д.).

Структура системы

Под структурой системы понимается устойчивое множество отношений, которое сохраняется длительное время неизменным, по крайней мере в течение интервала наблюдения. Структура системы опережает определенный

уровень сложности по составу отношений на множестве переменных и их значений или что эквивалентно, уровень разнообразия проявлений объекта.

Для приведенных уровней разнообразия справедливо соотношение $S_4CS_3CS_2CS_1$.

Формально структура представляет упорядоченности переменных и их значений по некоторому заданному относительно цели фактору. Физически (если такая интерпретация возможна) структура представляет аналитические и функциональные связи между элементами системы.

Полное множество состояний системы

В системе заданной на множестве переменных $X = [X_n, i=\{1, N\}]$, каждая переменная изменяет свое значение в некоторой области значений заданной множеством физически различных значений $X_n = \{1, N\} [X_{n,k}, k=\{1, N\}]$. Зафиксированное значение всех переменных относительно одного значения параметра представляет вектор состояния системы

$$C_i = [\alpha_{1,k1}, X_{2,k2}, \dots, X_N, k_N]$$

Множество всех возможных векторов состояний $C = [C_i, i=\{1, |C|\}]$, образует полное множество состояний, где $|C| = \prod k_n$

Реально состояние системы не равнозначны. Одни более, другие менее предпочтительны, другие запрещены. Это обстоятельство задается в виде функции ограничения.

Функция ограничения на полном множестве состояний

Состояние системы на полном множестве состояний неравнозначны. Одни состояние более другие менее предпочтительны, третьи практически не осуществлены. Неравнозначность состояния задается в виде функции ограничения. В общем случае она представляет собой отображение полного множества состояний:

$$f_0: C \rightarrow P,$$

где P – заданное множество.

Предположим, что на множестве интервалов наблюдений объекта для функции ограничения справедливо условие:

$$f_0 = 1, \text{ если } c \in C^{\wedge},$$

$$f_0 = 0, \text{ если } c \in \neg_{i,n}; C^{\wedge},$$

где c – вектор состояния системы, C^{\wedge} – подмножество полного множества состояний.

В этом случае функция ограничения образует замкнутое множество состояний C^{\wedge} . Такие системы будем называть замкнутыми. В обратном случае, когда от интервала к интервалу наблюдения состав элементов C^{\wedge} меняется, т.е. функция ограничена для интервалов наблюдений, $f_0^i \neq f_0^j$ не множественны, то система будет разомкнутой.

Рассмотрим отображение в интервале наблюдения T множества моментов времени измерений примененных на множестве наблюдаемых состояний C^{\wedge} .

$$f_0 : C^{\wedge} \rightarrow T, T \rightarrow C^{\wedge}$$

Здесь возможны два случая. В одном отображение однозначно, в другом – многозначно.

В случае однозначного отображения, т.е. когда одному значению времени соответствует только одно состояние системы, последняя будет детерминированной. Если отображение многозначно, т.е. одному значению времени допускается два и более состояний, то система будет стохастической.

Для детерминированной системы функция ограничения имеет вид:

$$f_0 = 1, \text{ если при } t = t_i, C = C_i$$

$$f_0 = 0, \text{ если при } t = t_i, C \neq C_i$$

У стохастической системы в момент наблюдения $t = t_i$ состояние системы $C \in C^{\wedge}$ является случайным. Ограничение полного множества состояний системы в этом случае задается нечеткими функциями типа вероятности, возможности, правдоподобности и др. В общем случае они представляют отображения вида:

$$f_0 : |C| \rightarrow [0,1]$$

При выборе функции ограничения исходят из соотношения мощности полного множества состояний $|C|$ и мощности множества моментов наблюдения $|T|$. Если $|C| \leq |T|$, то предпочтительной является функция вероятности. В обратном случае $|C| \geq |T|$, предпочтительней функция возможностей.

Функция вероятности задается в следующем виде:

$$P = [P_t, t = \{1, |T|\}],$$

$$\text{где } P_{t<} = N_k / \sum N_k$$

N_k – число наблюдаемых состояний C_k .

$|T| = \sum N_k$ – общее число наблюдений

Функция возможности определяется следующим образом:

$$W = [W_k, k = \{1, k\}]$$

Где $W_k = N_k / \max N_i, i \in |C|$

Из приведенных формул видно, что в первом случае наблюдаемое число состояний системы C_k нормируется относительно общего числа наблюдения $|T|$, во втором относительное число состояний с наибольшим значением.

C_k	O_1	O_2	O_3	N_k	P_k	W_{k1}
1	0	0	0	10	0-1	0,532
2	0	0	1	5	0,05	0,173
3	0	1	0	20	0,2	0,164
4	0	1	1	5	0,05	0,175
5	1	0	0	0	0	06
6	1	0	1	30	0,3	1,07
7	1	1	0	10	0,1	0,338
8	1	1	1	20	0,2	0,61
				$\sum N_k=100$	$\sum P_k=1$	$SW_{k \neq 1}$

Мера нечеткости множества состояний системы

У стохастических систем полное множество состояния с позиции их допустимости представляет собой нечеткое множество.

При этом уровень нечеткости может меняться в значительных пределах. Например, если вероятности состояний $P(C_i) = P(C_j)$ равны, то он максимальный, а при уровне $P(C_i) = 1$ он минимален. Поэтому естественно надо ввести меру нечеткости полного множества состояний уровня нечеткости.

Для вероятностных систем нечетность задается через множество вероятностей состояния системы в виде отображения

$$H : P \rightarrow [0, \infty]$$

В качестве меры уровня нечеткости принята энтропия []. Она определяется по формуле:

$$H = -\sum p(C_i) \log_p(C_i)$$

Из этой формулы видно, что если $p(C_i) = 1$, то $H = 0$, при $p(C_i) = 1/|C|$ $H = \log_2|C|$.

Таким образом, величина энтропии монотонно меняется в пределах:

$$0 \leq H \leq \log_2|C|$$

Для систем с поперечным множеством состояний можно ввести нормированную энтропию:

$$H^{\wedge} = H/\log_2|C|$$

Ее величина меняется в области значений

$$0 \leq H^{\wedge} \leq 1$$

Для возможностных систем аналогично нечеткость вводится через множество возможностей. А мера уровня нечеткости через возможностную

энтропию. С формулами расчета этой энтропии можно познакомиться в работе [].

Рассмотрим систему на множестве интервалов наблюдения $[T_1, T_2, T_3, \dots]$. В этом случае возможно, что от интервала наблюдения $H_i = H_j$, уменьшает $[H_1 > H_2 > H_3 > \dots]$ или возрастает $[H_1 < H_2 < H_3 < \dots]$. В зависимости от характера интервалов энтропии на множестве интервалов наблюдения различают системы:

- закрытые, если $[H_1 < H_2 < H_3 < \dots]$
- открытые, если $[H_1 \geq H_2 \geq H_3 \geq \dots]$

Системная сложность

Системная сложность рассматривается как условие для системных задач в виде предпочтения на множестве вариантов систем объекта. Мера системной сложности в этом смысле представляет размерность варианта задачи, по которой определяется временная и пространственная функция сложности алгоритма решения задачи, предел практической разрешимости задачи.

Анализ системной сложности должен дать ответ на следующие фундаментальные вопросы. Во-первых, о разрешимости. Если задача неразрешима, то необходимо ее переформулировать. Во-вторых, следует определить класс сложности задачи. Класс сложности задачи можно определить следующим показателями: пределом Бремермана, пределом возможностей вычислительной техники, пределом сложности варианта системы объекта.

Предел Бремермана

Для решения системной задачи данные о системе объекта необходимо физически закодировать. Общим способом кодирования данных является их представление в виде энергетических уровней величиной ΔE энергии решения системной задачи данные о системе объекта E , которой мы располагаем. Число энергетических уровней согласно принципу в этом случае будет равно $N = E/\Delta E$. Максимальное число физически разрешимых уровней для заданного количества энергии определяется неопределенности Гейзенберга. Согласно этого принципа величина уровня должна удовлетворять условию $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$, где Δt – длительность интервала наблюдения $h = 6.625 \cdot 10^{-27}$ эрг/с – постоянная Планка. Из этого следует:

$$N \geq E \cdot \Delta t / h$$

Тогда с учетом формулы Эйнштейна $E = mc^2$ (где $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с – скорость света, m – количество массы), получим:

$$N = mc^2 \cdot \Delta t / h$$

Отсюда следует, что измеритель массой 1 г за время 1 сек может обработать не более $N = 1,36 \cdot 10^{47}$ бит данных.

Представим гипотетический измеритель массой равной массе Земли $m = 6 \cdot 10^{27}$ г. Этот измеритель за время равное времени существования Земли q 10 лет смог бы обработать порядка 10^{93} бит данных. Это число обычно называют пределом Бреммермана.

Вычислительная сложность задачи

Предел Бреммермана дает оценку сложности задачи с точки зрения объекта данных, который необходимо обработать для решения задачи. Однако возможны условия, при которых задача может находиться за пределом Бреммермана, но практически неразрешимой. Причиной этого является размерность временной и пространственной функцией вычисления, под которым понимается соответственно время и объект памяти ЭВМ, которые необходимы для реализации алгоритма.

Разбор этих вопросов выходит за пределы нашего предмета и рассматривается в общей теории алгоритмов.

Мера сложности системы

Понятие «сложность объекта» как части внешнего мира (окружающей среды) широко используется в философии и естествознании. Следует различать две модификации сложности: (когда свойства целого сводится к сумме свойств составных элементов) и неоддитивную сложность-целостность, свойство которой не сводится к сумме свойств ее элементов. Та или другая модификация используется в зависимости от условий и задачи. Соответственно разработаны два основных принципа оценки сложности. В основе первого лежит оценка объекта информации необходимой для описания системы объекта. В основе второго – объекта информации необходимой для разрешения нечеткости (неопределенности) системы.

Описание аддитивной или иначе дескриптивной сложности сводится к оценке числа элементов системы, их состояний и отношений между ними. Информация необходимая для списания этой модификации сложности понимается в синтаксическом смысле. Поэтому эту модификацию иначе

называют дескриптивная сложность. Мера дескриптивной сложности $I(X_1)$ должно удовлетворять следующим условиям

1. $I(\phi) = 0$
2. Если $X_1 \subset X_2$, то $I(X_1) < I(X_2)$
3. Если X_1 и X_2 изоморфны, то $I(X_1) = I(X_2)$
4. Если $X_1 \cap X_2 = \emptyset$, то $I(X_1 \cap X_2) = I(X_1) + I(X_2)$

Дескриптивная мера сложности обеспечивает потребности решение системных задач, объектом которых являются детерминированные системы. Однако в классе недетерминированных систем эта мера сложности уже неприемлема, так как она не позволяет учесть сложность, которую вносит нечеткость стохастической системы. В этом случае необходимо использовать другой принцип оценки сложности в виде объема информации необходимого для разрешения нечеткости полного множества состояний. Здесь также имеется в виду синтаксическая информация. Однако оценка ее объекта основывается на мерах нечеткости. Сложность систем с этой позиции изучалась с разных сторон. Однако наиболее конструктивными представляются результаты, полученные в теории информации.

В теории информации достаточно хорошо разработан механизм оценки сложности вероятностных систем на основе статистической меры количества информации предложенной К.Шенноном. Здесь за количество информации необходимого для описания системы принимается величина равная энтропии системы. Рассмотрим ряд важных энтропийных оценок сложности на принципе решения задач.

1. Пусть система S содержит N переменных, каждая переменная имеет K состояний, и пусть все состояния системы равновероятны. У такой системы мощность полного множества состояний равна $|C| = k^N$, вероятностная функция ограничений имеет вид $P = \{P_i = P_j = 1/k^N\}$. В этом случае энтропия будет равна

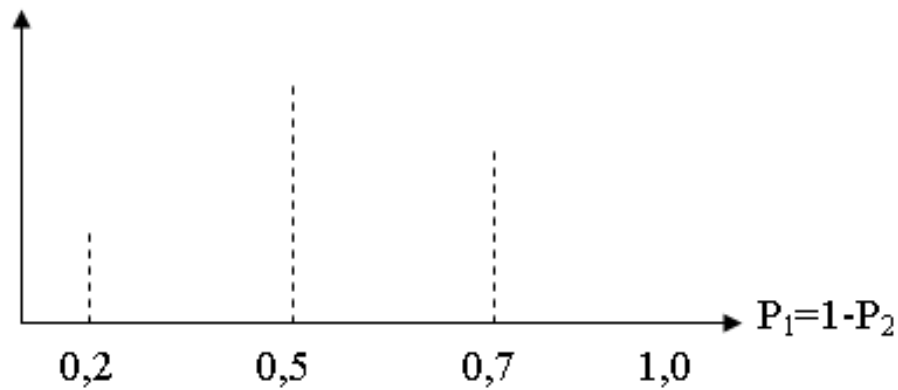
$$H = N \cdot \log(K)$$

Нетрудно видеть следующее. Для систем $S(N_1, K)$ и $S(N_2, K)$, если $N_1 > N_2$, то $H_1 > H_2$, для системы $S(N_1 + N_2, K)$, $H = H_1 + H_2$. Для систем $S(N, K_2)$, если $K_1 > K_2$, то $H_1 > H_2$.

Из этого следует, что энтропийная мера сложности обладает всеми свойствами дескриптивной сложности.

2. Пусть даны системы S_1, S_2, S_3 , состоящие из одной переменной с двумя состояниями, т.е. $K=1$, $N=2$. Вероятностные функции ограничения полного множества состояний соответственно имеют вид $P_1=(P_1=0,2, P_2=0,2)$, $P_2=(P_1=0,5, P_2=0,5)$, $P_3=(P_1=0,7, P_2=0,3)$.

На рис. показаны значения энтропий для этих систем.



Как видим три системы, обладающие одинаковым множеством элементов и состояний, имеют разные уровни энтропийной сложности. Следовательно, энтропийная мера сложности учитывает количественные свойства элементов, что не позволяет сделать дескриптивное.

Классы систем



Методы упрощения систем

В ходе решения системных задач по разным причинам могут возникать потребности упрощения системы. Такими причинами являются сложность физической интерпретации результатов решения задачи, малый объем наблюдений или недостаточные вычислительные и временные ресурсы.

Известно два основных подхода к упрощению систем: сокращение множества переменных и объединение состояний системы в классы эквивалентности.

В общем виде задача упрощения состоит в следующем. Для системы заданной на множестве переменных X с полным множеством состояний S необходимо найти вариант упрощенной системы на подмножестве переменных $X' \subset X$ или подмножестве состояний $S' \subset S$.

При исключении переменных общее число возможных вариантов упрощения равно

$$L_X = 2^{|X|} - 2$$

Рассмотрим систему из трех переменных X_1, X_2, X_3 . Варианты упрощения системы путем исключения переменных приведены на рис.

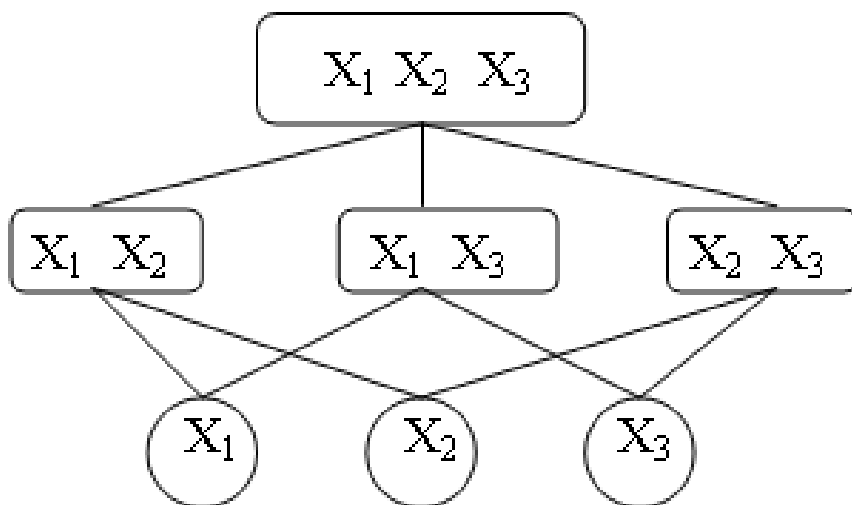


Рис. – Упрощение системы путем исключения переменных

При объединении состояний системы в классы эквивалентности общее число вариантов упрощения равно

$$L_C = \sum L_{|C|}^i$$

Целью упрощения является смещение уровня сложности системы при сохранении минимума нечеткости. Оба эти условия противоречивы. Поэтому выбор подходящего варианта необходимо производить по близости функций ограничения на полном множестве состояний исходной и упрощенной систем.

Рассмотрим функцию ограничения упрощенной системы. Пусть X и $X_1 \subset X'$, f и f' соответственно множество переменных и функции ограничения на множестве состояний исходной и упрощенной системы. Полное множество состояний C' упрощенной системы есть проекция вида

$$C' = \text{Pr}_X \bullet C$$

Поэтому функция ограничения f' также является проекцией

$$f' = \text{Pr}_X \bullet f$$

Рассмотрим пример. Пусть дана система на множестве переменных X_1, X_2, X_3, X_4 . В таблице приведено полное множество состояний и значение функций ограничения. Выберем вариант упрощения $(X_1 X_2 X_3 X_4) \rightarrow (X_1 X_2)$. У упрощенной системы состояние C'_i включает состояния C_1, C_2, C_3 исходной системы, состояние C'_2 состояния C_4, C_5 , C'_3 состояния C_6, C_7, C_8 .

C_i	X_1	X_2	X_3	X_4	f_i	C'	X_1	X_2	f'_i
1	0	0	0	0	0,2	1	0	0	$0,2+0,2+0,1=0,52$
2	0	0	0	1	0,2	2	0	1	$0,1+0,1=0,23$
3	0	0	1	0	0,1	3	1	0	$0,1+0,1+0,1=0,34$

4	0	1	0	0	0,1
5	1	0	0	0	0,1
6	0	1	0	1	0,1
7	1	0	0	1	0,1
8	1	0	1	0	0,1

Полное множество состояний упрощенной системы и значение функции ограничения приведены в табл.

Аналогичным образом может быть найдена функция ограничения в случае упрощения путем объединения состояний системы в классы эквивалентности.

Близости функций ограничения может быть выражена через метрическое расстояние между ними. Существует много разных типов метрических расстояний. Поэтому ограничимся рассмотрением двух следующих модификаций.

Класс расстояний Минковского определяется следующей формулой [].

Структурированная система.

Структурирование системы заданной на множестве переменных X представляет собой разделение исходного множества переменных на подмножества $X^i \subset X$. Подмножество структурированной системы будет называть подсистемами структурированной системы.

Подмножество структурированной системы должны удовлетворять следующим условиям.

1. Все подмножества задаются на одном параметрическом множестве.
2. Каждое подмножество X^i имеет общие переменные хотя бы с одним подмножеством т.е. справедливо следующее

$$X^1 \cap (X_2 \cup X_3 \cup X^m) \neq \emptyset$$

$$X^2 \cap (X_1 \cup X_3 \cup X^m) \neq \emptyset$$

$$\text{-----}$$

$$X^m \cap (X_1 \cup X_2 \cup X^{m-1}) \neq \emptyset$$

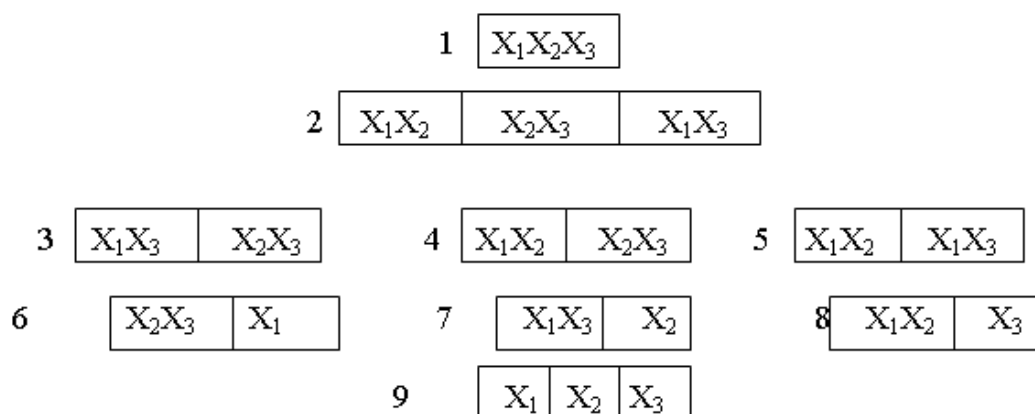
Имеет ряд причин требующих представления системы в виде структурированной. Во-первых нередко формирование системы происходит на множествах наблюдений полученных в разное время и в разных местах. Во-вторых должным образом обоснованная структурированная система может выявлять свойства, которые в явном виде не проявляются в исходной системы. В-третьих высокий уровень сложности системы может потребовать исследования системы по частям. Отсюда вытекают две возможные задачи:

1. Заданы системы на множество $[X^1, X^2, X^3, \dots]$. Требуется сформировать структурированную систему и найти соответствующую исходную систему на множестве $X = [X^1 \cup X^2 \cup X^3 \cup \dots]$.

2. Задана система. Требуется найти структурированную систему, которая выявляет равные свойства.

Любая система может иметь множество соответствующих ей структурированных систем.

Пример. Задана система на множестве $X = (X_1, X_2, X_3)$. Соответствующие ей варианты структурированных систем приведены на рис.



В этом множестве вариантов как видно не все удовлетворяют условиям структуризации (6,7,8,9).

Поэтому очевидно, что возникает вопрос, какой вариант структуризации наилучшим образом представляет заданную систему. Здесь возможны различные подходы. В самом общем виде условие выбора варианта можно сформулировать так. Лучшим вариантом структурированной системы является тот, который использует всю информацию исходной системы и не содержит ни какой другой.

Для систем, у которых определена функция поведения, это условие можно определить как принцип максимума нечетности. Конкретно для систем с вероятностной функцией поведения это принцип максимума энтропии т.е. лучший вариант структурированной системы обладает наибольшей величиной нечеткости или энтропии.

Однако в практических задачах нередко условие может потребовать минимизировать ошибку выбора варианта структуризации. Это условие можно сформулировать, как принцип минимального риска. В его основе лежит сравнение вариантов структуризации по близости функций поведения исходной и структурированной системы.

В ряде работ оценку близости функций поведения двух систем предлагается производить на основе класс метрических расстояний Минковского

$$d(f_1, f_2) = \sum [f_1(d_k) - f_2(d_k)]^{1/p}$$

Функция ограничения полного множества состояний структурированной системы.

Пусть для исходной системы $S = (X, T, C, Z)$ сформирована структурированная система $S' = [(X^1, X^2, \dots, X^m), T, Z]$, где $X^i \subset X$. Каждую подсистему заданную на подмножестве α^i можно рассматривать как вариант упрощения исходной путем исключения переменных. Тогда если исходная система имеет функцию ограничения f , то подсистема будет иметь функцию ограничения вида

$$f^i = \text{Pr}_{X^i} f$$

Это соотношение можно конкретизировать исходная система S имеет полное множество состояний $C = (C_k, k=1, k)$, а каждая подсистема S^i структурированной системы $C^i \subset C$, тогда для значений f^i и f

$$f(CX) = f(C_k)$$

Пример. Дана система S' с переменными a_1, a_2, a_3 и функцией поведения f_n . Найти функции поведения подсистем S_1 и S_2 с переменными соответственно a_1, a_2 и a_2, a_3 .

d_k	a_1	a_2	a_3	$f_n(d_k)$
1	0	0	0	
2	0	0	1	
3	0	1	0	
4	0	1	1	
5	1	0	0	
6	1	0	1	
7	1	1	0	
8	1	1	1	

d'_k	a_1	a_2	f'
	0	0	$f_n(1)+f_n(2)=$
	0	1	$f_n(3)+f_n(4)=$
	1	0	$f_n(5)+f_n(6)=$
	1	1	$f_n(7)+f_n(8)=$

d''_k	a_2	a_3	f''
1	0	0	$f_n(1)+f_n(5)=$
2	0	1	$f_n(2)+f_n(6)=$
3	1	0	$f_n(3)+f_n(7)=$
4	1	1	$f_n(4)+f_n(8)=$

Пример. Даны три системы S_1, S_2, S_3 с переменными $(a_1, a_2), (a_2, a_3), (a_1, a_3)$ с функциями поведения f'_n, f''_n, f'''_n . Найти функцию поведения f_n системы S с переменными (a_1, a_2, a_3) .

Из уравнения $f^X(d) = \sum f(d)$ следует система уравнений

d'	a_1	a_2	f'_n
	0	0	0,4

d''	a_2	a_3	f''_n
	0	0	0,4

d'''	a_1	a_3	f'''_n
	0	0	0,4

	0	1	0,3
	1	0	0,2
	1	1	0,1

	0	1	0,2
	1	0	0,1
	1	1	0,3

	0	1	0,3
	1	0	0,1
	1	1	0,2

$$1. f_n'(1) = f_n(1) + f_n(2)$$

$$2. f_n'(2) = f_n(3) + f_n(4)$$

$$3. f_n'(3) = f_n(5) + f_n(6)$$

$$4. f_n'(4) = f_n(7) + f_n(8)$$

$$5. f_n''(1) = f_n(1) + f_n(5)$$

$$6. f_n''(2) =$$

$$7. f_n''(3) =$$

$$8. f_n''(4) =$$

$$9. f_n'''(1) =$$

$$10. f_n'''(2) =$$

$$11. f_n'''(3) =$$

$$12. f_n'''(4) =$$

Подставим в систему уравнений исходные данные для $f^X(d)$ и учитывая ограничения

$$0 \leq f_n(d) \leq 1$$

Получим решение в виде неравенства

$$0,3 \leq f_n(1) \leq 0,4$$

Пример. Этот пример содержит описание исследования политической ситуации и уровня цен на бирже США.

- a_1 – политическая партия президента. Демократическая-0. Республиканская-1.

- a_2 – Большинство в палате представителей. Демократическая-0. Республиканская-1.

- a_3 – Большинство в сенате. Демократическая-0. Республиканская-1.

- a_4 – Уровень цен на бирже. Падает-0. Растет-1

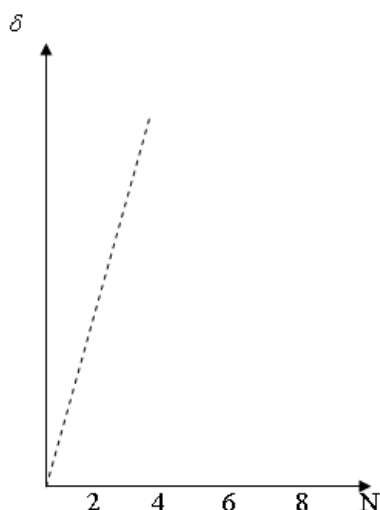
Данные наблюдения регистрировались в период 1897–1921г. каждые 4 года т.е. в 21 интервале. Результаты наблюдения приведены в таблице.

Поскольку имеется 21 наблюдение и 16 состояний системы, т.о. ограничение на множество состояний задается в виде функций распределения возможностей

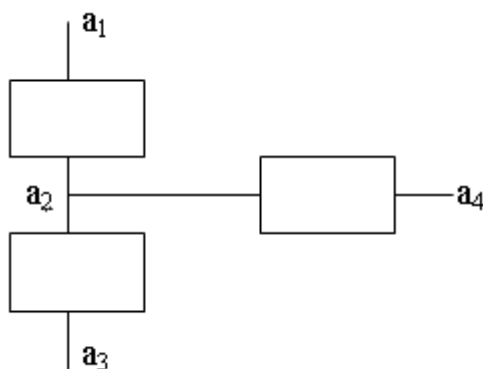
d1	a_1	a_2	a_3	a_4	$N(d_k)$	$f(d_k)=N(d_k)/\max_n(d_k)$
1	0	0	0	0	6	1,0
2	1	0	0	0	2	0,33
3	0	0	0	1	4	0,66
4	1	1	0	1	1	0,165
5	0	1	1	1	1	0,165
6	1	1	1	0	1	0,165
7	1	1	1	1	6	1,0

Варианты структурированных систем приведены в таблице в порядке возрастания меры расстояния $\delta = \sum (f(d_k) - f_C(d_k))^{1/p}$, где $f_C(d_k)$ функции поведения структурированной системы.

N		δ
1	123/134, 123/13/124/14 124/13	0,00072
2	123/13/124	0,01383
3	123/124/3	0,02774
4	124/3/23	0,03335
5	12/3/23/24	0,05796
6	1/3/23/24, 12/3/23/4	0,16677
7	1/3/23/4	0,28058
8	1/23/4	0,41389
9	1/2/3/4	0,5610



Интерпретация результатов решение задачи состоит в следующем. Из графика зависимости меры расстояния $\delta(f, f_C)$ от варианта структуризации видно, что он имеет характерную точку $N=5$. Структурированная система для варианта $N=5$ приведена ниже.



Из рисунка видно переменная a_2 является связующим звеном системы т.е. фактором определяющим цены на бирже в наибольшей степени.

Характеристическая функция

В системных задачах цель системы находится «в руках» пользователя. Это значит, что с позиции системных свойств цель представляет предпочтительное для пользователя ограничение свойств системы. Из этого следует, что система может рассматриваться относительно любой цели. И любая система в какой-то степени соответствует цели.

Близость действительных и желаемых свойств называется характеристикой системы относительно цели или просто характеристической функцией.

Пусть S множество систем, отличающихся свойствами, которые определяют понятия цели. Характеристическую функцию системы можно представить следующим образом

$$\omega : S \times S \rightarrow [0,1]$$

Это отображение удобно определить с помощью функции расстояния

$$\omega(S, S_9) = 1 - [\delta(S, S_k)]/\max_k \delta(S, S_k)$$

где $S, S_k, S_9 \in S$, $\max_k \delta(S, S_k)$ – максимальное расстояние на множестве $S \times S$.

Используя понятия характеристической функции введем понятие целенаправленной системы. Система S может рассматриваться как целенаправленная относительно заданной цели S_9 , если ее характеристика больше заданного порога

$$\omega(S, S_9) \geq \omega_0$$

Рассмотрим следующую задачу. Предложим, что цель определена с помощью функции поведения f^* на множестве систем $S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$ и для них определены функции поведения $F = (f_1, f_2, \dots, f_m)$.

Расстояние между системами определяется следующим образом

$$\delta(f_i, f^*) = \sum [f_i(d_k) - f^*(d_k)]^{1/p}$$

где $d_k \in D$ – множество состояний системы.

$K = |D|$ – мощность множества состояний.

Пусть система некоторого вычислительного комплекса задана на трех переменных X_1, X_2, X_3 представляющих состояние трех устройств комплекса: $X_i = 0$, если в момент наблюдения устройство не работает и $X_i = 1$ в обратном случае.

а)

X ₁	X ₂	X ₃	f ₁
0	0	1	0,15
0	1	0	0,2
1	0	0	0,1
1	1	0	0,25
1	1	1	0,3

б)

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	f
0	1	1	1	0,1
1	0	0	0	0,02
1	0	1	0	0,03
1	1	0	0	0,04
1	1	0	1	0,01
1	1	1	0	0,25
1	1	1	1	0,55

в)

X ₁	X ₂	X ₃	f ₂
0	1	1	0,1
1	0	0	0,02
1	0	1	0,03
1	1	0	0,05
1	1	1	0,8

г)

f ₁ *	f ₂ *	f ₃ *
0	0	0,2
0	0	0,2
0	0	0,2
0	0,5	0,2
1	0,5	0,2

Пусть система некоторого вычислительного комплекса задана на трех переменных a_1, a_2, a_3 , представляющих состояния трех его устройств: $a_i = 1$ если в момент наблюдения устройство работало, $a_i = 0$ в обратном случае.

a ₁	a ₂	a ₃	f ₁	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	f	a ₁	a ₂	a ₃	f ₂	f ₁ *	f ₂ *	f ₃ *
0	0	1	0,15	0	1	1	1	0,1	0	1	1	0,1	0	0	0,2
0	1	0	0,2	1	0	0	0	0,02	1	0	0	0,02	0	0	0,2
1	0	0	0,1	1	0	1	0	0,03	1	0	1	0,03	0	0	0,2
1	1	0	0,25	1	1	0	0	0,04	1	1	0	0,05	0	0,5	0,2
1	1	1	0,3	1	1	0	1	0,01	1	1	1	0,8	1	0	0,2
				1	1	1	0	0,25							
				1	1	1	1	0,55							

Множество состояний этой системы и функция поведения приведены в таблице а). Добавим к комплексу еще одно устройство, которое представлено переменной X_4 . Множество состояний новой системы состоящей из четырех переменных (X_1, X_2, X_3, X_4) и ее функция поведения представлены в таблице б). Используя понятие структурированной системы, найдем для подсистемы $S_n = (X_1 X_2 X_3)$ системы $S = (X_1 X_2 X_3 X_4)$ функцию поведения по формуле

$$f(d_k) = f(dx)$$

Ее значение приведено в таблице в). В таблице г) приведены три целевых функции f_1^*, f_2^*, f_3^* .

Теперь найдем характеристические функции системы $S = (X_1 X_2 X_3)$ относительно целевой функции поведения f_1^*, f_2^*, f_3^* . Они имеют значения

$$\omega(f_1, f_1^*) = 0,3; \omega(f_1, f_2^*) = 0,55; \omega(f_1, f_3^*) = 0,85.$$

И для системы $S = (X_1 X_2 X_3 X_4)$. Они имеют соответственно следующие значения

$$\omega(f_2, f_1^*) = 0,8; \omega(f_2, f_2^*) = 0,55; \omega(f_2, f_3^*) = 0,27.$$

Сравнивая изменения значение функции за счет добавлений переменной X_4

$$\Delta\omega_i = \omega(f_2, f_i^*) - \omega(f_1, f_i^*)$$

Получим соответственно значения $\Delta\omega_1 = 0,5$, $\Delta\omega_2 = 0$ и $\Delta\omega_3 = -0,58$. Эти значения показывают следующее. Относительно цели f_1^* переменная X_4 является переменной выбора цели, относительно f_2^* не является переменной выбора цели и для цели f_3^* является переменной отклонения от цели.

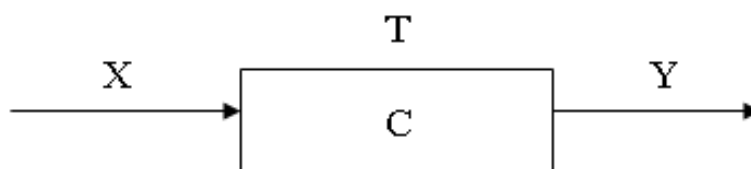
Таким образом, приведенный пример показывает, что введенное понятие характеристической функции системы представляет собой инструмент системного анализа, который позволяет решить задачи оценки целенаправленности систем и оценки роли, переменных в обеспечении целенаправленности.

Динамическая система

Динамическая система представляет математическую модель функционирования объекта анализа в пространстве и времени. Чтобы модель охватила широкий класс реальных объектов необходимо исходить из самых общих предположений о характере объекта. Поэтому система определяется в терминах наблюдаемых свойств и взаимосвязи между ними.

Под процессом функционирования понимается изменение состояния системы под действием внутренних и внешних причин. При этом состояние системы в фиксированный момент времени представляет вектор наблюдаемых значений переменных (проявлений свойств).

Определим динамическую систему в виде отношения на множествах X , Y , T , S .



Множества X и Y представляет воздействия на систему внешней среды и ее реакции. Далее будем их называть входными и выходными переменными. Множество T представляет множество $[t_0, t_1, t_2, \dots]$ множеств времени в интервале наблюдения.

$$Z_i = \langle a_1, m_1, a_2, m_2, \dots, a_N, m_N \rangle$$

Полное множество состояний системы образует фазовое пространство состояний динамической системы. Изменение состояния системы это переход из одной точки фазового пространства S^i в другую S_j . Он происходит под воздействием входных сигналов $X_k \subset X$. Процесс переходов $S^i \rightarrow S^j \rightarrow S_c \rightarrow \dots \rightarrow S_p$ происходит во времени.

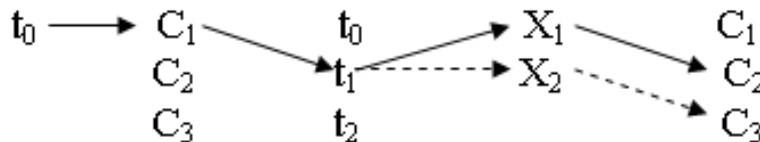
Рассмотрим процесс переходов системы в фазовом пространстве состояний.

Пусть в начальный момент наблюдения t_0 система находилась в некотором состоянии, который будем называть начальное состояние C_{t_0} . Множество всех возможных начальных состояний есть декартово произведение $t_0 \times C$. Множество всех возможных входных сигналов в моменты времени t_1, t_2, \dots тоже есть декартово произведение $T \times X$.

Множество всех возможных переходов системы в интервале наблюдения под воздействием входных сигналов представляет соотношение вида

$$(t_0 \times C) \times (T \times X) \times C$$

Процесс переходов системы в фазовом пространстве, наблюдаемый во времени, представляет собой множество отношений упорядоченности декартово произведение, что видно из рисунка.



Математическая модель этого процесса имеет вид отображения

$$P: (t_0 \times Z) \times (t_1 \times X) \rightarrow Z_{t1}$$

В общем случае ее можно записать в следующем виде

$$C_t = P \{(t_0, \dots, t), C_{t_0}, X\},$$

где P – множество операторов перехода системы в фазовом пространстве состояний.

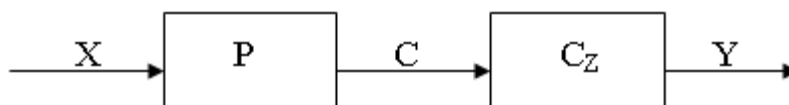
Выходная реакция системы в любой момент времени определяется состоянием системы в этот момент времени. Поэтому справедливо следующее соотношение.

$$Y_t = G\{Z_t\}.$$

где C_Z – множество оператор выходов.

Таким образом, динамическая система представляет собой множество $S = (P, G, X, Y, C, T)$.

Как следует из соотношений (и) это множество можно представить в виде декомпозиции



Наиболее общими свойствами динамических систем являются устойчивость и управляемость.

Устойчивость динамических систем

Пусть множество входных воздействий содержат элементы в интервале $(-\infty; +\infty)$ и пусть $p = [p_k, k=\{1, k\}]$ семейство операторов перехода, которые при заданном множестве входных воздействий X^\wedge реализуют полное множество Z^\wedge состояний системы мощностно $Z^\wedge = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_N$

Реальный объект имеет вполне определенный оператор переходов $p_k \subset p$ и находится под воздействием определенного множества входных сигналов $X \subset X^\wedge$. Если для заданных X и p_k существует соотношение

$$Z_t = p_k\{(t_0, t), Z_{t_0}, X\},$$

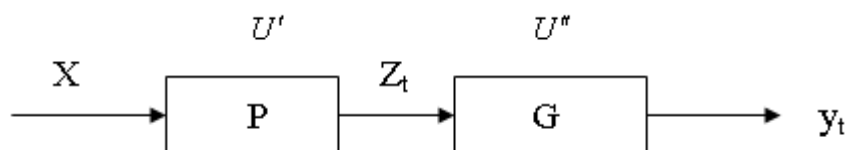
то множество $[Z_{t_0}, Z_{t_1}, \dots, Z_t]$ на любом интервале наблюдения является замкнутым, а система

$$S = [p_k, G, X, Y, T]$$

устойчивой относительно множества входных воздействий X .

Управляемость динамических систем

В общем случае задача управления формируется в следующем виде. Известно множество входных сигналов X , и семейство операторов перехода P и выходов G . Задано необходимое значение выхода Y_t в момент времени t . Найти управляющее воздействие $v \in V$ обеспечивающие выбор операторов перехода $p \in P$ и выхода $g \in G$ обеспечивающие необходимое y_t .



Исходя из общей формулировки задачи управления, необходимо различать управление множеством выходов. Достижение цели управления обеспечивается выбором операторов p и q .

Система является управляемой, если для заданных $X_t \subset X$ и $C_t \subset C$, существуют такие $C_{t_0} \subset C$, что существуют $p(C, X_t) \subset P$ или $g(C_t, y_t)$.

Отсюда следует, что управление может осуществляться начальным состоянием, операторами переходов и выходов. При этом задача управления сводится к следующему. Известно $x \subset X$, $p \subset P$, $g \subset G$. Задано $y_t = y \subset Y$.

Необходимо найти $v \subset V$ при котором $p(c_t = c \subset C, x_t = x \subset X)$ и $g(y_t = y \subset Y, c_t = c \subset C)$.

Интегративные свойства систем

В предыдущих разделах были рассмотрены структурные и динамические свойства систем, которые не связаны с какой либо физической природой объекта анализа и вытекают из математических свойств абстрактных множеств.

Интегративные свойства систем охватывают структурные и динамические свойства одновременно, носят прикладной характер и базируются на принципах и закономерностях естествознания. Они проявляются на множестве отношений свойств объекта и внешней среды. Т.е. отражают результат их взаимодействий в виде изменений объекта и внешней среды.

Характер взаимодействия объекта и внешней среды может быть различным: сплоченным или разобщенным. При этом соответственно и результаты взаимодействия могут быть положительными и отрицательными. В этом смысле рассмотрим две группы наиболее общих интегративных свойств, связанных с оценкой возможности возникновения положительных результатов (качество и эффективность) и отрицательных результатов (безопасность и живучесть).

Качество системы

Качество системы представляет виртуальную оценку возможности получения положительного результата взаимодействия объекта с внешней средой.

Под качеством понимается обобщенная положительная характеристика системы, которая показывает ее полезность для макросистемы, состоящей из двух подсистем: объекта и внешней среды.

Для выражения качества служит показателем качества – положительное свойство системы. Суждение о качестве системы основывается на сравнении показателя качества одной системы с показателем качества другой системы реально существующей или виртуальной. Решение о качестве принимается на основе критерия – правило выбора альтернатив (вариантов).

Рассмотрим следующую задачу. Пусть A – множество свойств виртуальной системы, т. е. потребностей макросистемы. B – множество

свойств системы. Здесь возникают несколько вариантов, представленные на рисунках.

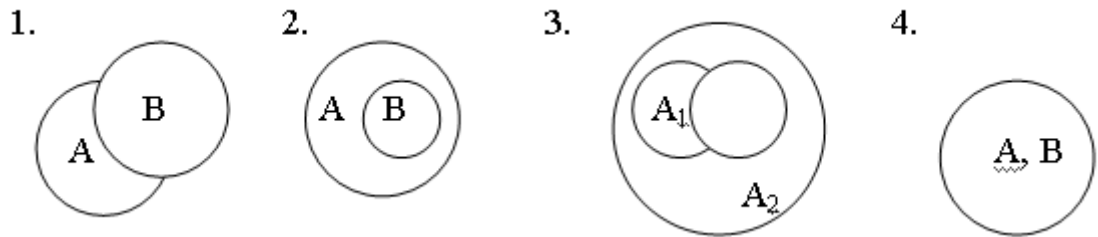


Рис. – Соотношение множеств свойств систем A и A₁ и потребностей макросистемы B.

1. Система не удовлетворяет потребностям макросистемы и следовательно непригодна.
2. Система удовлетворяет потребностям по возможности по использованию ее ресурса нерационально $|A| > |B|$.
3. Система A₂ удовлетворяет потребностям макросистемы, поэтому она превосходит систему A₁.
4. Система пригодна и рационально расходует свой ресурс.

Из рассмотренных примеров вытекают три основных критерия качества системы пригодности, превосходства и оптимальности.

Эффективность

Понятие эффективности связано с целенаправленными процессами, т. е. процессом функционирования некоторой системы, которая организуется и проводится для достижения определенной цели, т. е. получение определенного результата.

Характеризуя целенаправленный процесс необходимо различать качества определенных получаемых результатов и качество множества результатов рассматриваемых как единое целое. Последнее характеризует уровень достижения цели. Это свойство будет называться эффективностью целенаправленного процесса (операции).

Свойство обобщенного результата операции условно можно разделить на три группы:

- результативность (целевой эффект)
- ресурсоемкость
- оперативность (расход времени)

Соответственно показатели эффективности отражают одну из групп свойств или совместно все. В этой связи эффективностью называют комплексное свойство целенаправленного процесса.

Показатели эффективности

Показатели эффективности должны удовлетворять ряду общих обязательных требований. Основными из них являются: представительность, полнота, стохастичность, простота.

Представительность означает, что эффективность должна оцениваться относительно главной цели операции, а показатель должен иметь прямое отображение цели, характеристик процесса и внешней среды.

Количественная величина показателя должна быть чувствительна к изменению характеристик процесса и случайных факторов во внешней среде. А математическая модель должна обеспечивать проведение необходимых измерений и вычислений в приемлемые сроки.

В общем виде показатель эффективности имеет вид вектора

$$\alpha = \langle R_{\text{ц}}, R_{\text{р}}, T \rangle$$

где $R_{\text{ц}}$ – целевые эффекты,

$R_{\text{р}}$ – ресурсоемкость, T – затраты времени.

Поскольку процесс функционирования системы протекает во внешней среде с характеристиками V , состав этих характеристик оказывает влияние на $R_{\text{ц}}$, $R_{\text{р}}$ и T то реально величина α представляет множество

$$\alpha(V) = \{e(u_n), n=\{1, N\}\}$$

Поэтому цель операции формально можно представить в следующем виде.

$$\alpha(V) \subset \{\alpha_{\text{дон.}}\}.$$

Раздел 10. Структура системного анализа.

Общий подход к решению проблемы. Основные задачи системного анализа. Стратегии декомпозиции. Этап синтеза системы. Формирование общего представления системы. Формирование детального представления системы.

Общий подход к решению проблем может быть представлен как цикл.

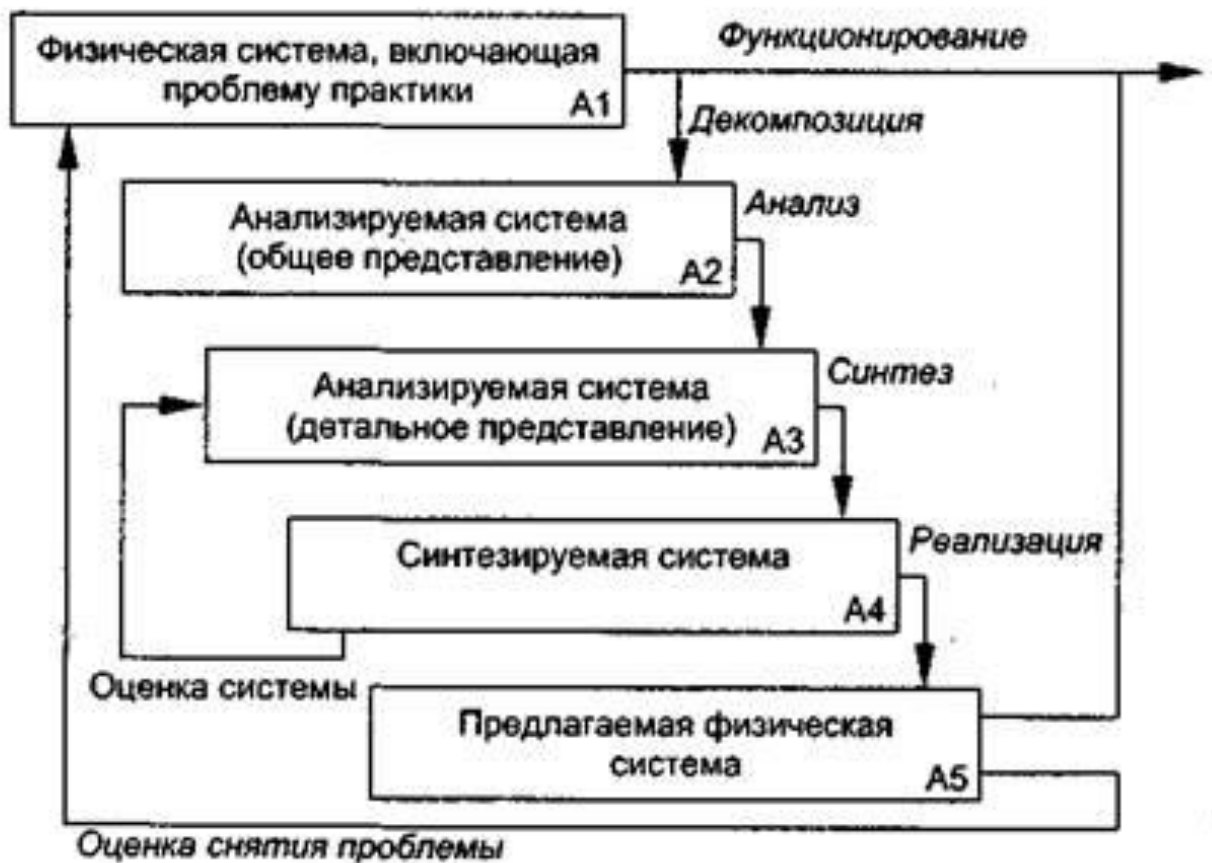


Рис. – Общий подход к решению проблем

При этом в процессе функционирования реальной системы выявляется проблема практики как несоответствие существующего положения дел требуемому. Для решения проблемы проводится системное исследование (декомпозиция, анализ и синтез) системы, снимающее проблему. В ходе синтеза осуществляется оценка анализируемой и синтезируемой систем. Реализация синтезированной системы в виде предлагаемой физической системы позволяет провести оценку степени снятия проблемы практики и принять решение на функционирование модернизированной (новой) реальной системы.

При таком представлении становится очевидным еще один аспект определения системы: система есть средство решения проблем.

Основные задачи системного анализа могут быть представлены в виде трехуровневого дерева функций.



Рис. – Основные задачи системного анализа

На этапе декомпозиции, обеспечивающем общее представление системы, осуществляются:

1. Определение и декомпозиция общей цели исследования и основной функции системы как ограничение траектории в пространстве состояний системы или в области допустимых ситуаций. Наиболее часто декомпозиция проводится путем построения дерева целей и дерева функций.

2. Выделение системы из среды (разделение на систему/«несистему») по критерию участия каждого рассматриваемого элемента в процессе, приводящем к результату на основе рассмотрения системы как составной части надсистемы.

3. Описание воздействующих факторов.

4. Описание тенденций развития, неопределенностей разного рода.
5. Описание системы как «черного ящика».
6. Функциональная (по функциям), компонентная (по виду элементов) и структурная (по виду отношений между элементами) декомпозиции системы.

Глубина декомпозиции ограничивается. Декомпозиция должна прекращаться, если необходимо изменить уровень абстракции – представить элемент как подсистему. Если при декомпозиции выясняется, что модель начинает описывать внутренний алгоритм функционирования элемента вместо закона его функционирования в виде «черного ящика», то в этом случае произошло изменение уровня абстракции. Это означает выход за пределы цели исследования системы и, следовательно, вызывает прекращение декомпозиции.

В автоматизированных методиках типичной является декомпозиция модели на глубину 5-6 уровней. На такую глубину декомпозируется обычно одна из подсистем. Функции, которые требуют такого уровня детализации, часто очень важны, и их детальное описание дает ключ к секретам работы всей системы.

В общей теории систем доказано, что большинство систем могут быть декомпоziрованы на базовые представления подсистем. К ним относят: последовательное (каскадное) соединение элементов, параллельное соединение элементов, соединение с помощью обратной связи.

Проблема проведения декомпозиции состоит в том, что в сложных системах отсутствует однозначное соответствие между законом функционирования подсистем и алгоритмом, его реализации. Поэтому осуществляется формирование нескольких вариантов (или одного варианта, если система отображена в виде иерархической структуры) декомпозиции системы.

Рассмотрим некоторые наиболее часто применяемые стратегии декомпозиции.

Функциональная декомпозиция. Декомпозиция базируется на анализе функций системы. При этом ставится вопрос что делает система, независимо от того, как она работает. Основанием разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов.

Декомпозиция по жизненному циклу. Признак выделения подсистем – изменение закона функционирования подсистем на разных этапах цикла существования системы «от рождения до гибели». Рекомендуется применять эту стратегию, когда целью системы является оптимизация

процессов и когда можно определить последовательные стадии преобразования входов в выходы.

Декомпозиция по физическому процессу. Признак выделения подсистем – шаги выполнения алгоритма функционирования подсистемы, стадии смены состояний. Хотя эта стратегия полезна при описании существующих процессов, результатом ее часто может стать слишком последовательное описание системы, которое не будет в полной мере учитывать ограничения, диктуемые функциями друг другу. При этом может оказаться скрытой последовательность управления. Применять эту стратегию следует, только если целью модели является описание физического процесса как такового.

Декомпозиция по подсистемам (структурная декомпозиция). Признак выделения подсистем – сильная связь между элементами по одному из типов отношений (связей), существующих в системе (информационных, логических, иерархических, энергетических и т.п.). Силу связи, например, по информации можно оценить коэффициентом информационной взаимосвязи подсистем $k = N / N_0$, где N – количество взаимоиспользуемых информационных массивов в подсистемах, N_0 – общее количество информационных массивов. Для описания всей системы должна быть построена составная модель, объединяющая все отдельные модели. Рекомендуется использовать разложение на подсистемы, только когда такое разделение на основные части системы не изменяется. Нестабильность границ подсистем быстро обесценит как отдельные модели, так и их объединение.

На этапе анализа, обеспечивающем формирование детального представления системы, осуществляются:

1. Функционально-структурный анализ существующей системы, позволяющий сформулировать требования к создаваемой системе. Он включает уточнение состава и законов функционирования элементов, алгоритмов функционирования и взаимовлияний подсистем, разделение управляемых и неуправляемых характеристик, задание пространства состояний Z , задание параметрического пространства T , в котором задано поведение системы, анализ целостности системы, формулирование требований к создаваемой системе.
2. Морфологический анализ – анализ взаимосвязи компонентов.
3. Генетический анализ – анализ предыстории, причин развития ситуации, имеющихся тенденций, построение прогнозов.
4. Анализ аналогов.

5. Анализ эффективности (по результативности, ресурсоемкости, оперативности). Он включает выбор шкалы измерения, формирование показателей эффективности, обоснование и формирование критериев эффективности, непосредственно оценивание и анализ полученных оценок.

6. Формирование требований к создаваемой системе, включая выбор критериев оценки и ограничений.

Этап синтеза системы, решающей проблему, представлен в виде упрощенной функциональной диаграммы на рисунке. На этом этапе осуществляются:

1. Разработка модели требуемой системы (выбор математического аппарата, моделирование, оценка модели по критериям адекватности, простоты, соответствия между точностью и сложностью, баланса погрешностей, многовариантности реализаций, блочности построения).

2. Синтез альтернативных структур системы, снимающей проблему.

3. Синтез параметров системы, снимающей проблему.

4. Оценивание вариантов синтезированной системы (обоснование схемы оценивания, реализация модели, проведение эксперимента по оценке, обработка результатов оценивания, анализ результатов, выбор наилучшего варианта).

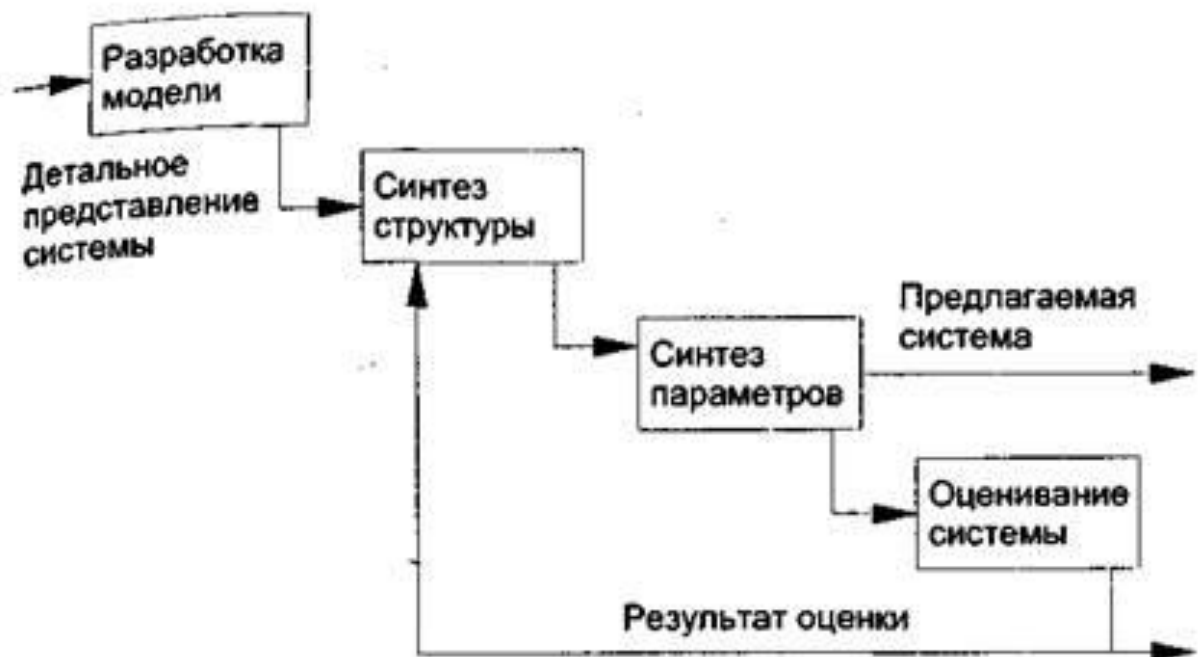


Рис. – Упрощенная функциональная диаграмма этапа синтеза системы, решающей проблему

Оценка степени снятия проблемы проводится при завершении системного анализа.

Наиболее сложными в исполнении являются этапы декомпозиции и анализа. Это связано с высокой степенью неопределенности, которую требуется преодолеть в ходе исследования.

Рассмотрим процесс формирования общего и детального представления системы, включающий девять основных стадий.

Формирование общего представления системы

Стадия 1. Выявление главных функций (свойств, целей, предназначения) системы. Формирование (выбор) основных предметных понятий, используемых в системе. На этой стадии речь идет об уяснении основных выходов в системе. Именно с этого лучше всего начинать ее исследование. Должен быть определен тип выхода: материальный, энергетический, информационный, они должны быть отнесены к каким-либо физическим или другим понятиям (выход производства – продукция (какая?), выход системы управления – командная информация (для чего? в каком виде?), выход автоматизированной информационной системы – сведения (о чем?) и т.д.).

Стадия 2. Выявление основных функций и частей (модулей) в системе. Понимание единства этих частей в рамках системы. На этой стадии происходит первое знакомство с внутренним содержанием системы, выявляется, из каких крупных частей она состоит и какую роль каждая часть играет в системе. Это стадия получения первичных сведений о структуре и характере основных связей. Такие сведения следует представлять и изучать при помощи структурных или объектно-ориентированных методов анализа систем, где, например, выясняется наличие преимущественно последовательного или параллельного характера соединения частей, взаимной или преимущественно односторонней направленности воздействий между частями и т.п. Уже на этой стадии следует обратить внимание на так называемые системообразующие факторы, т.е. на те связи, взаимообусловленности, которые и делают систему системой.

Стадия 3. Выявление основных процессов в системе, их роли, условий осуществления; выявление стадийности, скачков, смен состояний в функционировании; в системах с управлением – выделение основных управляющих факторов. Здесь исследуется динамика важнейших изменений в системе, ход событий, вводятся параметры состояния, рассматриваются факторы, влияющие на эти параметры, обеспечивающие течение процессов, а

также условия начала и конца процессов. Определяется, управляемы ли процессы и способствуют ли они осуществлению системой своих главных функций. Для управляемых систем уясняются основные управляющие воздействия, их тип, источник и степень влияния на систему.

Стадия 4. Выявление основных элементов «несистемы», с которыми связана изучаемая система. Выявление характера этих связей. На этой стадии решается ряд отдельных проблем. Исследуются основные внешние воздействия на систему (входы). Определяются их тип (вещественные, энергетические, информационные), степень влияния на систему, основные характеристики. Фиксируются границы того, что считается системой, определяются элементы «несистемы», на которые направлены основные выходные воздействия. Здесь же полезно проследить эволюцию системы, путь ее формирования. Нередко именно это ведет к пониманию структуры и особенностей функционирования системы. В целом данная стадия позволяет лучше уяснить главные функции системы, ее зависимость и уязвимость или относительную независимость во внешней среде.

Стадия 5. Выявление неопределенностей и случайностей в ситуации их определяющего влияния на систему (для стохастических систем).

Стадия 6. Выявление разветвленной структуры, иерархии, формирование представлений о системе как о совокупности модулей, связанных входами-выходами.

Стадией 6 заканчивается формирование общих представлений о системе. Как правило, этого достаточно, если речь идет об объекте, с которым мы непосредственно работать не будем. Если же речь идет о системе, которой надо заниматься для ее глубокого изучения, улучшения, управления, то нам придется пойти дальше по спиралеобразному пути углубленного исследования системы.

Формирование детального представления системы

Стадия 7. Выявление всех элементов и связей, важных для целей рассмотрения. Их отнесение к структуре иерархии в системе. Ранжирование элементов и связей по их значимости.

Стадии 6 и 7 тесно связаны друг с другом, поэтому их обсуждение полезно провести вместе. Стадия 6 – это предел познания «внутри» достаточно сложной системы для лица, оперирующего ею целиком. Более углубленные знания о системе (стадия 7) будет иметь уже только специалист, отвечающий за ее отдельные части. Для не слишком сложного объекта уровень стадии 7 – знание системы целиком – достижим и для одного человека. Таким

образом, хотя суть стадий 6 и 7 одна и та же, но в первой из них мы ограничиваемся тем разумным объемом сведений, который доступен одному исследователю.

При углубленной детализации важно выделять именно существенные для рассмотрения элементы (модули) и связи, отбрасывая все то, что не представляет интереса для целей исследования. Познание системы предполагает не всегда только отделение существенного от несущественного, но также акцентирование внимания на более существенном. Детализация должна затронуть и уже рассмотренную в стадии 4 связь системы с «несистемой». На стадии 7 совокупность внешних связей считается проясненной настолько, что можно говорить о доскональном знании системы.

Стадии 6 и 7 подводят итог общему, цельному изучению системы. Дальнейшие стадии уже рассматривают только ее отдельные стороны. Поэтому важно еще раз обратить внимание на системообразующие факторы, на роль каждого элемента и каждой связи, на понимание, почему они именно таковы или должны быть именно таковыми в аспекте единства системы.

Стадия 8. Учет изменений и неопределенностей в системе. Здесь исследуются медленное, обычно нежелательное изменение свойств системы, которое принято называть «старением», а также возможность замены отдельных частей (модулей) на новые, позволяющие не только противостоять старению, но и повысить качество системы по сравнению с первоначальным состоянием. Такое совершенствование искусственной системы принято называть развитием. К нему также относят улучшение характеристик модулей, подключение новых модулей, накопление информации для лучшего ее использования, а иногда и перестройку структуры, иерархии связей.

Основные неопределенности в стохастической системе считаются исследованными на стадии 5. Однако недетерминированность всегда присутствует и в системе, не предназначенной работать в условиях случайного характера входов и связей. Добавим, что учет неопределенностей в этом случае обычно превращается в исследование чувствительности важнейших свойств (выходов) системы. Под чувствительностью понимают степень влияния изменения входов на изменение выходов.

Стадия 9. Исследование функций и процессов в системе в целях управления ими. Введение управления и процедур принятия решения. Управляющие воздействия как системы управления. Для целенаправленных и других систем с управлением данная стадия имеет большое значение. Основные управляющие факторы были уяснены при рассмотрении стадии 3, но там это носило характер общей информации о системе. Для эффективного введения управлений или изучения их воздействий на функции системы и

процессы в ней необходимо глубокое знание системы. Именно поэтому мы говорим об анализе управлений только сейчас, после всестороннего рассмотрения системы. Напомним, что управление может быть чрезвычайно разнообразным по содержанию – от команд специализированной управляющей ЭВМ до министерских приказов.

Однако возможность единообразного рассмотрения всех целенаправленных вмешательств в поведение системы позволяет говорить уже не об отдельных управленческих актах, а о системе управления, которая тесно переплетается с основной системой, но четко выделяется в функциональном отношении.

На данной стадии выясняется, где, когда и как (в каких точках системы, в какие моменты, в каких процессах, скачках, выборах из совокупности, логических переходах и т.д.) система управления воздействует на основную систему, насколько это эффективно, приемлемо и удобно реализуемо. При введении управлений в систему должны быть исследованы варианты перевода входов и постоянных параметров в управляемые, определены допустимые пределы управления и способы их реализации.

После завершения стадий 6-9 исследование систем продолжается на качественно новом уровне – следует специфическая стадия моделирования. О создании модели можно говорить только после полного изучения системы.

Раздел 11. Классификация видов моделирования систем.

Виды моделирования. Принципы и подходы к построению математических моделей. Этапы построения математической модели.

Классификация видов моделирования может быть проведена по разным основаниям. Один из вариантов классификации приведен на рисунке.



Рис. – Пример классификации видов моделирования

В соответствии с классификационным признаком полноты моделирование делится на: полное, неполное, приближенное.

При **полном** моделировании модели идентичны объекту во времени и пространстве.

Для **неполного** моделирования эта идентичность не сохраняется.

В основе **приближенного** моделирования лежит подобие, при котором некоторые стороны реального объекта не моделируются совсем. Теория подобия утверждает, что абсолютное подобие возможно лишь при замене одного объекта другим точно таким же. Поэтому при моделировании абсолютное подобие не имеет места. Исследователи стремятся к тому, чтобы модель хорошо отображала только исследуемый аспект системы. Например, для оценки помехоустойчивости дискретных каналов передачи информации функциональная и информационная модели системы могут не разрабатываться. Для достижения цели моделирования вполне достаточна событийная модель, описываемая матрицей условных вероятностей переходов i -го символа алфавита в j -й.

В зависимости от типа носителя и сигнатуры модели различаются следующие виды моделирования: детерминированное и стохастическое, статическое и динамическое, дискретное, непрерывное и дискретно-непрерывное.

Детерминированное моделирование отображает процессы, в которых предполагается отсутствие случайных воздействий.

Стохастическое моделирование учитывает вероятностные процессы и события.

Статическое моделирование служит для описания состояния объекта в фиксированный момент времени, а динамическое – для исследования объекта во времени. При этом оперируют аналоговыми (непрерывными), дискретными и смешанными моделями.

В зависимости от формы реализации носителя и сигнатуры моделирование классифицируется на мысленное и реальное.

Мысленное моделирование применяется тогда, когда модели не реализуемы в заданном интервале времени либо отсутствуют условия для их физического создания (например, ситуация микромира). Мысленное моделирование реальных систем реализуется в виде наглядного, символического и математического. Для представления функциональных, информационных и событийных моделей этого вида моделирования разработано значительное количество средств и методов.

При **наглядном** моделировании на базе представлений человека о реальных объектах создаются наглядные модели, отображающие явления и процессы, протекающие в объекте. Примером таких моделей являются учебные плакаты, рисунки, схемы, диаграммы.

В основу **гипотетического** моделирования закладывается гипотеза о закономерностях протекания процесса в реальном объекте, которая отражает уровень знаний исследователя об объекте и базируется на причинно-следственных связях между входом и выходом изучаемого объекта. Этот вид моделирования используется, когда знаний об объекте недостаточно для построения формальных моделей. Аналоговое моделирование основывается на применении аналогий различных уровней. Для достаточно простых объектов наивысшим уровнем является полная аналогия. С усложнением системы используются аналогии последующих уровней, когда аналоговая модель отображает несколько (или только одну) сторон функционирования объекта.

Макетирование применяется, когда протекающие в реальном объекте процессы не поддаются физическому моделированию или могут предшествовать проведению других видов моделирования. В основе построения мысленных макетов также лежат аналогии, обычно базирующиеся на причинно-следственных связях между явлениями и процессами в объекте.

Символическое моделирование представляет собой искусственный процесс создания логического объекта, который замещает реальный и выражает его основные свойства с помощью определенной системы знаков и символов.

В основе **языкового** моделирования лежит некоторый тезаурус, который образуется из набора понятий исследуемой предметной области, причем этот набор должен быть фиксированным. Под тезаурусом понимается словарь, отражающий связи между словами или иными элементами данного языка, предназначенный для поиска слов по их смыслу.

Традиционный тезаурус состоит из двух частей: списка слов и устойчивых словосочетаний, сгруппированных по смысловым (тематическим) рубрикам; алфавитного словаря ключевых слов, задающих классы условной эквивалентности, указателя отношений между ключевыми словами, где для каждого слова указаны соответствующие рубрики. Такое построение позволяет определить семантические (смысловые) отношения иерархического (род/вид) и неиерархического (синонимия, антонимия, ассоциации) типа.

Между тезаурусом и обычным словарем имеются принципиальные различия. Тезаурус – словарь, который очищен от неоднозначности, т.е. в нем каждому слову может соответствовать лишь единственное понятие, хотя в обычном словаре одному слову может соответствовать несколько понятий.

Если ввести условное обозначение отдельных понятий, т.е. знаки, а также определенные операции между этими знаками, то можно реализовать **знаковое** моделирование и с помощью знаков отображать набор понятий – составлять отдельные цепочки из слов и предложений. Используя операции объединения, пересечения и дополнения теории множеств, можно в отдельных символах дать описание какого-то реального объекта.

Математическое моделирование – это процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью. В принципе, для исследования характеристик любой системы математическими методами, включая и машинные, должна быть обязательно проведена формализация этого процесса, т.е. построена математическая модель. Вид математической модели зависит как от природы реального объекта, так и от задач исследования объекта, от требуемой достоверности и точности решения задачи. Любая математическая модель, как и всякая другая, описывает реальный объект с некоторой степенью приближения.

Для представления математических моделей могут использоваться различные формы записи. Основными являются инвариантная, аналитическая, алгоритмическая и схемная (графическая).

Инвариантная форма – запись соотношений модели с помощью традиционного математического языка безотносительно к методу решения уравнений модели. В этом случае модель может быть представлена как совокупность входов, выходов, переменных состояния и глобальных

уравнений системы. Аналитическая форма – запись модели в виде результата решения исходных уравнений модели. Обычно модели в аналитической форме представляют собой явные выражения выходных параметров как функций входов и переменных состояния.

Для **аналитического** моделирования характерно то, что в основном моделируется только функциональный аспект системы. При этом глобальные уравнения системы, описывающие закон (алгоритм) ее функционирования, записываются в виде некоторых аналитических соотношений (алгебраических, интегродифференциальных, конечноразностных и т.д.) или логических условий. Аналитическая модель исследуется несколькими методами:

- аналитическим, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными состояния системы;
- численным, когда, не умея решать уравнения в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных (напомним, что такие модели называются цифровыми);
- качественным, когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

В настоящее время распространены компьютерные методы исследования характеристик процесса функционирования сложных систем. Для реализации математической модели на ЭВМ необходимо построить соответствующий моделирующий алгоритм.

Алгоритмическая форма – запись соотношений модели и выбранного численного метода решения в форме алгоритма. Среди алгоритмических моделей важный класс составляют имитационные модели, предназначенные для имитации физических или информационных процессов при различных внешних воздействиях. Собственно имитацию названных процессов называют имитационным моделированием.

При **имитационном** моделировании воспроизводится алгоритм функционирования системы во времени – поведение системы, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы. Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач.

Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные воздействия и другие, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях. В настоящее время имитационное моделирование – наиболее эффективный метод исследования систем, а часто и единственный практически доступный метод получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования.

В имитационном моделировании различают метод статистических испытаний (Монте-Карло) и метод статистического моделирования.

Метод Монте-Карло – численный метод, который применяется для моделирования случайных величин и функций, вероятностные характеристики которых совпадают с решениями аналитических задач. Состоит в многократном воспроизведении процессов, являющихся реализациями случайных величин и функций, с последующей обработкой информации методами математической статистики.

Если этот прием применяется для машинной имитации в целях исследования характеристик процессов функционирования систем, подверженных случайным воздействиям, то такой метод называется методом статистического моделирования.

Метод имитационного моделирования применяется для оценки вариантов структуры системы, эффективности различных алгоритмов управления системой, влияния изменения различных параметров системы. Имитационное моделирование может быть положено в основу структурного, алгоритмического и параметрического синтеза систем, когда требуется создать систему с заданными характеристиками при определенных ограничениях.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей производится предварительная декомпозиция процесса Функционирования объекта на составляющие подпроцессы, и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой подход дает возможность охватить качественно новые классы систем, которые не могут быть исследованы с использованием аналитического или имитационного моделирования в отдельности.

Информационное (кибернетическое) моделирование связано с исследованием моделей, в которых отсутствует непосредственное подобие физических процессов, происходящих в моделях, реальным процессам. В этом

случае стремятся отобразить лишь некоторую функцию, рассматривают реальный объект как «черный ящик», имеющий ряд входов и выходов, и моделируют некоторые связи между выходами и входами. Таким образом, в основе информационных (кибернетических) моделей лежит отражение некоторых информационных процессов управления, что позволяет оценить поведение реального объекта. Для построения модели в этом случае необходимо выделить исследуемую функцию реального объекта, попытаться формализовать эту функцию в виде некоторых операторов связи между входом и выходом и воспроизвести данную функцию на имитационной модели, причем на совершенно другом математическом языке и, естественно, иной физической реализации процесса. Так, например, экспертные системы являются моделями ЛПР.

Структурное моделирование системного анализа базируется на некоторых специфических особенностях структур определенного вида, которые используются как средство исследования систем или служат для разработки на их основе специфических подходов к моделированию с применением других методов формализованного представления систем (теоретико-множественных, лингвистических, кибернетических и т.п.). Развитием структурного моделирования является **объектно-ориентированное** моделирование.

Структурное моделирование системного анализа включает:

- методы сетевого моделирования;
- сочетание методов структуризации с лингвистическими;
- структурный подход в направлении формализации построения и исследования структур разного типа (иерархических, матричных, произвольных графов) на основе теоретико-множественных представлений и понятия номинальной шкалы теории измерений.

При этом термин «структура модели» может применяться как функциям, так и к элементам системы. Соответствующие структуры называются функциональными и морфологическими. Объектно-ориентированное моделирование объединяет структуры обоих типов в иерархию классов, включающих как элементы, так и функции.

В структурном моделировании за последнее десятилетие сформировалась новая технология CASE. Аббревиатура CASE имеет двоякое толкование, соответствующее двум направлениям использования CASE-систем. Первое из них – Computer-Aided Software Engineering – переводится как автоматизированное проектирование программного обеспечения. Соответствующие CASE-системы часто называют инструментальными средами быстрой разработки программного обеспечения (RAD – Rapid

Application Development). Второе – Computer-Aided System Engineering – подчеркивает направленность на поддержку концептуального моделирования сложных систем, преимущественно слабоструктурированных. Такие CASE-системы часто называют системами BPR (Business Process Reengineering). В целом CASE-технология представляет собой совокупность методологий анализа, проектирования, разработки и сопровождения сложных автоматизированных систем, поддерживаемую комплексом взаимосвязанных средств автоматизации. CASE – это инструментарий для системных аналитиков, разработчиков и программистов, позволяющий автоматизировать процесс проектирования и разработки сложных систем, в том числе и программного обеспечения.

Ситуационное моделирование опирается на модельную теорию мышления, в рамках которой можно описать основные механизмы регулирования процессов принятия решений. В центре модельной теории мышления лежит представление о формировании в структурах мозга информационной модели объекта и внешнего мира. Эта информация воспринимается человеком на базе уже имеющихся у него знаний и опыта. Целесообразное поведение человека строится путем формирования целевой ситуации и мысленного преобразования исходной ситуации в целевую. Основой построения модели является описание объекта в виде совокупности элементов, связанных между собой определенными отношениями, отображающими семантику предметной области. Модель объекта имеет многоуровневую структуру и представляет собой тот информационный контекст, на фоне которого протекают процессы управления. Чем богаче информационная модель объекта и выше возможности манипулирования ею, тем лучше и многообразнее качество принимаемых решений при управлении.

При **реальном** моделировании используется возможность исследования характеристик либо на реальном объекте целиком, либо на его части. Такие исследования проводятся как на объектах, работающих в нормальных режимах, так и при организации специальных режимов для оценки интересующих исследователя характеристик (при других значениях переменных и параметров, в другом масштабе времени и т.д.). Реальное моделирование является наиболее адекватным, но его возможности ограничены.

Натурным моделированием называют проведение исследования на реальном объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия. Натурное моделирование подразделяется на научный эксперимент, комплексные испытания и производственный эксперимент. **Научный эксперимент** характеризуется широким использованием средств

автоматизации, применением весьма разнообразных средств обработки информации, возможностью вмешательства человека в процесс проведения эксперимента. Одна из разновидностей эксперимента – **комплексные испытания**, в процессе которых вследствие повторения испытаний объектов в целом (или больших частей системы) выявляются общие закономерности о характеристиках качества, надежности этих объектов. В этом случае моделирование осуществляется путем обработки и обобщения сведений о группе однородных явлений. Наряду со специально организованными испытаниями возможна реализация натурного моделирования путем обобщения опыта, накопленного в ходе производственного процесса, т.е. можно говорить о **производственном эксперименте**. Здесь на базе теории подобия обрабатывают статистический материал по производственному процессу и получают его обобщенные характеристики. Необходимо помнить про отличие эксперимента от реального протекания процесса. Оно заключается в том, что в эксперименте могут появиться отдельные критические ситуации и определиться границы устойчивости процесса. В ходе эксперимента вводятся новые факторы возмущающие воздействия в процесс функционирования объекта.

Другим видом реального моделирования является **физическое**, отличающееся от натурного тем, что исследование проводится в установках, которые сохраняют природу явлений и обладают физическим подобием. В процессе физического моделирования задаются некоторые характеристики внешней среды и исследуется поведение либо реального объекта, либо его модели при заданных или создаваемых искусственно воздействиях внешней среды. Физическое моделирование может протекать в реальном и модельном (псевдореальном) масштабах времени или рассматриваться без учета времени. В последнем случае изучению подлежат так называемые «замороженные» процессы, фиксируемые в некоторый момент времени.

Принципы и подходы к построению математических моделей

Математическое моделирование многие считают скорее искусством, чем стройной и законченной теорией. Здесь очень велика роль опыта, интуиции и других интеллектуальных качеств человека. Поэтому невозможно написать достаточно формализованную инструкцию, определяющую, как должна строиться модель той или иной системы. Тем не менее отсутствие точных правил не мешает опытным специалистам строить удачные модели. К настоящему времени уже накоплен значительный опыт, дающий основание сформулировать некоторые принципы и подходы к построению моделей. При

рассмотрении порознь каждый из них может показаться довольно очевидным. Но совокупность взятых вместе принципов и подходов далеко не тривиальна. Многие ошибки и неудачи в практике моделирования являются прямым следствием нарушения этой методологии.

Принципы определяют те общие требования, которым должна удовлетворять правильно построенная модель. Рассмотрим эти принципы.

1. Адекватность. Этот принцип предусматривает соответствие модели целям исследования по уровню сложности и организации, а также соответствие реальной системе относительно выбранного множества свойств. До тех пор, пока не решен вопрос правильно ли отображает модель исследуемую систему, ценность модели незначительна.

2. Соответствие модели решаемой задаче. Модель должна строиться для решения определенного класса задач или конкретной задачи исследования системы. Попытки создания универсальной модели, нацеленной на решение большого числа разнообразных задач, приводят к такому усложнению, что она оказывается практически непригодной. Опыт показывает, что при решении каждой конкретной задачи нужно иметь свою модель, отражающую те аспекты системы, которые являются наиболее важными в данной задаче. Этот принцип связан с принципом адекватности.

3. Упрощение при сохранении существенных свойств системы. Модель должна быть в некоторых отношениях проще прототипа – в этом смысл моделирования. Чем сложнее рассматриваемая система, тем по возможности более упрощенным должно быть ее описание, умышленно утрирующее типичные и игнорирующее менее существенные свойства. Этот принцип может быть назван принципом абстрагирования от второстепенных деталей.

4. Соответствие между требуемой точностью результатов моделирования и сложностью модели. Модели по своей природе всегда носят приближенный характер. Возникает вопрос, каким должно быть это приближение. С одной стороны, чтобы отразить все сколько-нибудь существенные свойства, модель необходимо детализировать. С другой стороны, строить модель, приближающуюся по сложности к реальной системе, очевидно, не имеет смысла. Она не должна быть настолько сложной, чтобы нахождение решения оказалось слишком затруднительным. Компромисс между этими двумя требованиями достигается нередко путем проб и ошибок. Практическими рекомендациями по уменьшению сложности моделей являются:

- изменение числа переменных, достигаемое либо исключением несущественных переменных, либо их объединением. Процесс преобразования модели в модель с меньшим числом переменных и ограничений называют агрегированием. Например, все типы ЭВМ в модели гетерогенных сетей можно объединить в четыре типа – ПЭВМ, рабочие станции, большие ЭВМ (мейнфреймы), кластерные ЭВМ;

- изменение природы переменных параметров. Переменные параметры рассматриваются в качестве постоянных, дискретные – в качестве непрерывных и т.д. Так, условия распространения радиоволн в модели радиоканала для простоты можно принять постоянными;

- изменение функциональной зависимости между переменными. Нелинейная зависимость заменяется обычно линейной, дискретная функция распределения вероятностей – непрерывной;

- изменение ограничений (добавление, исключение или модификация). При снятии ограничений получается оптимистичное решение, при введении – пессимистичное. Варьируя ограничениями можно найти возможные граничные значения эффективности. Такой прием часто используется для нахождения предварительных оценок эффективности решений на этапе постановки задач;

- ограничение точности модели. Точность результатов модели не может быть выше точности исходных данных.

5. Баланс погрешностей различных видов. В соответствии с принципом баланса необходимо добиваться, например, баланса систематической погрешности моделирования за счет отклонения модели от оригинала и погрешности исходных данных, точности отдельных элементов модели, систематической погрешности моделирования и случайной погрешности при интерпретации и осреднении результатов.

6. Многовариантность реализаций элементов модели. Разнообразие реализаций одного и того же элемента, отличающихся по точности (а следовательно, и по сложности), обеспечивает регулирование соотношения «точность/сложность».

7. Блочное строение. При соблюдении принципа блочного строения облегчается разработка сложных моделей и появляется возможность использования накопленного опыта и готовых блоков с

минимальными связями между ними. Выделение блоков производится с учетом разделения модели по этапам и режимам функционирования системы. К примеру, при построении модели Для системы радиоразведки можно выделить модель работы излучателей, модель обнаружения излучателей, модель пеленгования и т.д.

В зависимости от конкретной ситуации возможны следующие подходы к построению моделей:

- непосредственный анализ функционирования системы;
- проведение ограниченного эксперимента на самой системе;
- использование аналога;
- анализ исходных данных.

Имеется целый ряд систем, которые допускают проведение непосредственных исследований по выявлению существенных параметров и отношений между ними. Затем либо применяются известные математические модели, либо они модифицируются либо предлагается новая модель. Таким образом, например, можно вести разработку модели для направления связи в условиях мирного времени.

При проведении эксперимента выявляется значительная часть существенных параметров и их влияние на эффективность системы. Такую цель преследуют, например, все командно-штабные игры и большинство учений.

Если метод построения модели системы не ясен, но ее структура очевидна, то можно воспользоваться сходством с более простой системой, модель для которой существует.

К построению модели можно приступить на основе анализа исходных данных, которые уже известны или могут быть получены. Анализ позволяет сформулировать гипотезу о структуре системы, которая затем апробируется. Так появляются первые модели нового образца иностранной техники при наличии предварительных данных об их технических параметрах.

Разработчики моделей находятся под действием двух взаимно противоречивых тенденций: стремления к полноте описания и стремления к получению требуемых результатов возможно более простыми средствами. Достижение компромисса ведется обычно по пути построения серии моделей, начинающихся с предельно простых и восходящих до высокой сложности (существует известное правило: начинай с простых моделей, а далее усложняй). Простые модели помогают глубже понять исследуемую проблему. Усложненные модели используются для анализа влияния различных факторов на результаты моделирования. Такой анализ позволяет исключать некоторые факторы из рассмотрения.

Сложные системы требуют разработки целой иерархии моделей, различающихся уровнем отображаемых операций. Выделяют такие уровни, как вся система, подсистемы, управляющие объекты и др.

Рассмотрим один конкретный пример – модель развития экономики (модель Харрода). Эта упрощенная модель развития экономики страны предложена английским экономистом Р. Харродом. В модели учитывается один определяемый фактор – капитальные вложения, а состояние экономики оценивается через размер национального дохода.

Для математической постановки задачи введем следующие обозначения:

- Y_t – национальный доход в год t ;
- K_t – производственные фонды в год t ;
- K_t – объем потребления в год t ;
- K_t – объем накопления в год t ;
- K_t – капитальные вложения в год t .

Будем предполагать, что функционирование экономики происходит при выполнении следующих условий:

- условие баланса доходов и расходов за каждый год

$$Y_t = K_t + K_t$$

- условие исключения пролеживания капитала

$$K_t = K_t$$

- условие пропорционального деления национального

годового дохода

$$K_t = aY_t$$

Два условия принимаются для характеристики внутренних экономических процессов. Первое условие характеризует связь капитальных вложений и общей суммы производственных фондов, второе – связь национального годового дохода и производственных фондов.

Капитальные вложения в год t могут рассматриваться как прирост производственных фондов или производная от функции производственные фонды принимается как капитальные годовые вложения:

$$V_t = dK/dt$$

Национальный доход в каждый год принимается как отдача производственных фондов с соответствующим нормативным коэффициентом фондоотдачи:

$$Y_t = K_t/b$$

Соединяя условия задачи, можно получить следующее соотношение:

$$Y_t = V_t/a = dK/(a \cdot dt) = b/a \cdot dY/dt$$

Отсюда следует итоговое уравнение Харрода:

$$Y_t = b \cdot dY/dt = a \cdot Y$$

Его решением является экспоненциальное изменение национального дохода по годовым интервалам:

$$Y_t = Y_0 \cdot e^{a \cdot t/b}$$

Несмотря на упрощенный вид математической модели, ее результат может быть использован для укрупненного анализа национальной экономики. Параметры a и b могут стать параметрами управления при выборе плановой стратегии развития в целях максимального приближения к предпочтительной траектории изменения национального дохода или для выбора минимального интервала времени достижения заданного уровня национального дохода.

Этапы построения математической модели

Сущность построения математической модели состоит в том, что реальная система упрощается, схематизируется и описывается с помощью того или иного математического аппарата. Можно выделить следующие основные этапы построения моделей.

1. Содержательное описание моделируемого объекта. Объекты моделирования описываются с позиций системного подхода. Исходя из цели исследования устанавливаются совокупность элементов, взаимосвязи между элементами, возможные состояния каждого элемента, существенные характеристики состояний и отношения между ними. Например, фиксируется, что если значение одного параметра возрастает, то значение другого – убывает и т.п. Вопросы, связанные с полнотой и единственностью выбора характеристик, не рассматриваются. Естественно, в таком словесном описании возможны логические противоречия, неопределенности. Это исходная естественно-научная концепция исследуемого объекта. Такое предварительное, приближенное представление системы называют концептуальной моделью. Для того чтобы содержательное описание служило хорошей основой для последующей формализации, требуется обстоятельно изучить моделируемый объект. Нередко естественное стремление ускорить разработку модели уводит исследователя от данного этапа непосредственно к решению формальных вопросов. В результате построенная без достаточного содержательного базиса модель оказывается непригодной к использованию. На этом этапе моделирования широко применяются качественные методы описания систем, знаковые и языковые модели.

2. Формализация операций. Формализация сводится в общих чертах к следующему. На основе содержательного описания определяется исходное множество характеристик системы. Для выделения существенных

характеристик необходим хотя бы приближенный анализ каждой из них. При проведении анализа опираются на постановку задачи и понимание природы исследуемой системы. После исключения несущественных характеристик выделяют управляемые и неуправляемые параметры и производят символизацию. Затем определяется система ограничений на значения управляемых параметров. Если ограничения не носят принципиальный характер, то ими пренебрегают.

i. Дальнейшие действия связаны с формированием целевой функции модели. В соответствии с известными положениями выбираются показатели исхода операции и определяется примерный вид функции полезности на исходах. Если функция полезности близка к пороговой (или монотонной), то оценка эффективности решений возможна непосредственно по показателям исхода операции. В этом случае необходимо выбрать способ свертки показателей (способ перехода от множества показателей к одному обобщенному показателю) и произвести саму свертку. По свертке показателей формируются критерий эффективности и целевая функция.

ii. Если при качественном анализе вида функции полезности окажется, что ее нельзя считать пороговой (монотонной), прямая оценка эффективности решений через показатели исхода операции неправомерна. Необходимо определять функцию полезности и уже на ее основе вести формирование критерия эффективности и целевой функции.

iii. В целом замена содержательного описания формальным – это итеративный процесс.

3. Проверка адекватности модели. Требование адекватности находится в противоречии с требованием простоты, и это нужно учитывать при проверке модели на адекватность. Исходный вариант модели предварительно проверяется по следующим основным аспектам:

- a. Все ли существенные параметры включены в модель?
- b. Нет ли в модели несущественных параметров?
- c. Правильно ли отражены функциональные связи между параметрами?
- d. Правильно ли определены ограничения на значения параметров?

i. Для проверки рекомендуется привлекать специалистов, которые не принимали участия в разработке модели. Они могут более объективно рассмотреть модель и заметить ее слабые стороны, чем ее разработчики. Такая предварительная проверка модели позволяет выявить грубые ошибки. После этого приступают к реализации модели и проведению исследований. Полученные результаты моделирования подвергаются анализу на соответствие известным свойствам исследуемого объекта. Для установления соответствия создаваемой модели оригиналу используются следующие пути:

- е. сравнение результатов моделирования с отдельными экспериментальными результатами, полученными при одинаковых условиях;
- ф. использование других близких моделей;
- г. сопоставление структуры и функционирования модели с прототипом.
- і. Главным путем проверки адекватности модели исследуемому объекту выступает практика. Однако она требует накопления статистики, которая далеко не всегда бывает достаточной для получения надежных данных. Для многих моделей первые два приемлемы в меньшей степени. В этом случае остается один путь: заключение о подобии модели и прототипа делать на основе сопоставления их структур и реализуемых функций. Такие заключения не носят формального характера, поскольку основываются на опыте и интуиции исследователя.
- іі. По результатам проверки модели на адекватность принимается решение о возможности ее практического использования или о проведении корректировки.

4. **Корректировка модели.** При корректировке модели могут уточняться существенные параметры, ограничения на значения управляемых параметров, показатели исхода операции, связи показателей исхода операции с существенными параметрами, критерий эффективности. После внесения изменений в модель вновь выполняется оценка адекватности.

5. **Оптимизация модели.** Сущность оптимизации моделей состоит в их упрощении при заданном уровне адекватности. Основными показателями, по которым возможна оптимизация модели, выступают время и затраты средств для проведения исследований на ней. В основе оптимизации лежит возможность преобразования моделей из одной формы в другую. Преобразование может выполняться либо с использованием математических методов, либо эвристическим путем.

Раздел 12. Выбор решения при системном анализе и моделировании технических систем.

Основные положения. Формализация задачи принятия решения. Постановка задачи. Декомпозиция задачи принятия решения и оценка альтернатив. Композиция оценок свойств и сравнение альтернатив. Пример модели принятия решения в условиях неопределенности. Примеры решения оптимизационной задачи методом динамического программирования.

Постановка задачи

Введем два понятия:

$\{\chi\}$ – множество альтернатив; Φ – принцип выбора.

Тогда задачу принятия решения можно записать в виде $\{\{\chi\}, \Phi\} \rightarrow \chi^*$, где χ^* – выбранная альтернатива, одна или несколько в каком-то смысле равноценных.

Принцип выбора, в свою очередь, зависит от внешних условий, а также от информационной ситуации, т.е. от характера (вида, точности) доступной, имеющейся в распоряжении информации, используемой при поиске лучшего решения. Причем информационная ситуация может быть связана с характером «поведения» внешней среды (противодействующей стороны, природы).

Возможны различные классификации состояния внешней среды и информационных ситуаций. Различается семь информационных ситуаций, в том числе следующие:

- известны априорные вероятности состояния внешней среды;
- известен вид распределения вероятностей состояний среды, но параметры распределения не известны, необходима их оценка;
- имеет место активное сопротивление внешней среды принимаемым решениям;
- состояние среды характеризуется нечетким множеством.

Имея в виду введенные понятия, можно записать возможные варианты задачи принятия решения в следующем виде.

Задача 1. Оптимальный выбор

$\{\chi\}$ - множество альтернатив и Φ – принцип выбора определены. Приложение Φ к $\{\chi\}$ не зависит от субъективных обстоятельств.

Задача 2. Выбор

$\{\chi\}$ определено, Φ не может быть формализован. Результат выбора зависит от того, кто и на основе какой информации принимает решение.

Задача 3. Общая задача принятия решения

Множество альтернатив не имеет определенных границ, принцип выбора не определен и даже не может быть зафиксирован. Разные субъекты могут принимать различные решения при одинаковом наборе альтернатив или даже рассматривать различные альтернативы.

К сожалению, задача 3 встречается достаточно часто и может даже казаться бессмысленной. Выручают естественные ограничения, их суть.

1. Существует начальное множество альтернатив $\{\chi_0\}$, которое затем уточняется, но в каждый момент это множество может быть зафиксировано:

$$\{\chi_0\} \rightarrow \{\chi_1\} \rightarrow \dots \rightarrow \{\chi_i\}.$$

2. Любая альтернатива из множества всех выдвинутых альтернатив может быть оценена с точки зрения полезности ее включения в некоторое более узкое множество $\{\chi_p\}$ для дальнейших оценок. Соответственно

существует некоторый вспомогательный принцип Φ_r такого отбора узкого множества.

3. Предполагается наличие какого-то множества неформализованных принципов выбора, используя которые можно приблизиться к желаемому результату.

Обычно задачи 2 и 3 решают, используя некоторые фиксированные принципы выбора при фиксированном (но допускающем уточнение) наборе альтернатив. При этом применяется ряд приемов, в том числе:

а) строится задача 1, как некоторый упрощенный аналог задач 2 или 3 и организуется итеративный процесс решения последовательности задач 1 таким образом, чтобы решение каждой последующей задачи давало лучшее приближение к решению исходной задачи, и так до получения результата с желаемой точностью;

б) решение ослабленной задачи с помощью экспертов. Каждый k -ый эксперт выбирает свой набор альтернатив $\{\chi_k\}$ и свой принцип выбора Φ_k и выявляет наилучшую альтернативу – χ_k^* . После чего организуется процедура выбора решения из множества альтернатив, выбранных экспертами в качестве оптимальных – $\{\chi_k^*\}$. Наиболее простой случай имеет место, когда решения большинства экспертов совпадают.

Декомпозиция задачи принятия решения и оценка альтернатив

Общепринятый подход в задаче выбора лучшего решения – переход от сравнения альтернатив к сравнению их свойств (характеристик, признаков, преимуществ). После сравнения свойств вновь осуществляется переход к сравнению альтернатив, но проблема уже значительно упрощается. Выделение свойств альтернатив является задачей декомпозиции. Декомпозиция в общем случае имеет иерархический характер. Каждое свойство 1-го уровня делится на набор свойств 2-го уровня и так далее до такого уровня, на котором свойства оказываются легко сравнимыми.

Используются три способа сравнения альтернатив по их свойствам:

- а) попарное (групповое) сравнение по определенному свойству;
- б) на основе естественных числовых характеристик свойств;
- в) на основе искусственно введенных характеристик свойств.

Попарное сравнение

Формально это бинарная операция по признаку R .

$\chi_i \ R \ \chi_j$ означает, что согласно признаку R альтернатива χ_i предпочтительней альтернативы χ_j .

При таком сравнении справедлива аксиома транзитивности:

$(\chi^i R \chi^j)$ и $(\chi^j R \chi^k) \rightarrow (\chi^i R \chi^k)$, а также дополнительно при строгом предпочтении могут быть справедливы аксиомы асимметричности (из $(\chi^i R \chi^k)$ и $(\chi^k R \chi^i)$ верно может быть только одно), и антирефлексивности (из $(\chi^i R \chi^k)$ следует несовместимость χ^i и χ^k).

На основе бинарных отношений возможно ранжирование альтернатив по каждому свойству. Сравнение с использованием числовых характеристик (естественных или искусственно введенных).

Свойства, для которых известны числовые характеристики, называются критериями.

При идеальной декомпозиции имеет место набор критериев, т.е. имеет место многокритериальная задача. Очень важна аккуратность, объективность при вводе искусственных характеристик, что достигается при четком понимании физической сути изучаемого процесса.

Например, при сравнении пассажирских самолетов выделено свойство «комфортность», которое, в свою очередь, разбивается на свойства следующего уровня: расстояние между креслами, уровень шума в самолете, уровень вибрации, предельные характеристики системы искусственного климата и др. Каждое из свойств этого уровня уже может быть оценено численно.

Пример искусственных критериев – баллы как оценки экспертов. Искусственные оценки могут переходить в естественные. Например, на экзамене процент правильных ответов соответствует определенному баллу. В сложных случаях большого набора критериев возможна классификация – деление свойств на классы (группы по важности).

Композиция оценок свойств и сравнение альтернатив

Переход от сравнения отдельных свойств к сравнению альтернатив является задачей композиции. Возможны различные случаи решения этой задачи.

а) Случай, когда все свойства оценены численно – получен набор критериев.

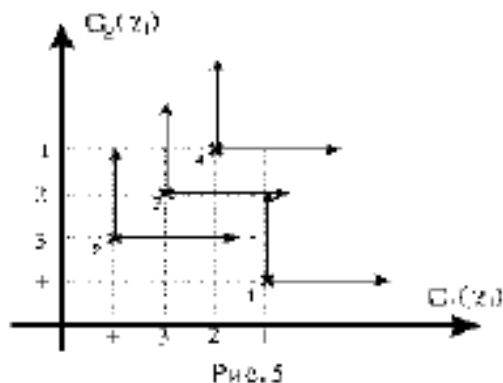
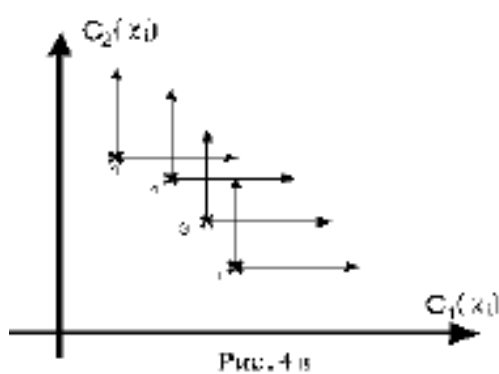
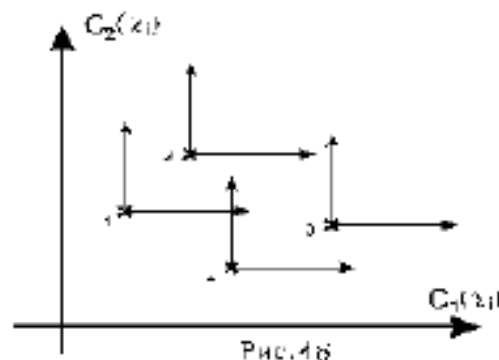
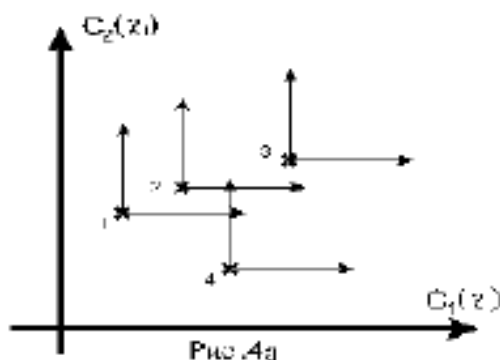
Пусть $C_k(\chi^i)$ – численная оценка k -го свойства i -ой альтернативы, $k = \overline{1, n}$.

Введем векторное пространство, называемое критериальным, в котором каждой i -ой альтернативе будет соответствовать точка: $C(\chi^i) = \{C_1(\chi^i), C_2(\chi^i), \dots, C_m(\chi^i)\}$, т.е. k -ой составляющей вектора $C(\chi^i)$ является $C_k(\chi^i)$ – численная оценка k -го свойства i -ой альтернативы.

При сравнении двух альтернатив χ^1 и χ^2 альтернатива χ^1 будет предпочтительнее альтернативы χ^2 , если $C_k(\chi^1) \geq C_k(\chi^2)$, для всех $k = \overline{1, n}$, причем хотя бы одно неравенство строгое. Далее рассматривается случай, когда лучшему свойству соответствует большее значение численной оценки. В противном случае перед численными оценками свойств можно ставить знак «минус».

Поясним, как можно найти предпочтительные альтернативы, используя критериальное пространство. Рассмотрим для этого пример, когда альтернативы оцениваются по двум критериям. Принимая точку, соответствующую i -ой альтернативе, за начало координат, перенесем в эту точку все координатные оси критериального пространства. Если в положительном октанте полученной таким образом системы координат не окажется ни одной точки, соответствующей какой-то другой альтернативе, то i -ая альтернатива является не улучшаемой.

На рис. 4а только одна не улучшаемая альтернатива – это альтернатива 3, на рис. 4б таких альтернатив две – 2 и 3, а на рис. 4в все альтернативы неулучшаемые.



Множество неулучшаемых альтернатив – это множество Парето.

Получение множества Парето – 1-й шаг поиска лучшего решения. Есть много других, кроме рассмотренного, эффективных методов изучения множества Парето.

Для выбора альтернативы на множестве Парето нужно привлекать другие соображения, связанные с особенностями решаемой задачи.

б) Случай, когда нет численных оценок, а есть только результаты попарного сравнения

Пусть каждая альтернатива характеризуется n -свойствами и по каждому из этих свойств проведена операция попарного сравнения. Все операции обладают свойствами транзитивности и антирефлексивности. Если сравнение возможно для каждой пары альтернатив по каждому свойству, то оказывается возможным все альтернативы ранжировать по каждому свойству, при этом будет получен набор перестановок из альтернатив – матрица с n -столбцами (по числу свойств) и m -строками (по числу альтернатив).

Пример модели принятия решения в условиях неопределённости.

В условиях неопределенности принцип выбора зависит, как отмечалось выше, от характера противодействия противной стороны (внешней среды). В тех случаях, когда среда «ведет себя» антагонистическим образом по отношению к решению, выбранному органом управления системы, имеет место ситуация, относящаяся к теории игр. Если среда «пассивна» (например, это пассивная природа) и управляющему органу известно распределение вероятностей на множестве состояний среды, то имеет место «игра с природой», или «статистические решения». В общем случае возможна целая градация ситуаций, определяющих стратегию поведения среды.

Рассмотрим далее информационную ситуацию, когда распределения вероятностей на элементах состояния среды априори известны. Рассмотрим простейший случай, не будем привлекать такие понятия, как функция правдоподобия, функция потерь.

Итак, распределение вероятностей задано в виде ряда

$$P = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_1), p_j = P(\theta = \theta_j), \sum_1^n p_j = 1$$

где θ_j – состояние среды.

Это одна из возможных простейших ситуаций. На практике расчет априорного распределения вероятностей состояния среды производится либо путем обработки статистического материала, либо аналитическими методами на основании гипотез о поведении среды.

Обозначим:

1) $\chi = \{\chi_1, \dots, \chi_i, \dots, \chi_m\}$ – множество возможных альтернатив – вариантов принятия решения;

2) $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_j, \dots, \theta_1\}$ – множество возможных состояний среды, причем вероятности этих состояний известны: $P_j = P\{\theta = \theta_j\}$;

3) $\Phi = \{\phi_1, \dots, \phi_t, \dots, \phi_r\}$ – множество принципов (методов) выбора и оценки принятого решения.

С методом выбора решения связано понятие оценочного функционала – F .

$F = \{f_{i,j}\}$, где $f_{i,j}$ – выигрыш (потеря), если при состоянии среды $\theta_j \in \theta$ было принято решение $\chi_i \in \chi$.

Будем считать, что оценочный функционал имеет положительный ингредиент и обозначается F^+ , если ставится задача достижения максимума: $\max\{f_{i,j}\}$. При отрицательном ингредиенте функционала F^- лучшему решению соответствует $\min\{f_{i,j}\}$.

Таким образом, ситуация принятия решения характеризуется тройкой $\{\theta, \chi, F\}$.

Соответственно может быть получена матрица значений оценочного функционала (ситуационная матрица)

$$\begin{pmatrix} f_{1.1} & f_{1.2} & \dots & f_{1.n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n.1} & f_{n.2} & \dots & f_{n.n} \end{pmatrix}$$

Различным принципам выбора соответствуют определенные критерии выбора – алгоритмы, которые определяют единственное оптимальное решение или множество таких решений. Для рассматриваемой ситуации могут быть использованы критерий Байесса, критерий минимакса (максимина), критерий минимума дисперсии оценочного функционала и др.

Примеры решения оптимизационной задачи методом динамического программирования

Динамическое программирование – метод оптимизации задач (процессов, операций), решение которых может быть разбито на несколько этапов, а целевая функция является соответственно аддитивной (или мультипликативной).

Пусть задача (процесс) разбита на n этапов, $i = \overline{1, n}$.

Целевая функция – суммарный выигрыш в задаче на максимум (суммарные потери в задаче на минимум) запишется в виде

$$W = \sum_{i=1}^n \nabla W_i$$

где ∇W_i – выигрыш (потери) на i -м этапе.

На каждом i -м этапе система (процесс) может находиться в одном возможном для этого этапа состоянии – s_{ki} , $s_{ki} \in S_i$, здесь S_i – множество всех состояний системы (процесса) на i -м этапе. В каждом состоянии системы s_{ki} может быть принято одно из возможных, согласно условиям задачи (операции), решений (управлений) – $a_{j,ki}$, где $a_{j,ki} \in A_{ki}$, здесь A_{ki} – множество всех допустимых решений (управлений) при нахождении системы (процесса) на i -м этапе в k -м состоянии.

В результате принятия решения система (процесс) переходит в $s_{l,i+1}$ состояние, при этом имеет место выигрыш (потери), равный $\nabla W_{k,i}(j)$.

Таким образом, в результате принятия j -го решения система (процесс) перемещается с этапа i на этап $i+1$, при этом в зависимости от принятого решения переходит из состояния s_k в состояние s_l , а целевая функция получает приращение $\nabla W_{k,i}(j)$.

Существо метода заключается в том, что начиная с последнего этапа на каждом i -м этапе для каждого k -го состояния ищется так называемый условный оптимум $W_{k,i}^+$, являющийся суммой текущего приращения целевой функции и оптимального значения целевой функции от $i+1$ – го этапа до конца процесса.

При этом в результате управления, принятого на i -м этапе, система (процесс) перейдет на $i+1$ -м этапе в состояние, зависящее от решения, принятого на i -м этапе.

Основное рекуррентное соотношение метода запишется в виде

$$W_{k,i}^+ = \max_j \{ \nabla W_{k,i}(j) + W_{l,i+1}^+ (\varphi_j(s_k \rightarrow s_l)) \}$$

где $\varphi_j(s_k \rightarrow s_l)$ – функция, определяющая, в какое состояние перейдет система (процесс) из состояния k на этапе i при воздействии на систему управления $a_{j,ki}$.

После последовательного вычисления всех условных оптимумов от последнего n -го этапа до 1-го будет получен абсолютный оптимум и определен вектор управлений $A_{\text{опт}} = (a_1, a_2, \dots, a_{j,ki}, \dots, a_n)$, обеспечивающий этот оптимум.