

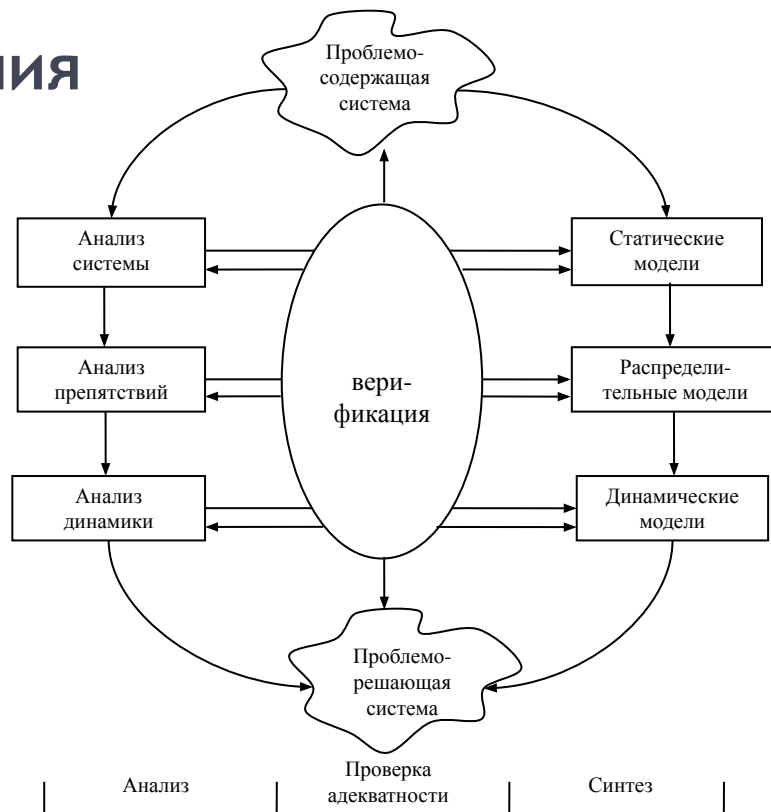
Системный анализ в профессиональной деятельности

Москва 2022

РАЗДЕЛ II. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Структурная схема процесса моделирования системы



Условные обозначения:

————— – моделирование

————— – верификация

Комментарии к схеме

- Основу процесса моделирования составляют философские подходы к познанию мира – анализ и синтез
- Несмотря на то, что на схеме они как-бы запараллелены, необходимо помнить, что всякому синтезу должен предшествовать анализ
- Все три связки «анализ - синтез» могут многократно повторяться, уточняя детали исследуемой проблемы и повышая адекватность синтезируемых моделей
- Проверка адекватности моделей (верификация) проводится с целью обеспечения необходимой точности соответствующего модельного описания предметной области исследования

Необходимые определения

Проблемосодержащая система – это система, составляющая объект нашего исследования, в которой обнаружена проблема, препятствующая ее эффективному функционированию и/или целенаправленному развитию

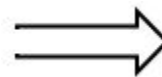
Проблеморешающая система – это система, способная повлиять на текущую ситуацию таким образом, чтобы устранить существующую проблему или, по крайней мере, смягчить ее пагубное влияние

Замечание: как правило, построение проблеморешающей системы составляет цель проводимого системного исследования

Этапность моделирования

- 1-й этап – моделирование статичности системы посредством совместного анализа

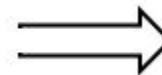
функций
процессов
структуры
внешней среды



Статические модели

- 2-й этап – анализ механизмов распределения системо-образующих ресурсов

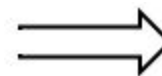
богатства
знаний
власти
ценностей
красоты



Распределительные модели

- 3-й этап – моделирование динамики системы посредством анализа

причинно-следственных связей между элементами систем
временных диаграмм основных характеристик (показателей) системы



Динамические модели

Проблеморешающая система

- В результате последовательного анализа отдельных аспектов исследуемой (проблемосодержащей) системы, синтеза отражающих их моделей, проведения экспериментов и расчетов на этих моделях должна появиться проблеморешающая система
- Проблеморешающая система может меняться от случая к случаю и принимать любую из следующих форм:
 - управленческое решение
 - алгоритм
 - методика
 - целевая программа
 - управленческая команда

Место моделирования в системном исследовании

- В серьезном системном исследовании все три этапа связки «анализ – синтез» могут повторяться не один раз, последовательно уточняя детали исследуемой проблемы и повышая адекватность синтезируемых моделей
- В отдельных случаях для решения проблемы может быть достаточно одной-единственной модели, например, статической процессной модели системы

Вывод: в любом случае для конструктивного исследования проблемосодержащей системы необходимо составить ее модель

Особенности моделирования экономических систем

- В экономических системах, исследование которых, как правило, приводит к синтезу проблеморешающей системы в виде управленческого решения, процесс моделирования укладывается в следующую последовательность действий:
 - конфигурирование (определение границ) проблемы
 - определение области принятия решений
 - выявление факторов обуславливающих проблему
 - выбор языка (аппарата) формализации
 - построение модели
 - выбор метода решения

Замечание: при исследовании экономических систем «вершиной» модельных построений считается экономико-математическая модель

Экономико-математические модели

- Основная задача экономико-математического моделирования – получить выражение связывающее цель системы из средствами ее достижения
 - В различных источниках это выражение может называться по разному в т.ч.
 - целевая функция
 - критериальная функция
 - критерий оптимизации
 - критерий функционирования
 - показатель эффективности
 - функция цели
 - Целевая функция может дополняться ограничениями на отдельные переменные модели или их комбинации
- Замечание: в любом случае выражение связывающее цель системы и средства ее достижения – это закон, позволяющий оценить эффективность того или иного пути движения к цели*

Вариативность модельных построений

- Если такой закон (целевая функция) известен, то он «прописывается» в **экономико-математической модели**, которая разрешима практически всегда (точными либо приближенными методами)
- Если закон неизвестен, то стараются определить закономерности на основе статистических исследований и установить корреляционную зависимость между целевой функцией и ключевыми факторами, определяющими «лицо» системы, сведя их в единое целое в рамках **эконометрической модели**
- Если эконометрическую модель построить нельзя, то выдвигается гипотеза относительно причинности появления и источников подпитки проблемы и на ее основе создается **имитационная модель**, с помощью которой исследуется возможные варианты решения проблемы
- Если и имитационную модель построить невозможно, то выбирают или разрабатывают теорию, которая содержит утверждения и правила, позволяющие сформулировать концепцию решения проблемы и сформировать **концептуальную модель**, для которой позже сконструировать механизм принятия решений

Допустимые модели проблемной ситуации



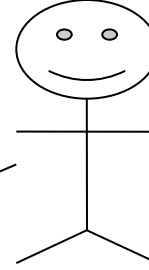
Замечание: если иметь в виду диссертационные исследования, то первые два уровня (от проблемы) составляют поле для кандидатских работ, в то время как последующие два уровня могут составить предмет для докторских изысканий

Предпосылки к классификации методов моделирования

- Постановка любой системной задачи заключается в том, чтобы перевести ее вербальное описание в формализованную форму
- Необходимость постановки и решения трудно формализуемых задач была и есть отправным пунктом к новым научным исследованиям, преследующих цель синтеза новых методов и средств решения проблем
- Для коллективного решения масштабных задач стали развиваться специальные приемы и методы (мозговой штурм, метод Дельфи, интерактивное моделирование и т.п.) активизирующие опыт, знания и интуицию всех членов исследовательского коллектива и приводящие в конечном итоге к приемлемому решению

Вывод: между проблемой, описанной на содержательном уровне, и экономико-математической моделью как наиболее приемлемой формой ее отображения сложился целый спектр методов, которые помогают формализовать проблемную ситуацию

Шкала методов формализации проблемы



Проблема

Математическая модель

Метод интерактивного моделирования

Мозговой штурм

Метод Дельфи

⋮

Морфологические методы

Графические методы

⋮

Теория множеств

Статистические методы

Математические методы

Систематизация методов моделирования

- Развитие методов моделирования идет не так последовательно как это показано на схеме
- Методы возникают и развиваются параллельно, а при решении конкретных системных задач используются случайным образом без соблюдения эволюционности и наследственности
- Если «переломить» приведенную выше шкалу по середине – получим два больших класса методов моделирования систем:
 - методы формализованного представления систем
 - методы активизации интуиции, опыта, навыков и знаний специалистов

Классификация методов моделирования систем



Проблемы моделирования экономических систем: адекватность моделей

- Адекватность модели ассоциируется с точностью отражения всех существенных сторон моделируемой системы, исходя из цели ее исследования
- Степень адекватности разрабатываемой модели зависит от знания (модельерами) предметной области и выразительных возможностей используемого языка моделирования
- Модель системы можно интерпретировать как некоторый объект, в котором закодированы нужные для выработки решения знания, которые могут быть обнаружены в процессе ее исследования
- Закладка знания в модель осуществляется в процессе моделирования средствами языка моделирования помимо воли участников этого процесса

Проблемы моделирования экономических систем: устойчивость модельных построений

- Моделирование системной динамики осуществляется посредством фиксирования последовательных состояний исследуемой системы, предполагая относительно малое время перехода из одного состояния в другое
- Исследованием таких переходных процессов занимается *синергетика*, перенося главный акцент с взаимодействия элементов (подсистем) экономической системы на внешние эффекты, порождаемые структурными изменениями последней
- В рамках синергетики процесс развития системы представляется последовательностью эволюционного изменения состояний системы внутри одного жизненного цикла со скачкообразным переходом на новый качественный уровень, знаменующий собой начало ее нового жизненного цикла
- Для перехода в качественно новое состояние система должна на некоторое время потерять устойчивость – следовательно «устойчивость» и «потеря устойчивости» являются обязательными атрибутами моделирования

Проблемы моделирования экономических систем: недооценка важности модельных построений

- Эта проблема носит субъективный характер
- Ее существование связывают с отсутствием специального термина для обозначения модели как отдельной составляющей в ключевой триаде информационной технологии: «техническое обеспечение – [модельное обеспечение?] – программное обеспечение» = «hardware - ? - software»
- Проблема недооценки важности модельного подхода проявляется в том, что легитимные власти признают за истину только то в моделировании, что доказывает целесообразность их существования

Проблемы моделирования экономических систем: отсутствие специального математического языка для экономики

- Поскольку при моделировании экономических систем часто используется модельный аппарат, разработанный для других предметных областей, то процессы синтеза моделей исследуемой предметной области всегда сопровождаются проблемами, основными среди которых являются:
 - выбор языка (аппарата) формализации проблемы
 - отсутствие универсального математического языка для адекватного описания экономических систем (процессов, явлений)
 - ограниченность математических методов и средств позаимствованных из других областей человеческих знаний (в первую очередь из физики)
- Возможность заимствования чужого модельного аппарата не всегда обосновывается

Вывод: необходимо работать над созданием специального, экономически ориентированного математического аппарата, который уже на уровне основных понятий отражал бы специфику экономических систем

Резюме

Рассмотренные здесь этапность моделирования проблемной ситуации, иерархия модельных построений в зависимости от степени прозрачности связей между целью системы и средствами ее достижения, а также классификация методов моделирования помогут системному аналитику осознанно выбирать инструментарий для построения модели исследуемой системы. Проблемы использования математического аппарата для адекватного описания экономических систем приведены в надежде подвигнуть читателей к исследованиям на этом направлении экономической науки.

Темы для рефератов и эссе

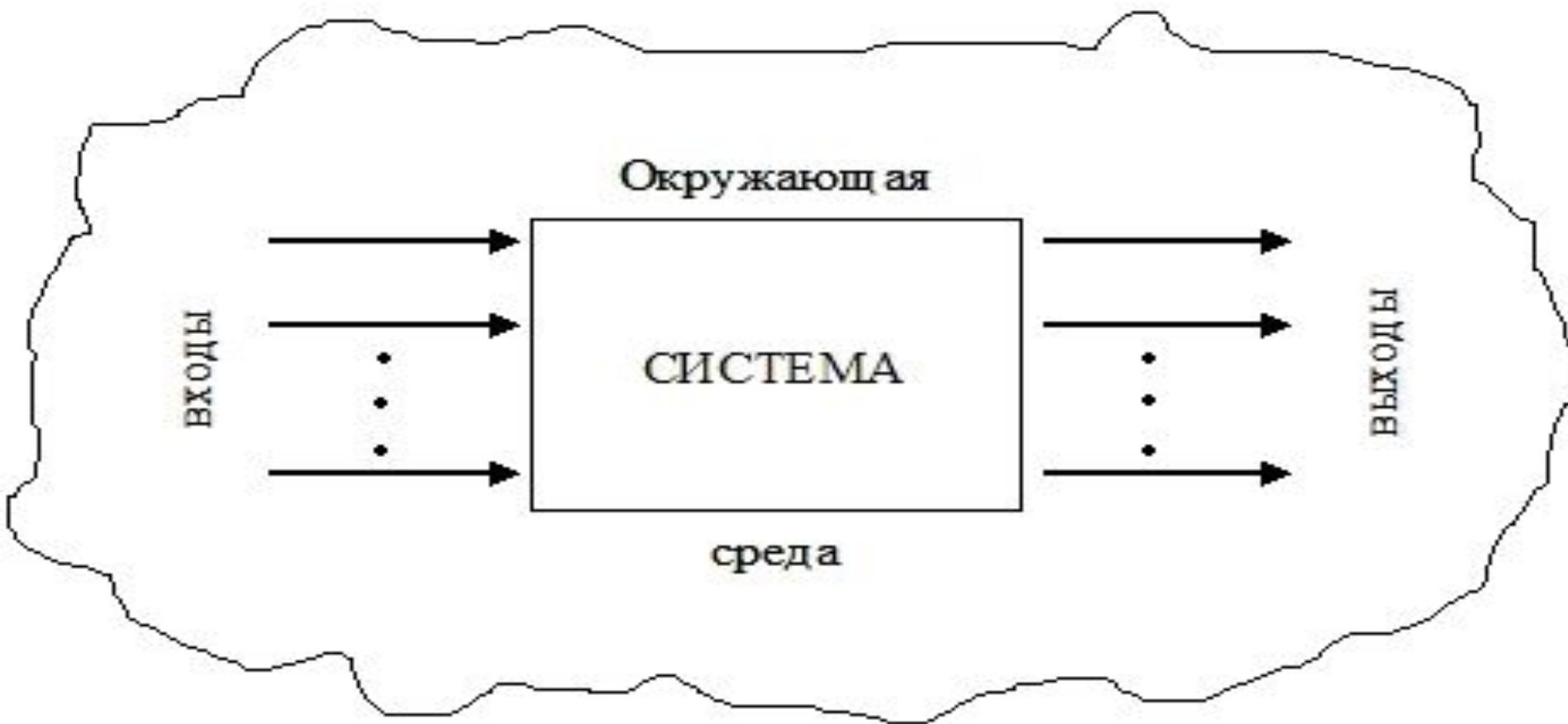
- Перспективные направления системных исследований в экономике
- Экономическая математика: состояние и перспективы развития
- Сценарий развития отечественной экономики

6. СТАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Модель «черного ящика»

- Является простейшим отображением реальной системы, в котором полностью отсутствуют сведения о ее внутреннем содержании, а задаются только входные и выходные связи системы со средой
- Границы между системой и средой в модели «черного ящика» не описываются, а лишь подразумеваются
- Несмотря на внешнюю простоту модель «черного ящика» часто оказывается очень полезной, а иногда – единственно возможной

Схема модели «черного ящика»

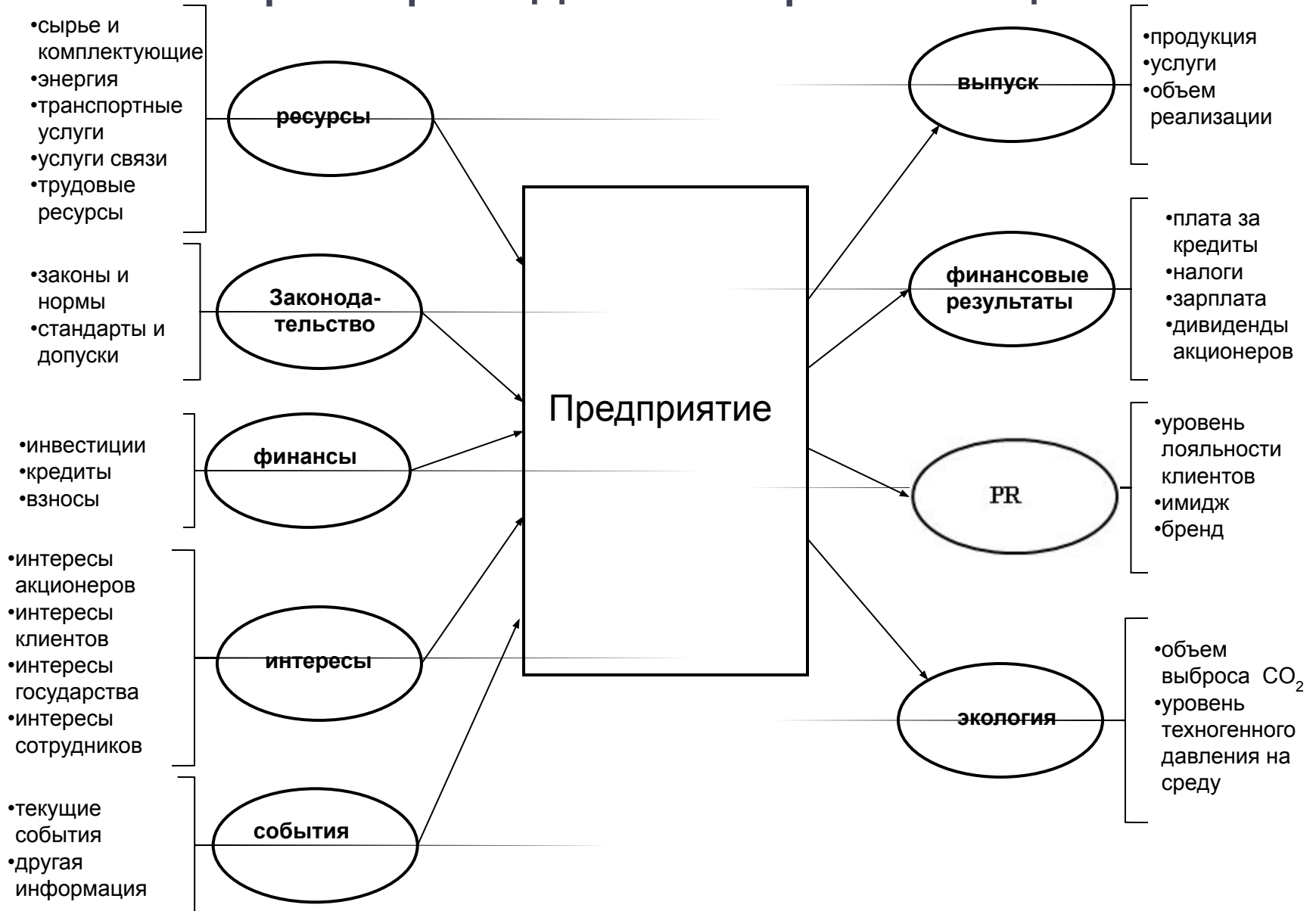


Традиционные сферы использования модели «черного ящика»

- Исследование элементарных частиц
- Изучение влияния лекарства на живой организм
- Определение последствий техногенного воздействия на природу
- Анализ возможностей влияния на экономическое развитие другого государства

Замечание: по существу любое исследование реальной экономической системы в условиях отсутствия доступа к ней начинается с модели «черного ящика»

Пример модели «черного ящика»



Комментарии к модели

- Даже беглый взгляд на модель «черного ящика» системы «предприятие» позволяет констатировать, что многие составляющие входа-выхода не являются элементарными и требуют дальнейшей декомпозиции
- Некоторые (не исключено что очень важные) связи системы «предприятие» - технические и технологические новшества, новые знания в области организации труда, климатические условия, логистические особенности и др. - не нашли отражения в модели
- Не исключено, что элемент «зарплата» как задаваемый обществом норматив необходимо перенести на вход модели, а вместо него включить элемент «оплата труда»

Специфика моделей «черного ящика»

- Бросающая в глаза внешняя простота моделей «черного ящика» очень обманчива
- Практическое построение модели связано с множеством трудностей, основные из которых заключаются в следующем:
 - неограниченное число способов (взаимодействия системы с внешней средой)
 - размытость понятия «существенность» при формировании входов - выходов модели
 - сложность определения что является входом, а что выходом модели

Модель состава системы

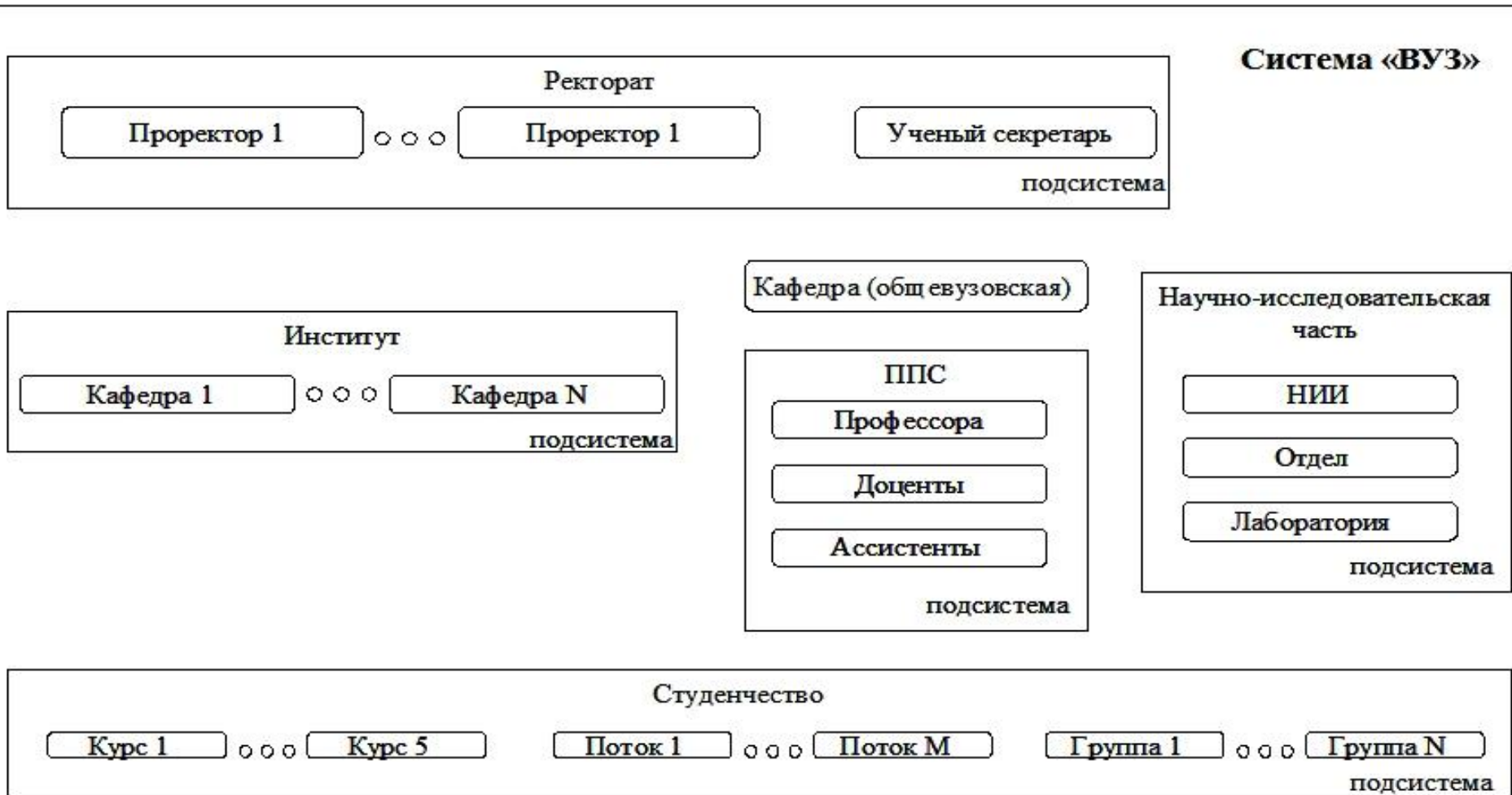
- Является отражением внутреннего наполнения исследуемой системы т.е. описывает ее составные части
- При этом одни составные части интерпретируются как неделимые и их относят к классу **элементов** системы, а другие – рассматриваются как агрегированные, т.е. состоящие из более мелких частей, и их относят к классу **подсистем** системы
- По возможности в модели состава отражается и состав образующих ее подсистем

Замечание: модель состава ограничена сверху и снизу:

- сверху – границей системы

- снизу – тем, что считается элементом системы

Фрагмент модели состава системы «вуз»



Условные обозначения:

НИИ – научно-исследовательский институт

ППС – профессорско-преподавательский состав

Сложности построения моделей состава

- аналитики-«модельеры», участвующие в построении модели состава, могут обладать различными знаниями о системе
- размытость понятия «элементарность» (то, что с одной точки зрения является элементом, с другой – может оказаться подсистемой, подлежащей дальнейшей декомпозиции)
- целевой характер модели (для различных целей одну и ту же систему придется разбить на различные части)
- условность границ между подсистемами (в силу условности всякого деления целого на части)

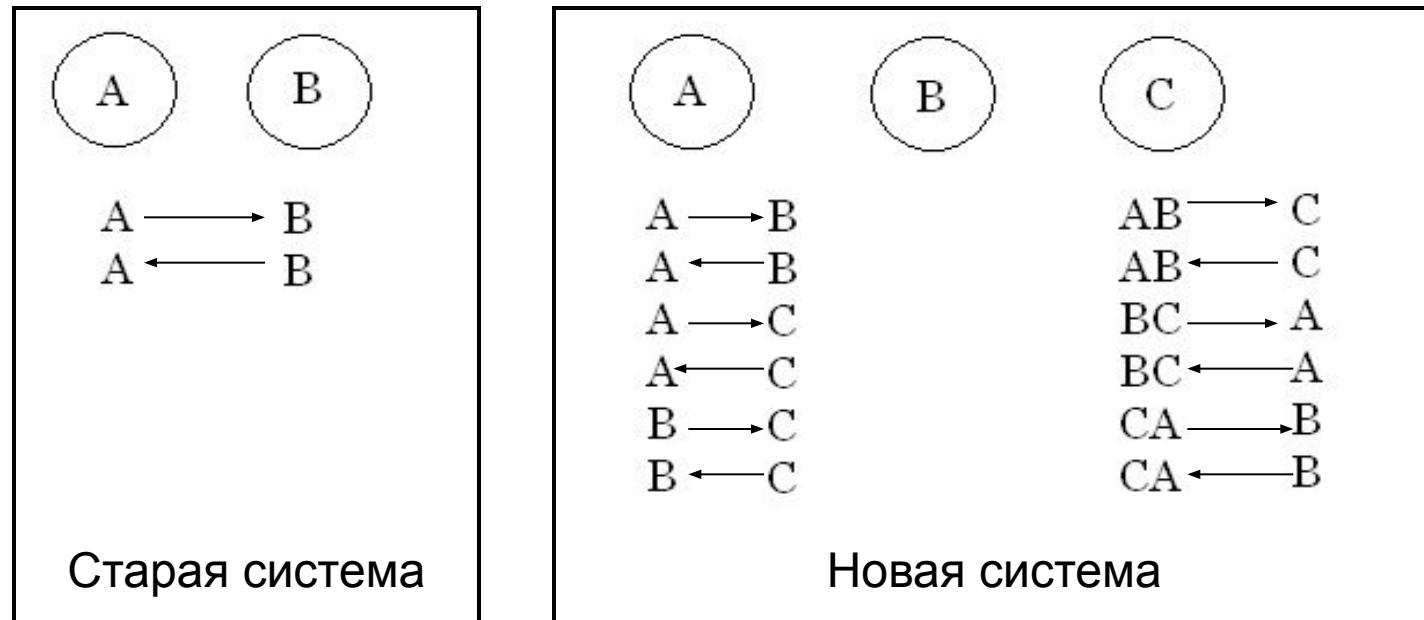
Следствие: если поручить разным системным аналитикам определить состав одной системы, то в силу отмеченных причин наверняка получим очень различающиеся модели состава

Сложность системы как производная ее структуры

- О сложности исследуемой системы в первую очередь судят по числу и разнообразию отношений между ее элементами
- Новые связи образуются в результате роста и развития системы
- Появление новых элементов в системе приводит к появлению новых связей, число которых может расти экспоненциально

Закон опережающего роста связей в системе

Появление новых элементов в системе приводит к значительному увеличению числа связей (см. пример)



Замечание: увеличение числа элементов системы на 1 (от 2-х до 3-х) увеличило число потенциальных связей в системе в шесть раз (от 2 до 12)

Модель структуры

- Как правило, представляет собой перечень возможных связей элементами исследуемой системы
- Формируется на институциональной основе
- Носит несколько абстрактный (отвлеченный) характер поскольку сами элементы в системе пока отсутствуют
- Используется как «прелюдия» к составлению структурной модели системы

Пример: перечень отношений между структурными подразделениями, рабочими местами и должностными позициями при проектировании организационной структуры экономической системы

Структурная модель системы

- Представляет собой некий симбиоз модели состава, модели структуры и модели «черного ящика», исследуемой системы
- В структурной модели указываются элементы системы, связи между ними и связи отдельных элементов с окружающей средой
- Устойчивость системы обеспечивают сложившиеся между элементами связи, всячески «сопротивляющиеся» всем попыткам их разрыва и/или переадресации

Проблемы и особенности структурного моделирования

- В реальных системах разнообразие и множественность связей обуславливают физическую невозможность их полного учета при структурном моделировании
- Для модели отбираются только те связи, которые играют существенную роль в обеспечении устойчивости исследуемой системы
- Отбор существенных связей осуществляет аналитик, руководствуясь целью исследования
- При построении и исследовании структурных моделей всех классов систем широко применяются методы теории графов

Замечание: поскольку структурная модель представляет собой наиболее полное и подробное описание любой системы, ее еще называют моделью «белого ящика»

Структурные модели экономических систем

- В последние 20-25 лет наибольшую популярность в экономике получили информационные модели экономических систем (ИМЭС)
- В качестве структурных элементов таких моделей выступают
 - сущности
 - потоки данных
 - процессы
 - накопители данных

Замечание: в литературе встречаются следующие синонимы ИМЭС: модели бизнес-процессов, процессные модели, диаграммы потоков данных

Язык информационного моделирования: сущности

В качестве сущностей обычно выступают логические классы информационных объектов экономической системы, которые представляют собой *источники* либо *приемники* информации

Примеры сущностей:

<заказчики>

<налогоплательщики>

<держатели акций>

<бухгалтерия>

<АИС>

<поставщики>

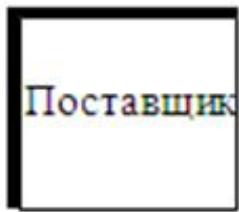
<персонал>

<инвесторы>

<склад>

<АРМ>

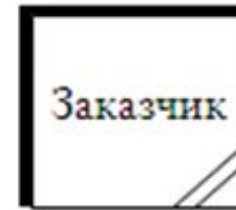
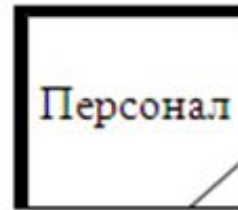
Обозначение сущностей в ИМЭС



а) простая
сущность



б) дублированные внутренние
сущности



в) дублированные внешние
сущности



Язык информационного моделирования: потоки данных

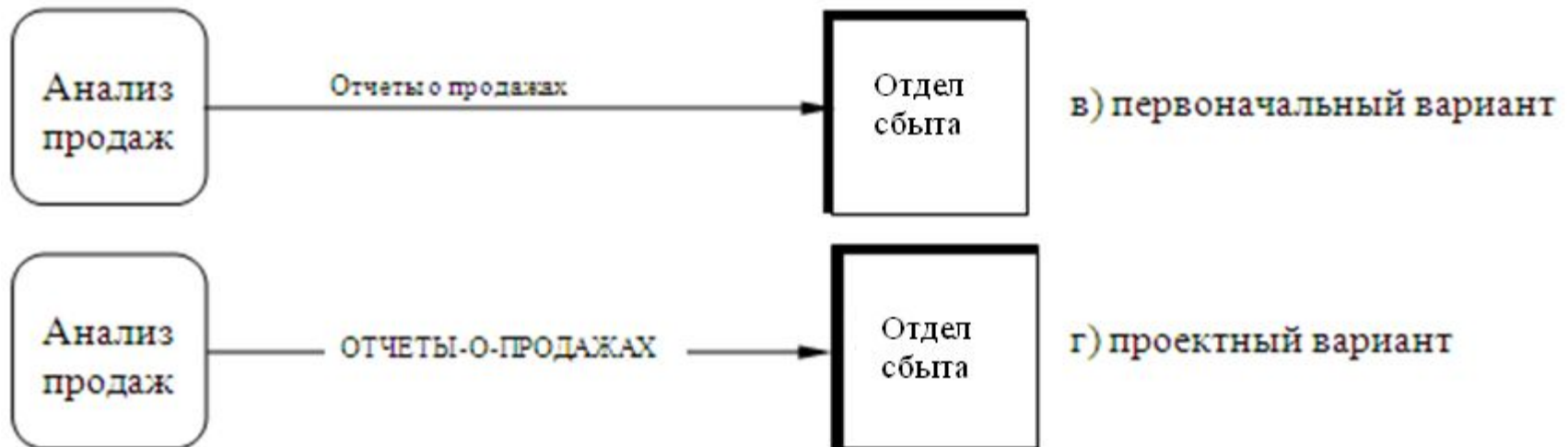
- Любой поток данных следует рассматривать как пневмопочту, по которой посылаются пакеты данных
- Потоки данных связывают сущности, процессы и накопители данных
- Название потока данных указывается вдоль стрелки или над ней

Отражение потоков данных в ИМЭС



б) разделенные встречные потоки

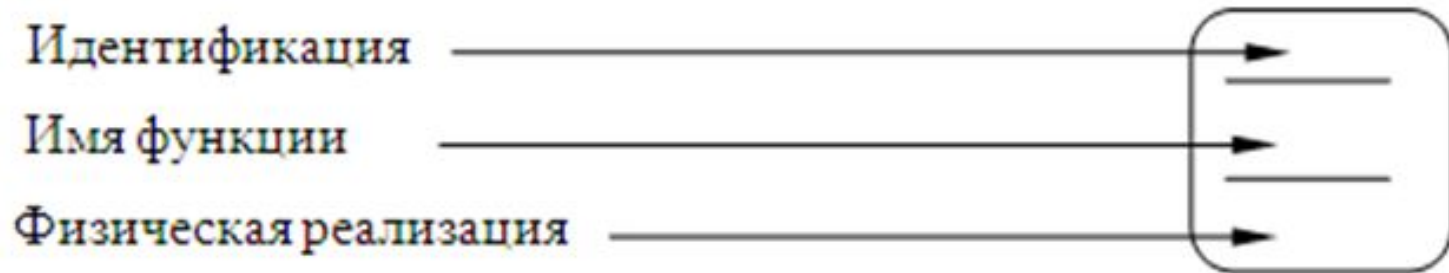
а) единая потоковая магистраль



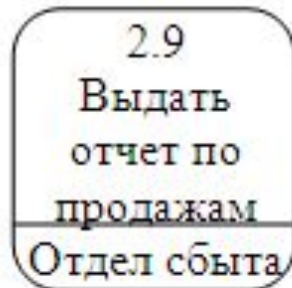
Язык информационного моделирования: процессы

- Процессы описывают функции обработки данных
- Идентифицируются процессы посредством нумерации
- Содержание процесса фиксируется предложением которое начинается с глагола в неопределённой форме
- В блоке «процесс» может указываться исполнитель (владелец) процесса

Отражение процессов в ИМЭС



а) зональная организация блока «процесс»



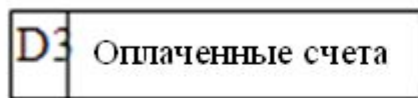
б) примеры процессов

Язык информационного моделирования: накопители данных

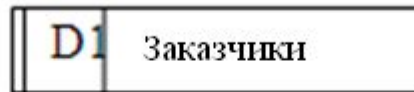
- Накопители данных – центры возникновения и хранения данных
- Накопители данных принимают и сохраняют данные, либо позволяют их считывать для «нужд» других блоков ИМЭС
- При считывании данных с накопителя можно задать аргумент поиска

Замечание: чтобы не усложнять диаграмму пересечением линий используют дубликаты накопителей данных

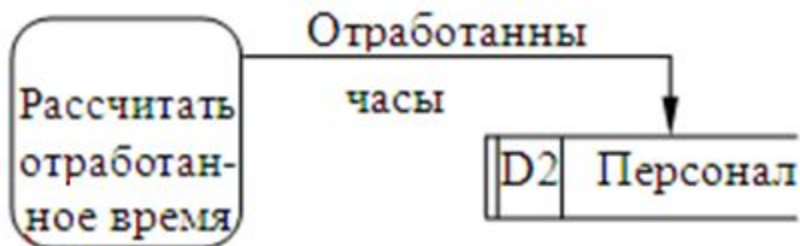
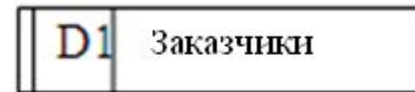
Отражение накопителей данных в ИМЭС



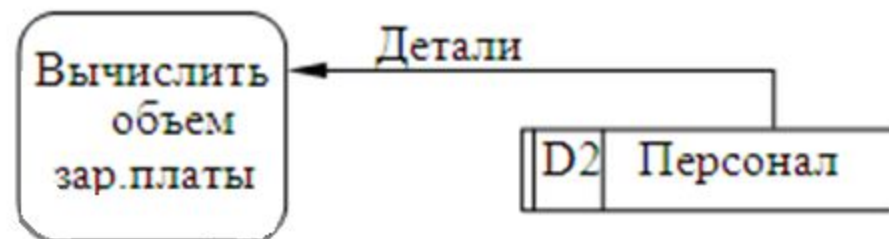
а) накопитель данных



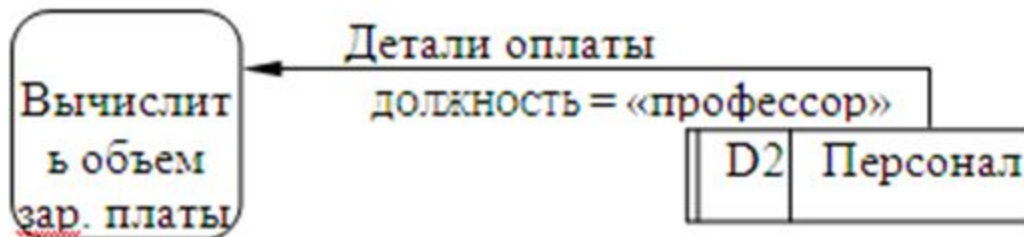
б) дублированные накопители данных



в) запоминаемые данные



г) считываемые данные

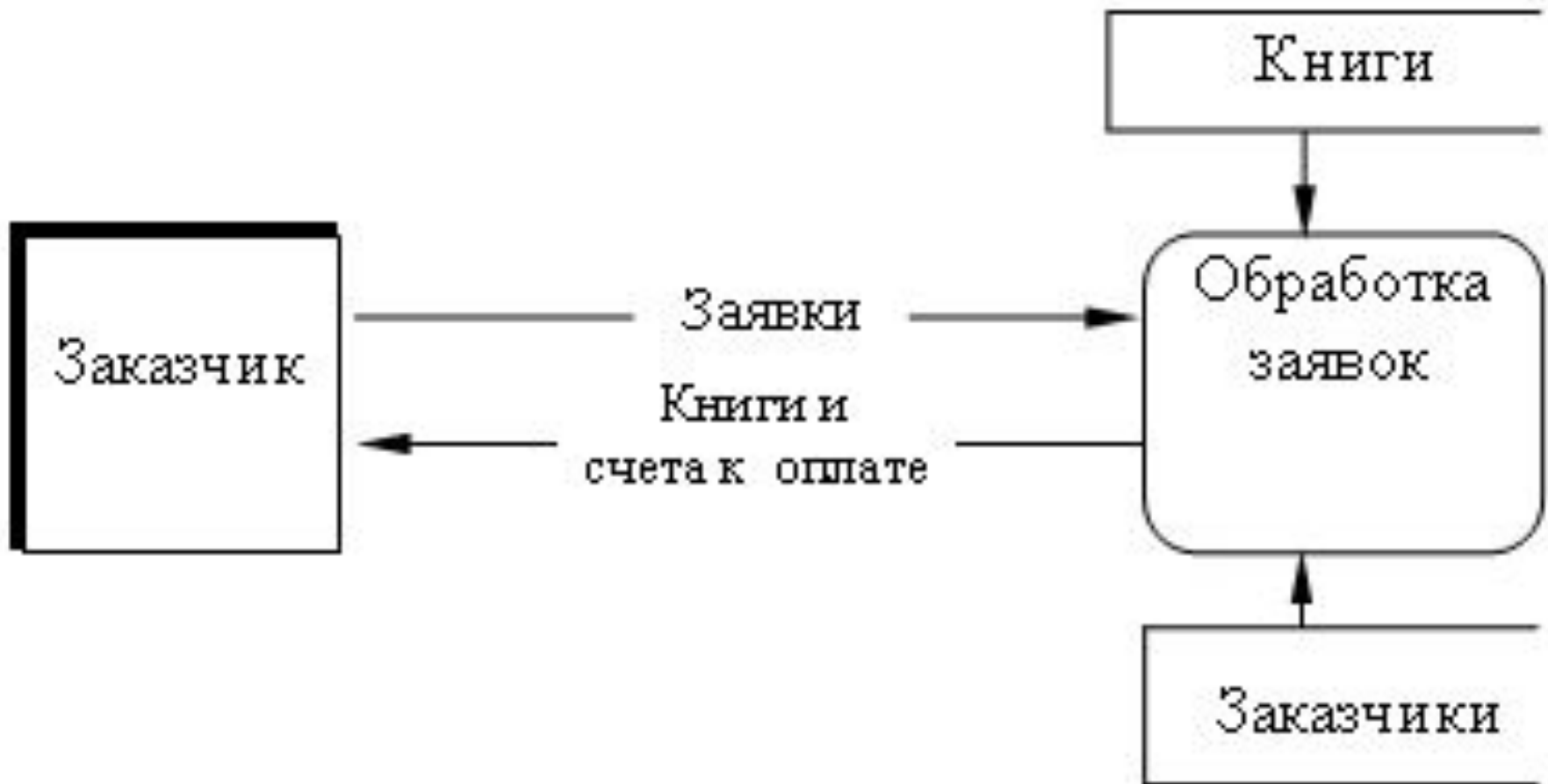


д) считывание по заданному аргументу поиска

Постановка задачи контрольного примера

- Построить диаграмму «системы с распределением без наличия запасов», в качестве которой выступает посредническая фирма, работающая на книжном рынке
- Схема работы такой фирмы заключается в следующем:
 - она получает заказы от конечных пользователей (юридических и физических лиц)
 - группирует их определённым образом размещает свои заказы издательствам и/или оптовым торговцам
 - полученные книги рассылает своим клиентам
 - зарабатывает на скидках с оптовых закупок

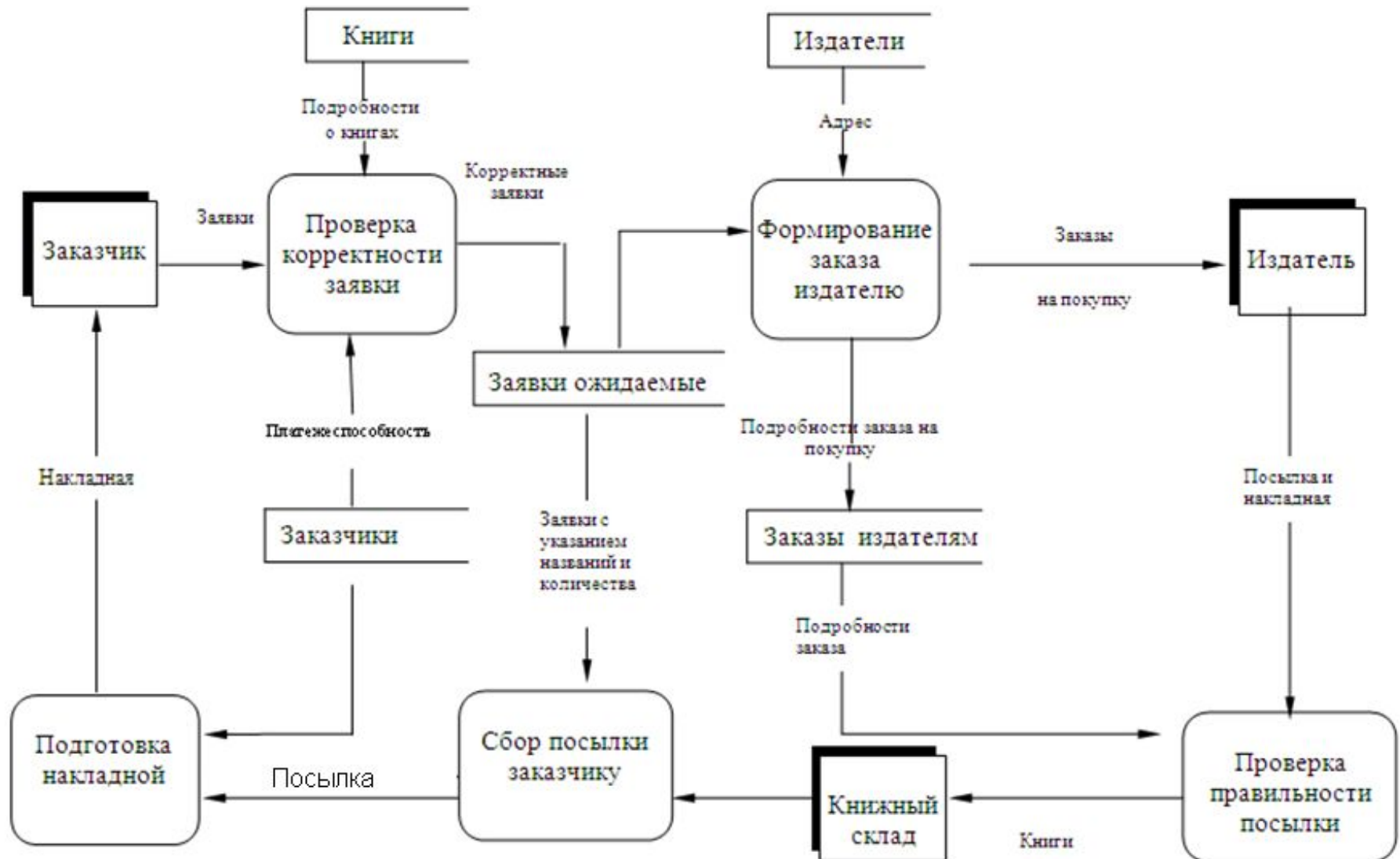
"Первый взгляд" аналитика на систему



Расширение взгляда аналитика на систему



Рабочая схема выполнения заявок



Значимость структурных моделей

- Структура модели является наиболее полным и подробным описанием исследуемых систем
- Они нашли широкое применение при моделировании масштабных изменений в организационных, экономических и др. социокультурных системах
- Существует целое семейство программно-инструментальных средств, поддерживающих процессы информационного моделирования: Rwin, BPWin, Architecture и др

Резюме

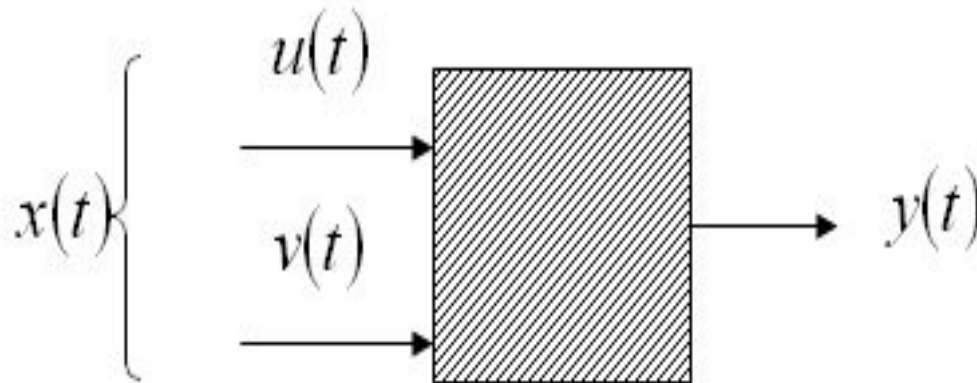
Все рассмотренные в этой главе типы моделей являются формальными. Это означает, что они не относятся ни к одной конкретной системе. Чтобы получить модель заданной системы, нужно придать формальной модели конкретное содержание, т.е. решить, какие характеристики реальной системы нужно «вписать» в формальную модель избранного типа, а какие — нет, считая их несущественными. Это процесс, как было показано, не формализуем, поскольку сами признаки существенности и несущественности очень редко поддаются формализации. Столь же слабо поддаются формализации признаки элементарности и признаки разграничения между подсистемами. В силу указанных причин процесс построения содержательных моделей является творческим. Тем не менее существенную помощь интуиции системных аналитиков, разрабатывающих содержательные модели, может оказать формальные модели и рекомендации по их наполнению конкретным содержанием. Формальная модель является «окном», через которое аналитик смотрит на реальную систему, выстраивая ее содержательную модель

Темы для рефератов и эссе

- Модификации графовых моделей
- Экономические приложения теории графов
- Модель «черного ящика» в экономических исследованиях
- «Черный ящик» системы «Финансовый университет»
- Особенности моделирования бизнес-процессов в системе менеджмента качества

7. ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Динамическая модель черного ящика



$$\begin{cases} X^t = \{u(t), v(t)\}, & u(t) \in U, \quad v(t) \in V \\ Y^t = \{y(t)\}, & y(t) \in Y \end{cases}$$

$x(t)$ – входной поток

$u(t)$ – управляемые входы

$v(t)$ – неуправляемые входы

$y(t)$ – выход системы

t – текущий момент времени

X^t – интегральный вход в момент $t \in [0, T]$

U – множество допустимых управляемых входов

V – множество допустимых неуправляемых входов

Y^t – интегрированный выход в момент $t \in [0, T]$

T – горизонт моделирования

Замечание: если даже считать, что $y = \Phi(u(t), v(t))$, то модель «черного ящика» предполагает, что Φ – преобразование не известно

Безинерционные системы

- Среди систем, описываемых динамическими моделями «черного ящика» наиболее известны, так называемые, безинерционные системы
- Динамическая система называется **безинерционной**, если она мгновенно преобразует вход в выход, т.е. если значение $y(t)$ появляется сразу после ввода значения $x(t)$.

Замечание: в экономике к классу безинерционных систем можно отнести только биржевые сделки (и то с определённой натяжкой)

Память системы

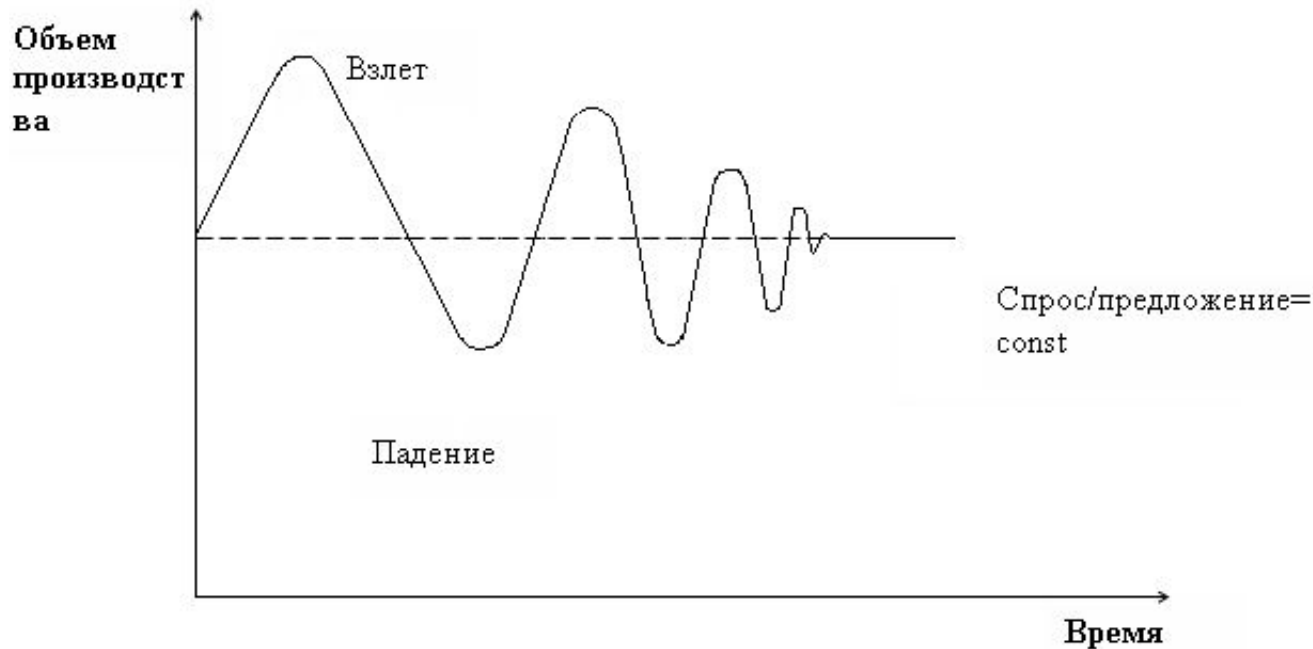
- При моделировании экономических систем необходимо помнить, что в них всегда присутствует задержка, и, более того, следствие (результат) может проявиться совсем не в том месте, где его ожидали
- Обратная связь действует по цепочке причинно-следственных связей, образующих замкнутый контур, и требуется время, чтобы его обойти
- Чем большей динамической сложностью обладает система, тем больше нужно времени на то, чтобы сигнал обратной связи пробежал по ее структуре (сети взаимосвязей)
- *Определение. Время, необходимое для того, чтобы сигнал обратной связи прошел по всем звеньям системы и вернулся в исходную точку называется **памятью системы***

Память экономической системы

Память экономической системы ярко демонстрирует система вывода на рынок нового товара:

- как только на рынке появляется пользующийся спросом новый товар, находится много желающих его производить
- многие фирмы запускают и/или наращивают производство этого товара
- рынок постепенно насыщается, но производители пока этого не ощущают
- когда объем производства превысит критическое значение, спрос станет падать
- по инерции производство товара будет продолжаться еще некоторое время
- начнется затоваривание складов, предложение сильно превысит спрос
- цена на товар упадет
- многие фирмы прекратят производство товара
- предложение упадет так, что не сможет покрыть существующий спрос
- рынок сразу уловит складывающийся дефицит и отреагирует повышением цены
- начнется оживление производства и новый цикл «взлета-падения» рынка

Колебания рынка как проявление памяти системы



- Причину и следствие разделяет задержка во времени, обусловленная уравнивающей обратной связью, и всё это время система помнит как она должна отреагировать на причину.
- Есть два способа «амортизации» такой системной памяти:
 - сделать более надёжными измерения (мониторинг) состояния рынка
 - научиться улавливать разницу во времени и планировать развитие событий с учётом этой разницы

Виды динамики экономических систем

- В теории систем различают два вида динамики:
функционирование и развитие
- Под **функционированием** подразумевают процессы, которые происходят в системе, стабильно реализующей свою миссию (функционирует предприятие, функционируют государственные органы, функционирует городской транспорт и т.п.)
- Под **развитием** понимают изменение организационного строения системы, обусловленное внешними и внутренними причинами (развивается система образования, развивается предприятие, развивается регион)

ЛОГИЧЕСКИЙ ВЫВОД

- *Экономические системы* должны постоянно находиться в фазе развития
- Только постоянное обновление ассортимента выпускаемой продукции или оказываемых услуг, совершенствование технологии производства и методов управления, повышение квалификации и образованности персонала могут обеспечить экономической системе определенные конкурентные преимущества и расширенное воспроизводство

Динамическая модель состава

- Динамическому варианту модели состава соответствует перечень этапов развития или состояний системы на моделируемом интервале времени

$$C^H = C_0 \rightarrow C_1 \rightarrow \dots \rightarrow C_t \rightarrow \dots \rightarrow C_T = C^K$$

где C^H – начальное состояние системы

C^K – конечное состояние системы

$C_t = (C_1(t), C_2(t), \dots, C_i(t), \dots, C_I(T))$ – текущее состояние системы

$C_i(t)$ – значение i -й характеристики системы в момент времени

$t \in [0, T]$ ($i = 1, I$)

t – текущий момент времени

T – горизонт моделирования

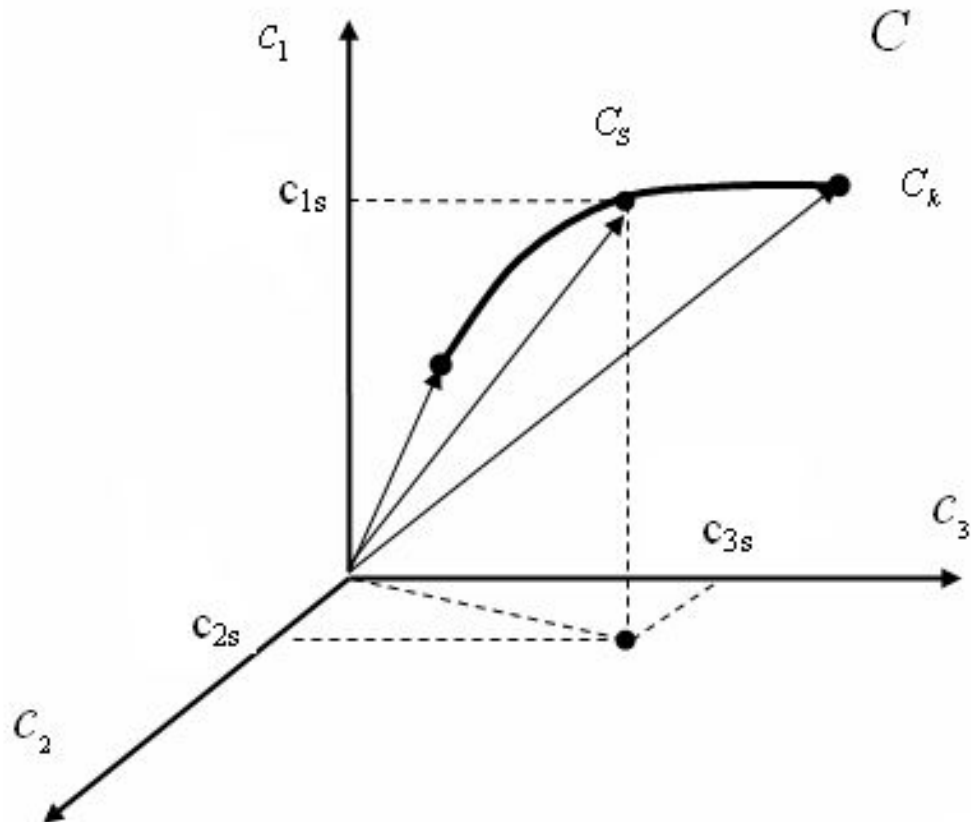
I – число значимых характеристик системы (число фазовых координат)

Определение: динамическая модель состава – это упорядоченная последовательность состояний системы, последнее из которых «покрывает» стратегическую цель ее развития

Новые понятия

- Состояние системы задаётся совокупностью параметров, характеризующих пространственное положение системы
- Степень свободы – допустимое направление развития системы
- Число степеней свободы – число независимых координат, однозначно описывающих положение системы и определяющих возможные направления ее дальнейшего развития
- Траектория развития системы – кривая в фазовом пространстве, описывающая динамику (изменение) системы во времени

Траектория развития системы



Здесь

$C_s = (c_{1s}, c_{2s}, c_{3s})$ – вектор текущего состояния системы

C_1, C_2, C_3 – фазовые координаты

C – фазовое пространство или пространство состояний

Динамическая модель структуры

- Формируется преимущественно на психосоциологической основе
- Представляет собой постоянно меняющуюся (подвижную) сеть возможных взаимосвязей и взаимодействий активных элементов системы
- Нашла практическое применение при проектировании, наполнении и использовании баз знаний продукционного и фреймового характера и разработке стандартов компьютерных информационных систем

Динамическая структурная модель

- В динамических системах элементы могут вступать в самые разнообразные отношения между собой
- Если учесть, что каждый элемент способен пребывать во множестве различных состояний, то даже при небольшом числе элементов они могут быть соединены множеством различных способов
- Построить модель такой системы, в которой предусмотреть изменение состояний одних элементов системы в зависимости от того, что происходит с другими ее элементами – очень нетривиальная задача

Определение: динамическая структурная модель – это некоторый агрегат, который развивается во времени и в каждый текущий момент увязывает в единое целое входы в систему, ее текущее состояние и выходы (результаты функционирования)

Математическая постановка задачи структурного моделирования

Необходимо построить динамическую структурную модель,

которая должна увязать в единое целое вход в систему

$$X = \{x(t)\} = \{u(t), v(t)\}, \quad u(t) \in U, \quad v(t) \in V,$$

промежуточные состояния

$$C_t = (c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)), \quad t \in [0, T],$$

и выход

$$Y = \{y(t)\}, \quad t \in [0, T],$$

где U – множество управляемых входов $u(t)$;

V – множество неуправляемых входов $v(t)$;

$X = U \cup V$ – множество всех входов в систему;

T – горизонт моделирования системы;

C_t – промежуточное состояние системы в момент времени $t \in [0, T]$;

Y – множество выходов системы.

Схема построения динамической структурной модели сетевого типа

Здесь

$\mathbb{R}(\mathbb{R})$

$C_s = (c_{1s}, c_{2s}, c_{3s})$ – вектор текущего состояния системы

C_1, C_2, C_3 – фазовые координаты

C – фазовое пространство или пространство состояний

Практическая сторона динамических структурных моделей сетевого типа

- Такой подход к моделированию динамических систем, как правило, приводит к сетевым моделям различных типов (сетевым графикам, технологическим сетям, сетям Петри и т.п.).
- Независимо от типа сетевой модели их сущность заключается в том, что они описывают некоторую совокупность логически увязанных работ, выполнение которых призвано обеспечить построение некоторой системы (предприятия, дороги, политической партии) или перевода ее в другое состояние, соответствующее новым целям и требованиям времени

Схема построения динамической структурной модели аналитического типа

- Необходимо построить отображения $\left[\begin{array}{l} \eta : C \times T \rightarrow Y \\ \mu : X \times T \rightarrow C \end{array} \right.$
- Графически это можно проиллюстрировать следующим образом

$$X \xrightarrow{\mu} C \xrightarrow{\eta} Y$$
- В общем случае динамическая структурная модель аналитического типа имеет следующий вид

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

$$C_t = \mu(t, x^t), t \in [0, T]$$

Конкретизируя множества X, C, Y и отображения η и μ можно перейти к различным классам математического воплощения динамической структурной модели аналитического типа (конечным автоматам, линейным системам, гладким системам и т.п.)

Резюме

Из четырех приведенных типов динамических моделей сложных систем наибольшее практическое применение нашли структурные динамические модели сетевого типа. Они используются для моделирования возможных последствий принимаемых решений, т.е. для составления моделей, способных ответить на вопросы типа «что будет, если...», для ресурсного и календарного планирования процессов развития систем, а также для поддержки контрольных процедур в процессе отслеживания траектории развития системы. Динамические модели аналитического типа в экономике применяются реже, а если и применяются, то преимущественно для исследования макроуровневых систем

Темы для рефератов и эссе

- Динамические модели экономических процессов Форестера
- Динамические модели управления проектированием информационных экономических систем
- Модели и алгоритмы игры в шахматы
- Лаговые модели