

Тема 5: «МОДЕЛИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»

ВОПРОСЫ

1. Общее представление о моделировании сложных объектов
2. Классификация видов моделирования систем
3. Принципы и подходы к построению математических моделей
4. Этапы построения математической модели

Литература

1. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа: Учебное пособие – Санкт-Петербург, «Издательский дом «Бизнес-пресса», 2000 – 208 с.
2. Антонов А.В. Системный анализ: Учебное пособие для вузов. – М., Высшая школа, 2004. – 454 с.
3. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении: Учебное пособие. – М., Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
4. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. – Киев, МАУП, 2003. – 368 с.

1. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Под **моделированием** понимается процесс исследования объекта, представляемого в виде системы, включающий построение модели, изучение ее свойств и перенос полученных сведений на моделируемый объект.

Общими функциями моделирования являются описание, объяснение и прогнозирование поведения реального объекта.

Типовыми целями моделирования является поиск оптимальных или близких к оптимальным решений, оценка эффективности решений, определение свойств системы, установление взаимосвязей между ее характеристиками, перенос полученной информации на реальный объект. Термин «модель» имеет весьма многочисленные трактовки; **в наиболее общей формулировке модель – это объект, который имеет сходство в некоторых отношениях с прототипом и служит средством описания и/или объяснения, и/или прогнозирования поведения прототипа.**

Формальное определение модели определяет модель как изоморфизм $A \rightarrow \Psi$. Части модели могут обозначаться как гомоморфизм: $f: A \rightarrow \Psi$ или $A \xrightarrow{f} \Psi$, в котором оператор f указывает на способ построения требуемой модели.

Важнейшим качеством модели является представление упрощенного образа реального объекта, отражающего не все свойства прототипа, а только существенные для проведения исследований. Сложные объекты характеризуются выполняемыми процессами (функциями), структурой и поведением во времени. Для адекватного моделирования этих аспектов выделяют функциональные, информационные и поведенческие модели, пересекающиеся друг с другом и формирующие на пересечении область возможных решений для поиска оптимальных свойств объекта.

Функциональная модель объекта описывает совокупность выполняемых им функций, характеризует морфологию объекта (его построение) – состав функциональных элементов и их взаимосвязи.

Информационная (кибернетическая) модель отражает отношения между элементами объекта в виде структур данных (состав и взаимосвязи).

Поведенческая (событийная) модель описывает информационные процессы (динамику функционирования), характеризующиеся категориями «состояние объекта», «событие», «переход из одного состояния в другое», «условия перехода», «последовательность событий».

Значение моделирования важно для сложных объектов, где натурные эксперименты невозможны в виду их сложности и больших затрат,

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ

Основополагающей базой моделирования реальных объектов, представляемых в виде систем, выступает теория отражения, исследующая взаимодействие двух объектов, в результате которого один объект воспроизводится в другом. При моделировании свойство отражения приобретает форму взаимодействия реального объекта и методов познания исследователя. Реальность воспринимается исследователем и воздействует на его методы логической обработки данных, в результате чего в его сознании формируется мысленная модель, которую он каким-либо способом воспроизводит на том ином носителе. То есть, модель содержит в себе данные о реальном объекте, воспринятые исследователем и выраженные им в форме мыслительной конструкции, рисунка, математической формулы, словесного текста, графического изображения, компьютерной программы и т.д. Поэтому **любая модель объективна по своему содержанию и субъективна по форме восприятия**. Т.е. для одного и того же объекта возможно создание множества совершенно разных моделей, отражающих субъективный взгляд исследователя на изучение свойств объекта.

Моделирование рассматривается как основной метод познания реальных объектов, связанный с совершенствованием способов получения и фиксации информации об объектах, а также с приобретением новых знаний на основе моделирования с привлечением тех или иных математических методов.

Классификация видов моделирования может быть проведена по разным признакам, один из вариантов которой приведен на рис. 1.



Рис. 1. Классификация видов моделирования

В соответствии с классификационным **признаком полноты** моделирование делится на полное, неполное и 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 объекта не моделируются совсем. Теория подобия утверждает, что абсолютное подобие возможно лишь при замене одного объекта другим точно таким же.

В зависимости от типа носителя и сигнатуры модели различают 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 его исследования во времени. При этом оперируют аналоговыми, дискретными и смешанными моделями.

В зависимости от формы реализации носителя и сигнатуры моделирование классифицируется на мысленное и реальное. **Мысленное моделирование** применяется когда модели не реализуемы в заданном интервале времени либо отсутствуют условия для их физического создания.

Оно реализуется в виде наглядного, формализованного и формального

Мысленные (знаковые) модели представляют условное описание объекта-оригинала с использованием принятого исследователем модели алфавита символов и различного рода математических операций над символами, в результате чего формируются слова и предложения некоторого языка, которые с помощью определенного кода интерпретируются как образы компонентов объектов – оригиналов и взаимодействий между ними. В зависимости от используемых языков знаковые модели классифицируются на описательные (вербальные), формальные и формализованные (логико-лингвистические).

Формальные модели представляют способ концентрированного выражения знаний, представлений и гипотез об объекте-оригинале в виде математических соотношений; используются для описания хорошо структурированных задач, где свойства изучаемых объектов и соотношения между ними можно выразить в количественной форме. Это основной инструмент, позволяющий оценить эффективность объектов по количественным показателям или процесс установления соответствия данному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью (описывает реальный объект с некоторой степенью приближения).

Для представления математических моделей могут использоваться различные формы представления (описания). Основными являются инвариантная, аналитическая, алгоритмическая и схемная (графическая).

Инвариантная форма – описание соотношений модели традиционными математическими операторами безотносительно к методу решения уравнений модели (модель представляется как совокупность входов, выходов, переменных состояния и глобальных уравнений объекта).

Аналитическая форма – описание модели в виде результата решения исходных уравнений модели. В ней модели представляют собой явные выражения выходных параметров как функций входов и переменных состояния (применяется только функционального аспекта). При этом глобальные уравнения объекта, описывающие закон (алгоритм) его функционирования, записываются в виде некоторых аналитических соотношений или логических условий.

Аналитическая модель основывается на применение нескольких методов:

аналитических, когда стремятся получить в общем виде явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными состояния объекта;

численных, когда, не имея аппарата решения уравнений в общем виде, стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных;

качественных, когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (например, оценить устойчивость решения).

Алгоритмическая форма – запись соотношений модели и выбранного численного метода решения в виде алгоритма. Основу алгоритмических моделей составляют **имитационные модели**, предназначенные для имитации физических или информационных процессов при различных внешних воздействиях (имитацию данных процессов определяют имитационным

При **имитационном моделировании** воспроизводится алгоритм функционирования (поведения) объекта во времени на основе имитации элементарных явлений, составляющих процесс с сохранением их логической структуры и последовательности протекания. Основное преимущество - возможность решения более сложных задач. Т.е. оно позволяет читать дискретные и непрерывные элементы, нелинейные характеристики элементов объекта, многочисленные случайные воздействия и т.д., которые создают трудности при аналитических исследованиях. Одними из основных методов его реализации являются методы статистических испытаний (Монте-Карло) и статистического моделирования. Метод Монте-Карло – численный метод, применяемый 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. При применении данного приема для машинной имитации для исследования характеристик объектов, подверженных случайным воздействиям, такой метод является методом статистического моделирования.

Метод имитационного моделирования применяется для оценки вариантов структуры объекта, эффективности различных алгоритмов управления им, влияния изменения различных параметров объекта. Имитационное моделирование является основой структурного, алгоритмического и параметрического синтеза объектов, когда необходимо их представить в виде систем с заданными характеристиками при определенных ограничениях

Комбинированное или смешанное аналитико-имитационное моделирование объединяет достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей производится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы. При этом, где это возможно, используют аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели.

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, рассматривая реальный объект как «черный ящик», имеющий ряд входов и выходов, и моделируют некоторые связи между выходами и входами. Т.е. в его основе лежит отражение некоторых информационных процессов управления для оценки поведения объекта. Для построения модели выделяют исследуемую функцию объекта, ее формализуют в виде некоторых операторов связи между входом и выходом и воспроизводят ее на имитационной модели, используя совершенно другой математический язык и, естественно, иную физическую реализацию процесса (к ним можно отнести экспертные системы, являющиеся моделями лиц, принимающих решения).

Структурное моделирование базируется на особенностях структур, которые используются как средство исследования объектов или служат для разработки на их основе подходов к моделированию с применением других методов формализованного представления объектов (теоретико-множественных, лингвистических, кибернетических и т.п.). **Оно включает:**

- методы сетевого моделирования;
- сочетание методов структуризации с логико-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 к функциям, так и к элементам объекта. 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 сформировалась технология CASE – совокупность методологий анализа, проектирования, разработки и сопровождения сложных автоматизированных систем, поддерживаемую средствами автоматизации.

Ситуационное моделирование опирается на модельную теорию мышления, в рамках которой можно описать основные механизмы регулирования процессов принятия решений. В центре мышления лежит представление о формировании в структурах мозга информационной модели объекта и внешнего мира. Эта информация воспринимается исследователем на базе уже имеющихся у него знаний и опыта. Целесообразное поведение исследователя строится путем формирования целевой ситуации и мысленного преобразования исходной ситуации в целевую. Основой построения модели является описание реального объекта в виде совокупности элементов, связанных между собой определенными отношениями, отображающими семантику предметной области. Модель объекта имеет многоуровневую структуру и представляет тот информационный контекст, на фоне которого протекают исследуемые процессы.

При **наглядном моделировании** на базе представлений исследователя о объектах создаются наглядные модели, отображающие явления и процессы, протекающие в объекте. Описательные (вербальные) модели разрабатываются на основе естественных языковых средств для обобщенного и достаточно полного выражения знаний исследователя об исследуемом объекте.

Символьное моделирование - искусственный процесс создания логического объекта, который замещает реальный и выражает его основные свойства с помощью определенной системы знаков и символов. В основе моделирования лежит некоторый тезаурус, который образуется из набора понятий исследуемой предметной области, причем этот набор фиксирован. Под *тезаурусом* понимается словарь, отражающий связи между словами или иными

В основу **гипотетического моделирования** закладывается гипотеза о закономерностях протекания процесса в объекте, которая отражает уровень знаний исследователя об объекте и базируется на причинно-следственных связях между входом и выходом изучаемого объекта; 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 объекта используются аналогии последующих уровней, когда аналоговая модель отображает несколько (или только одну) сторон функционирования объекта. **Макетирование** применяется, когда протекающие в объекте процессы не поддаются физическому моделированию или могут предшествовать проведению других видов моделирования. В основе построения мысленных макетов лежат аналогии, обычно базирующиеся на причинно-следственных связях между явлениями и процессами в объекте. При **реальном моделировании** используется возможность исследования характеристик объекта целиком или его части; моделирование является наиболее адекватным, но его возможности ограничены.

Натурное моделирование определяют процесс проведения исследования на объекте с последующей обработкой результатов эксперимента на основе теории подобия. Подразделяется на научный эксперимент, комплексные испытания и производственный эксперимент. **Эксперимент** характеризуется широким использованием средств автоматизации, разнообразных средств обработки информации, возможностью вмешательства исследователя в эксперимент.

3. ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В математическом моделировании велика роль опыта, знаний и интуиции интеллектуальных качеств исследователя. Поэтому исходя из умений опытных исследователей сформулированы некоторые принципы и подходы к построению моделей. Принципы определяют общие требования, которым должна удовлетворять правильно построенная модель.

1. **Адекватность** – принцип предусматривает соответствие модели целям исследования по уровню сложности и организации, а также соответствие реальной системе относительно выбранного множества свойств.

2. **Соответствие модели решаемой задаче** – модель строится для решения определенной задачи исследований.

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, не учитывающее типичные и менее существенные свойства.

4. **Баланс погрешностей различных видов** – 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.

5. **Соответствие между требуемой точностью результатов моделирования и сложностью модели** – модели всегда носят

приближенный характер. С одной стороны, для отражения свойств модель необходимо детализировать, а с другой стороны, строить модель, приближающуюся по сложности к реальной системе – не имеет смысла, так чтобы нахождение решения оказалось слишком затруднительным.

Компромисс между требованиями достигается нередко путем проб / ошибок и достигается на основе практических рекомендаций по уменьшению сложности моделей:

- изменение числа переменных, достигаемое либо исключением несущественных переменных, либо их объединением;
- изменение природы переменных – переменные параметры рассматриваются в качестве постоянных, дискретные – в качестве непрерывных и т.д.;
- изменение функциональной зависимости между переменными (нелинейная зависимость заменяется линейной, дискретная функция распределения вероятностей – непрерывной);
- изменение ограничений (добавление, исключение или модификация) – при снятии ограничений получается оптимистичное решение, при введении, наоборот, пессимистичное. Варьируя ограничениями, находят возможные граничные значения эффективности;
- ограничение точности модели – точность результатов модели не может быть выше точности исходных данных.

6. **Многовариантность реализаций элементов модели** – разнообразие реализаций одного и того же элемента, отличающихся по точности, обеспечивает регулирование соотношения «точность/сложность».

7. **Блочное строение** – облегчает разработку 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.

В зависимости от ситуации возможны **подходы к построению моделей**:

непосредственный анализ функционирования системы;

проведение ограниченного эксперимента на самой системе;

использование аналога;

анализ исходных данных.

Построение модели начинается с анализа исходных данных, позволяющему сформулировать гипотезу о структуре системы, которая затем апробируется.

Исследователи при разработке моделей находятся под действием двух взаимно противоречивых тенденций: стремления к полноте описания и стремления к получению требуемых результатов возможно более простыми средствами.

Достижение компромисса осуществляется построением серии моделей, начинающихся с предельно простых и восходящих до высокой сложности.

Усложненные модели используются для анализа влияния различных факторов на результаты моделирования, что позволяет исключить некоторые факторы из рассмотрения. Сложные системы предполагают разработку целой иерархии моделей, различающихся уровнем (вся система, подсистема, элемент) отображаемых операций.

4. ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Сущность построения математической модели состоит в упрощении, схематизации и описании реального объекта с помощью математического аппарата. Выделяют следующие основные этапы построения моделей.

1. **Содержательное описание моделируемого объекта.** Объект моделирования описывается с позиции системного подхода. Исходя из целей исследования устанавливается совокупность элементов, взаимосвязи между элементами, возможные состояния каждого элемента, существенные характеристики состояний и отношения между ними. При этом вопросы, связанные с полнотой и единственностью набора характеристик, не рассматриваются. Содержательное описание предполагает детальное изучение объекта, так как оно служит основой для последующей формализации его исследуемых свойств. В таком словесно-содержательном описании возможны логические противоречия и неопределенности – это исходная концепция описания исследуемого объекта. Такое предварительное, приближенное представление объекта является его *концептуальной моделью*. На этом этапе моделирования применяются качественные методы описания систем, знаковые и языковые модели.

2. **Формализация операций.** На основе содержательного описания определяется исходное множество характеристик системы. Выделение существенных характеристик предполагает хотя бы приближенный анализ каждой из них. Проведение анализа основывается на постановке задачи и понимании существа (назначения, состава, общих характеристик и порядка функционирования) исследуемой системы. После исключения несущественных характеристик выделяют управляемые и неуправляемые параметры и производят символизацию. Затем определяются ограничения на управляемые параметры; если ограничения не носят принципиальный характер – ими пренебрегают. Дальнейшие действия исследователя связаны с формированием целевой функции модели на основе выбора показателей исхода операции и определения примерного вида функции полезности. Если функция полезности близка к пороговой (или монотонной), то оценка эффективности решений возможна по показателям исхода операции. В этом случае необходимо выбрать способ свертки показателей (способ перехода от множества показателей к одному обобщенному показателю) и произвести свертку. На основе свертки показателей осуществляется формирование критерия эффективности и целевой функции.

Если при качественном анализе вида функции полезности окажется, что она не является пороговой (монотонной), прямая оценка эффективности решений через показатели исхода операции неправомерна. Необходимо определить функцию полезности и уже на ее основе осуществлять формирование критерия эффективности и целевой функции.

В целом замена содержательного описания формальным представляет

3. **Проверка адекватности модели.** Требование адекватности находится в противоречии с требованием простоты – это необходимо исследователям учитывать при проверке модели на адекватность. Исходный вариант модели подлежит предварительной проверке по основным вопросам: все ли существенные параметры включены в модель; нет ли в модели несущественных параметров; правильно ли отражены функциональные связи между параметрами; правильно ли определены ограничения на значения параметров. После этого осуществляется процесс компьютерной реализации модели и проведение решения задач. Полученные результаты моделирования подвергаются анализу на соответствие известным свойствам исследуемого объекта. Для установления соответствия создаваемой модели оригиналу осуществляется: сравнение результатов моделирования с отдельными экспериментальными результатами, полученными при одинаковых условиях; использование других близких моделей; сопоставление структуры и функционирования модели с прототипом. Главной проверкой адекватности модели объекту является практическая проверка сходимости полученных результатов с прототипом. По результатам проверки на адекватность принимается решение об использовании или корректировке модели.

4. **Корректировка модели** - уточняются существенные параметры, ограничения на значения управляемых параметров, показатели исхода операции, связи показателей операции с существенными параметрами, критерий эффективности. После внесения изменений выполняется оценка адекватности.

5. **Оптимизация модели** - в ее упрощении при заданном уровне

ВОПРОСЫ НА СЕМИНАР

- 1.** Общее представление о моделировании сложных объектов
- 2.** Классификация видов моделирования систем
- 3.** Характеристика формальных методов в криминалистике
- 4.** Применение стохастического моделирования объектов в криминалистике
- 5.** Применение имитационного моделирования объектов в криминалистике
- 6.** Принципы и подходы к построению математических моделей
- 7.** Этапы построения математической модели