

**В. Д. Боев**

# **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
ДЛЯ ПРИКЛАДНОГО БАКАЛАВРИАТА**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом  
высшего образования в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся  
по инженерно-техническим направлениям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2017**

УДК 004.942(075.8)  
ББК 32.973:30.606я73  
Б75

**Автор:**

**Боев Василий Дмитриевич** — профессор, доктор военных наук, профессор Военной академии связи, профессор кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств факультета радиотехнологий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича.

**Рецензенты:**

*Саенко И. Б.* — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем Военной академии связи;

*Беляева С. Д.* — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры математических, естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин Михайловской военной артиллерийской академии.

**Боев, В. Д.**

Б75

Имитационное моделирование систем : учеб. пособие для прикладного бакалавриата / В. Д. Боев. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 253 с. — (Серия : Бакалавр. Прикладной курс).

ISBN 978-5-534-04734-9

В пособии излагается расширенное содержание лекционной части учебной дисциплины, посвященной моделированию и проектированию систем и входящей в учебные планы многих вузов. Рассматриваются общие определения моделей и моделирования, раскрываются сущность и основные аспекты имитационного моделирования, приемы моделирования случайных величин, событий и процессов, планирования, проведения компьютерных экспериментов, а также наиболее употребительные методы обработки их результатов, имитационное распределенное и мультиагентное моделирование.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

*Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям.*

УДК 004.942(075.8)  
ББК 32.973:30.606я73



*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».*

ISBN 978-5-534-04734-9

© Боев В. Д., 2017

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

# Оглавление

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1. Понятие модели и моделирования</b> .....	11
1.1. Система как объект моделирования.....	11
1.2. Общее определение модели.....	16
1.3. Классификация моделей и моделирования.....	20
1.3.1. Классификация моделей и моделирования по признаку «характер моделируемой стороны объекта».....	21
1.3.2. Классификация моделей и моделирования по признаку «характер процессов, протекающих в объекте».....	21
1.3.3. Классификация моделей и моделирования по признаку «способ реализации модели».....	22
1.4. Этапы моделирования.....	26
1.5. Адекватность модели.....	29
1.6. Требования, предъявляемые к моделям.....	31
1.7. Компьютерное моделирование.....	32
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	35
<b>Глава 2. Концепция дискретных систем для имитационного моделирования</b> .....	36
2.1. Основные понятия систем массового обслуживания.....	37
2.2. Классификация моделей систем массового обслуживания.....	48
2.3. Параметры и показатели систем массового обслуживания.....	52
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	58
<b>Глава 3. Имитационное статистическое моделирование</b> .....	60
3.1. Сущность имитационного моделирования.....	61
3.2. Общая характеристика метода имитационного моделирования.....	66
3.3. Статистическое моделирование при решении детерминированных задач.....	70
3.4. Моделирование равномерно распределенной случайной величины.....	73
3.5. Моделирование случайной величины с произвольным законом распределения.....	79
3.6. Моделирование единичного события.....	85
3.7. Моделирование полной группы несовместных событий.....	86
3.8. Моделирование совместных независимых событий.....	91
3.9. Моделирование совместных зависимых событий.....	93
3.10. Классификация случайных процессов.....	96
3.11. Способы продвижения модельного времени.....	99

3.12. Модель противоборства двух сторон .....	107
3.13. Модель противоборства как процесс блуждания по решетке.....	113
3.14. Типовая схема имитационной модели с продвижением времени по событиям.....	116
3.15. Имитационная модель системы массового обслуживания .....	120
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	128
<b>Глава 4. Планирование экспериментов .....</b>	<b>131</b>
4.1. Сущность и цели планирования эксперимента.....	131
4.2. Элементы стратегического планирования экспериментов .....	133
4.3. Стандартные планы.....	136
4.4. Формальный подход к сокращению общего числа прогонов .....	140
4.5. Элементы тактического планирования.....	141
4.6. Точность и количество реализаций модели при определении средних значений параметров .....	142
4.6.1. Определение оценки математического ожидания .....	142
4.6.2. Определение оценки дисперсии.....	146
4.7. Точность и количество реализаций модели при определении вероятностей исходов.....	147
4.8. Точность и количество реализаций модели при зависимом ряде данных.....	154
4.9. Проблема начальных условий .....	157
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	158
<b>Глава 5. Обработка результатов имитационного эксперимента...160</b>	
5.1. Характеристики случайных величин и процессов .....	160
5.2. Требования к оценкам характеристик .....	162
5.3. Оценка характеристик случайных величин и процессов .....	163
5.4. Гистограмма.....	166
5.5. Элементы дисперсионного анализа. Критерий Фишера .....	168
5.6. Критерий Вилкоксона .....	172
5.7. Однофакторный дисперсионный анализ.....	175
5.8. Выявление несущественных факторов.....	179
5.9. Сущность корреляционного анализа .....	182
5.10. Обработка результатов эксперимента на основе регрессии.....	187
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	202
<b>Глава 6. Современные теории имитационного моделирования... 203</b>	
6.1. Распределенное имитационное моделирование.....	204
6.1.1. Понятие о распределенной информационной системе .....	204
6.1.2. Необходимость перехода к параллельному и распределенному имитационному моделированию .....	206
6.1.3. Подходы к сокращению времени имитационного эксперимента.....	210
6.1.4. Вариант построения распределенной имитационной модели...211	
6.2. Агентное моделирование.....	214
6.2.1. Агенты .....	214

6.2.2. Мультиагентные системы.....	218
6.2.3. Архитектура мультиагентной системы.....	223
6.2.4. Подходы к построению мультиагентной модели.....	225
<i>Вопросы и задания для самоконтроля .....</i>	<i>227</i>
<b>Заключение.....</b>	<b>229</b>
<b>Литература.....</b>	<b>233</b>
<b>Глоссарий .....</b>	<b>237</b>
<b>Перечень контрольных вопросов для тестирования .....</b>	<b>242</b>
<b>Приложение 1. Таблица значений функции Лапласа .....</b>	<b>250</b>
<b>Приложение 2. Критические точки распределения Фишера.....</b>	<b>252</b>
<b>Ответы на вопросы теста .....</b>	<b>253</b>



## Введение

Данное учебное пособие рекомендуется использовать при изучении теоретической части курсов, связанных с моделированием и проектированием систем с дискретно-событийными процессами и агентным моделированием.

Имитационное моделирование (ИМ) — один из самых мощных инструментов анализа и синтеза, которыми располагают специалисты, занимающиеся исследованием и проектированием сложных процессов и систем. Идея имитационного моделирования проста и в то же время интуитивно привлекательна. Каждый современный исследователь должен уметь пользоваться этим методом моделирования.

Имитационное моделирование как необходимая часть инженерного образования сложилось в середине XX в. Воспринятое поначалу как своеобразный численный метод решения сложных задач, как «младший брат» аналитического моделирования, оно постепенно стало основным, подчас единственным методом при анализе и синтезе сложных систем и процессов.

Общеизвестно, что правильно поставленный натурный эксперимент, т.е. исследование свойств объекта на самом объекте, максимально информативен. Оказывается, что эксперимент с компьютерной имитационной моделью вполне конкурентоспособен с натурным экспериментом. Не говоря о том, что натурный эксперимент в ряде случаев вообще невозможен или нецелесообразен, эксперимент с имитационной моделью может быть приемлемо информативным и выполнен значительно быстрее и дешевле натурального. Это и предопределило стремительное и повсеместное внедрение моделирования.

В популяризации ИМ заметную роль сыграли работы Р. Шеннона и Т. Д. Шрайбера. В свое время эти работы были широко известны в среде научных работников и инженеров. Большую положительную роль в распространении ИМ у нас в стране сыграли работы по моделированию сложных систем на ЭВМ члена-корреспондента АН СССР Н. П. Бусленко (1922—1977) и выдающегося математика, академика АН СССР и РАН А. А. Самарского (1919—2008). Их работы в области математического моделирования и вычислительного эксперимента широко используются на практике.

Постепенно популярность методов и идей ИМ возрастала во всем мире, что вызывало потребность в общении пользователей, обмене знаниями и опытом, теоретическом осмыслении этого нового метода

познания. В результате во многих странах мира были созданы национальные и даже наднациональные (международные) общества имитационного моделирования. Таких обществ сейчас в мире много.

Несмотря на то что ИМ известно и применяется в нашей стране давно, профессиональных сообществ в этой области, как в других странах, до сих пор не создавалось. В феврале 2011 г. было зарегистрировано Некоммерческое партнерство «Национальное общество имитационного моделирования» (НП НОИМ, Санкт-Петербург). Можно ожидать, что в ближайшее время ИМ России будет развиваться еще более интенсивно, и мы действительно войдем в международный мир ИМ полноправными участниками. Именно такие цели и задачи ставит перед собой НП НОИМ.

НП НОИМ необходимо много сделать в деле популяризации и продвижения идей ИМ в различных областях науки, технологий и промышленности, государственных и отраслевых органах управления. В Интернете создан сайт НОИМ ([www.simulation.su](http://www.simulation.su)), на котором размещена различная информация по вопросам и проблемам имитационного моделирования.

Курс ИМ является обязательным для изучения в учебных планах технических высших и средних учебных заведений.

Первая глава носит вводный характер. Разъясняются понятия: система, модель, моделирование, классификация, этапы, адекватность, компьютерное моделирование. Сформулированы и пояснены требования к моделям.

Во второй главе излагается концепция дискретных систем — систем массового обслуживания (СМО), реализованная во многих системах имитационного моделирования, в том числе в *GPSS World* и *AnyLogic*, приемы построения моделей инструментальными средствами которых и проведение исследований изучаются на практических занятиях. Многие задачи, решаемые при совершенствовании и разработке реальных систем, описываются именно моделями СМО.

В третьей главе излагается сущность имитационного статистического моделирования, рассмотрены обоснования и методы имитационного моделирования случайных дискретных событий — единичного, совместных и несовместных, независимых и зависимых, и случайных процессов. Представлены с подробным описанием примеры, демонстрирующие способы построения алгоритмов имитационных статистических моделей.

В четвертой главе излагаются основы планирования компьютерного эксперимента: цели, задачи, стратегическое и тактическое планирование, типовые планы. Подчеркивается необходимость знания этих основ, несмотря на наличие встроенных типовых планов в математические программные пакеты, в том числе ИМ.

Пятая глава посвящена обзору некоторых наиболее употребительных приемов статистической обработки результатов компьютер-

ного эксперимента: дисперсионный анализ, корреляционный анализ, регрессионный анализ. Обзор подкреплён примерами.

В шестой главе дается краткий обзор современных теорий имитационного моделирования, в том числе распределенного имитационного и имитационного мультиагентного моделирования.

Каждая глава завершается вопросами и заданиями для самоконтроля.

В заключении излагаются основные принципы моделирования как систематизированная последовательность этапов, методов и средств по организации процесса моделирования.

В пособии для лучшего усвоения материала фрагменты, представляющие наибольший интерес, выделяются разными шрифтами, что позволяет акцентировать внимание читателя на аспектах, которые, по мнению автора, являются важными для понимания моделей и методов.

При работе над пособием автор опирался на свой опыт моделирования и преподавания, а также на многие издания по теме моделирования. В большей степени были учтены работы, указанные в списке литературы.

После изучения теоретического материала данного пособия для практического освоения методов и способов разработки имитационных моделей средствами систем компьютерного моделирования рекомендуется использовать пособия [6, 7] и ресурсы сети Интернет [41, 42].

Студенческие версии *AnyLogic Personal Learning Edition* и *GPSS World*, с использованием инструментальных средств которых изложены методы и приемы построения моделей в рекомендованных пособиях, доступны бесплатно на сайтах [www.anylogic.ru](http://www.anylogic.ru) и [www.minutemansoftware.com](http://www.minutemansoftware.com).

В результате изучения материалов данного учебного пособия студенты должны:

**знать**

- основные понятия, относящиеся к имитационному моделированию;
- классификацию моделей;
- этапы моделирования;
- требования, предъявляемые к моделям;
- классификацию систем массового обслуживания;
- моделирование случайных величин и событий;
- элементы планирования эксперимента;
- применение дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа для обработки результатов имитационного эксперимента;
- понятия распределенного и агентного моделирования;

**уметь**

- строить модели систем массового обслуживания;
- определять параметры систем массового обслуживания;
- получать наборы случайных величин, распределенных по заданному закону распределения;

- строить схемы имитационных моделей;
- определять точность модели;
- оценивать характеристики случайных величин и процессов;

**владеть**

- методами теории массового обслуживания;
- методами оценки адекватности модели;
- методом имитационного моделирования;
- методом статистических испытаний;
- методом планирования эксперимента;
- методами дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа;
- навыками обработки результатов эксперимента.

# Глава 1

## ПОНЯТИЕ МОДЕЛИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Первая глава имеет вводный, в основном терминологический характер, поскольку общепринятых формулировок на настоящее время нет и различные авторы излагают одни и те же понятия и определения с некоторыми отличиями. Подробно раскрываются понятия системы (как объекта моделирования), модели и моделирования (как основного, а подчас и единственного метода анализа и синтеза сложных систем и процессов). Дается вариант классификации моделей и моделирования, в некоторой мере упрощенный, но достаточный для полного уяснения сущности моделирования вообще и математического в частности. Сам по себе процесс моделирования в полной мере не формализован, большая роль в этом принадлежит опыту разработчика. Но тем не менее рассматриваемый в главе процесс создания модели может стать основой для начинающих разработчиков и по мере накопления опыта может быть индивидуализирован.

Математическая модель, являясь абстрактным образом моделируемого объекта или процесса, не может быть его полным аналогом. Достаточно сходства в тех элементах, которые определяют цель исследования. Для качественной оценки сходства вводится понятие адекватности модели объекту и в связи с этим раскрываются понятия изоморфизма и изофункционализма. Формальных приемов, позволяющих автоматически, «бездумно», создавать адекватные математические модели, нет, хотя некоторыми авторами предпринимались попытки по их разработке. Окончательное суждение об адекватности модели дает практика, т.е. сопоставление модели с действующим объектом. Тем не менее усвоение всех глав пособия позволит исследователю справиться с проблемой обеспечения адекватности моделей.

Завершается глава изложением требований к моделям, которые были сформулированы Р. Шенноном на заре компьютерного моделирования более 40 лет назад в книге «Имитационное моделирование систем — искусство и наука». Актуальность этих требований сохраняется и в настоящее время.

### 1.1. Система как объект моделирования

Данное пособие посвящено имитационному моделированию систем и протекающих в них процессов. Поэтому вполне логично для раз-

говора «на одном языке» начать с рассмотрения основных понятий и определений, описывающих систему как объект моделирования.

**Объект** — часть реального мира (любой предмет, процесс, явление материального или нематериального свойства), которая выделяется и исследуется в связи с решаемой задачей.

**Декомпозиция объекта** — процесс деления объекта на части.

**Система** — любой объект, который одновременно рассматривается и как единое целое, и как объединенная в интересах достижения поставленной цели совокупность взаимосвязанных разнородных элементов.

**Элемент** — минимальная неделимая функциональная часть исследуемой системы, рассматриваемая как единое целое.

**Подсистема** — часть системы, выделенная по определенному признаку и удовлетворяющая следующим требованиям:

- каждая подсистема является функционально независимой частью объекта, допускающей разложение на элементы в рамках данного исследования. Она связана с другими подсистемами, обменивается с ними информацией и энергией, но внутренняя логика ее функционирования может быть определена независимо;

- для каждой подсистемы могут быть определены функции или свойства, специфические для нее, не совпадающие со свойствами или функцией всей системы (или других подсистем).

Система с управлением включает три подсистемы: управляющую, объект управления и связи. Системы с управлением, или целенаправленные, называются *кибернетическими*. К ним относятся технические, биологические, организационные, экономические системы. Системы принято разделять на физические и абстрактные, динамические и статические, простые и сложные (большие), естественные и искусственные, с управлением и без управления, непрерывные и дискретные, детерминированные и стохастические, открытые и замкнутые.

Деление систем на физические и абстрактные позволяет различать реальные системы и системы, являющиеся определенными отображениями (моделями) реальных объектов. Для реальной системы может быть построено множество систем — моделей, различаемых по цели моделирования, требуемой степени детализации и другим признакам.

**Сложная (большая) система** характеризуется большим числом входящих в ее состав элементов и разных типов связей между ними. Четкой границы, разделяющей простые, большие и сложные системы, нет.

**Комплекс** — совокупность взаимосвязанных систем. Понятия «система» и «комплекс» часто считают эквивалентными.

**Надсистема** — система более высокого уровня, в состав которой входит данный объект. Он играет в надсистеме некоторую роль, выполняет некую функцию. Ради ее выполнения объект и создавался. Функция любой системы и ее эффективность могут быть определены только через надсистему.

**Среда** (внешняя среда) — множество объектов внешнего мира, существенно влияющих на эффективность функционирования системы, но не входящих в состав системы и надсистемы.

Для описания системы нужно определить ее *структуру* и *функцию*.

**Структура** (от лат. *structure* — строение, расположение, порядок) — совокупность элементов системы и связей между ними. Различают материальную структуру и формальную структуру.

Способы описания структуры системы:

- **графический** — в форме:
  - *графа* (ориентированного, оргграфа), в котором вершины соответствуют элементам системы, а дуги — связям между ними,
  - *схем*, в которых элементы обозначаются специальными символами;
- **аналитический** — путем задания количества элементов и матрицы связей (инцидентности) разнородных элементов графа: вершин с дугами. Могут использоваться также списки вершин и дуг и матрицы смежности — связанности элементов графа одного рода: вершин с вершинами, дуг с дугами.

**Функция** системы — поведение системы, позволяющее получить результаты согласно ее назначению.

Способы описания функции системы:

- **алгоритмический** — описание (словесно-формульное, схемой) в виде последовательностей шагов, которые должна выполнять система для достижения цели согласно назначению;
- **аналитический** — в виде математических зависимостей в терминах некоторого математического аппарата теорий: массового обслуживания, вероятностей, графов, множеств, случайных процессов, дифференциального или интегрального исчисления и т.п.;
- **графический** — в виде временных графиков или графических зависимостей;
- **табличный** — в виде различных таблиц, отражающих основные функциональные зависимости, например в виде таблиц маршрутизации, таблиц функций переходов и выходов и т.п.

**Организация** системы — способ достижения цели согласно назначению за счет выбора определенной структуры и функции системы. Различают структурную и функциональную организацию.

**Функциональная** организация определяется способом порождения функций системы, достаточных для достижения поставленной цели.

**Структурная** организация определяется набором элементов и способом их соединения в структуру, обеспечивающую возможность реализации возлагаемых на систему функций.

**Свойство** — характеристика (показатель) стороны объекта, отличающая его от других объектов или устанавливающая сходство с ними и проявляющаяся только при взаимодействии с другими объектами или элементами одного объекта между собой.

Сложные системы при исследовании их свойств и общих закономерностей функционирования методами математического моделирования требуют системного подхода. Системный подход дает возможность выделить перечень и определить целесообразную последовательность выполнения взаимосвязанных задач, позволяющих не упустить из рассмотрения важные стороны и связи исследуемого объекта.

Применение системного подхода при исследовании сложных систем обусловлено следующими их свойствами:

- **целостность** (общее свойство, которое стремятся явно или неявно выразить во всех толкованиях понятия системы) — система рассматривается как единое целое, состоящее из *взаимодействующих* элементов, возможно неоднородных, но *совместимых*;

- **связность** — наличие существенных устойчивых связей между элементами и (или) их свойствами, причем с позиций системного подхода значение имеют не любые, а лишь *существенные* связи, которые определяют *интегративные* свойства системы;

- **организованность** — наличие определенной структурной и функциональной организации, обеспечивающей снижение энтропии (степени неопределенности) системы по сравнению с энтропией системообразующих факторов, определяющих возможность создания системы, к которым относятся число элементов системы, число существенных связей, которыми может обладать каждый элемент, и т.п.;

- **интегративность** — наличие качеств, присущих системе в целом, но отличных от свойств отдельных элементов; иными словами, интегративность означает, что свойства системы хотя и зависят от свойств элементов, но не определяются ими полностью, отдельное рассмотрение каждого элемента не дает полного представления о системе в целом; интегративность проявляется также в функциональной ориентированности взаимодействий элементов системы на сохранение и развитие целостности путем снятия актуальных противоречий системы.

Из описания свойств системы можно сделать следующие *выводы*:

- система не является простой совокупностью элементов;
- декомпозируя систему на отдельные части и исследуя каждую из них в отдельности, в том числе и методами оптимизации, нельзя познать все свойства системы в целом.

**Эффективность** — степень соответствия системы своему назначению. Эффективность проявляется только при функционировании и зависит от свойств самой системы, способа ее применения и воздействий внешней среды.

Эффективность систем обычно оценивается **набором показателей эффективности**.

**Показатель эффективности (качества)** — мера одного свойства системы. Он всегда имеет *количественный* смысл.

Количество показателей эффективности систем может быть достаточно большим. При этом они, как правило, являются противоречивыми: изменение структурной или функциональной организации

системы приводит к улучшению одних показателей эффективности и ухудшению других. Поэтому целесообразно иметь один показатель эффективности — критерий эффективности.

**Критерий эффективности** — обобщенный показатель и правило выбора лучшей системы (лучшего решения).

Критерий эффективности служит для выбора из всех возможных вариантов структурно-функциональной организации системы наилучшего (оптимального) варианта. Иногда вместо термина «оптимальный вариант» используют термин «рациональный вариант».

**Оптимальная система** — система, которой соответствует максимальное (минимальное) значение критерия эффективности из всех возможных вариантов построения системы, удовлетворяющих заданным требованиям.

**Анализ** (от греч. *análysis* — разложение, расчленение) — процесс нахождения различных свойств системы или внешней среды.

**Синтез** (от греч. *synthesis* — соединение, сочетание, составление) — процесс, противоположный анализу: построение системы, т.е. разработка функций и структур, удовлетворяющих предъявляемым требованиям к ее эффективности и назначению.

Итак, с понятием «эффективность» связаны следующие понятия:

- показатель эффективности;
- критерий эффективности;
- оптимальная (рациональная) система;
- анализ;
- синтез.

Любая система описывается множеством величин, которые могут быть разбиты на две группы:

1) **параметры**, описывающие *первичные* свойства системы и являющиеся исходными данными при решении задач анализа и синтеза;

2) **показатели**, описывающие *вторичные* свойства системы и определяемые в процессе решения задач анализа и синтеза как функции параметров, т.е. эти величины являются вторичными по отношению к параметрам.

Множество параметров системы можно разделить на внутренние и внешние.

К **внутренним параметрам**, описывающим структурно-функциональную организацию системы, относятся:

- *структурные* параметры, описывающие состав и связи между подсистемами и элементами системы;
- *функциональные* параметры, описывающие функциональную организацию (режим функционирования) системы.

К **внешним параметрам**, описывающим взаимодействие системы с внешней средой, относятся:

- *нагрузочные* параметры, описывающие входное воздействие на систему, например частоту и объем поступающих в систему заявок на обслуживание;

- параметры *внешней среды*, описывающие обычно неуправляемые воздействия внешней среды на систему, например помехи, физические удары и т.п.

Параметры могут быть *детерминированными* или *случайными*; *управляемыми* или *неуправляемыми*.

Таким образом, параметры системы — это входные величины, а показатели — выходные величины, зависящие от параметров и определяемые в процессе анализа и синтеза системы.

В общем случае моделирование направлено на решение следующих задач:

- *декомпозиции* — представлении системы в виде подсистем, состоящих из элементов (часто задачу декомпозиции рассматривают как составную часть анализа);

- *анализа* — оценки эффективности систем, задаваемой в виде совокупности *показателей эффективности*;

- *синтеза* — построения оптимальных систем в соответствии с выбранным критерием эффективности.

## 1.2. Общее определение модели

Практика свидетельствует о том, что самое лучшее средство для определения свойств объекта — *натурный эксперимент*, т.е. исследование свойств и поведения самого объекта в нужных условиях. Дело в том, что при проектировании невозможно учесть многие факторы, расчет ведется по усредненным справочным данным, используются новые, недостаточно проверенные элементы (прогресс нетерпелив!), меняются условия внешней среды и многое другое. Поэтому натурный эксперимент — необходимое звено исследования. Неточность расчетов компенсируется увеличением объема натурных экспериментов, созданием ряда опытных образцов и доводкой изделия до нужного состояния. Так поступали и поступают при создании, например, любого нового образца, в том числе техники и вооружения.

Однако во многих случаях натурный эксперимент невозможен.

Моделирование предоставляет возможность исследования таких объектов, прямой эксперимент с которыми:

- опасен;
- экономически невыгоден;
- долговременен;
- кратковременен;
- протяжен в пространстве;
- невозможен;
- неповторим;
- ненагляден.

Остановимся на некоторых причинах необходимости применения моделирования.

Например, наиболее полную оценку новому виду вооружения и способам его применения по назначению может дать война. Но не будет ли это слишком поздно?

Натурное исследование с новой конструкцией самолета, с элементами космических станций может вызвать гибель людей.

*Долговременность*: натурный долговременный эксперимент может быть и экономически невыгодным, и исследуемая в ходе его система может потерять актуальность.

*Невозможность*: часто человек имеет дело с ситуацией, когда объекта нет, он еще только проектируется. При проектировании важно не только представить себе будущий объект, но и испытать его виртуальный аналог до того, как дефекты проектирования проявятся в оригинале.

---

**Важно!**

Моделирование теснейшим образом связано с проектированием. Обычно сначала проектируют систему, потом ее испытывают, потом снова корректируют проект и снова испытывают, и так до тех пор, пока проект не станет удовлетворять предъявляемым к нему требованиям. Процесс «проектирование — моделирование» цикличен. При этом цикл имеет вид спирали — с каждым повтором проект становится все лучше, так как модель становится все более детальной, а уровень описания — точнее.

---

*Неповторимость*: это достаточно редкий случай, когда эксперимент повторить нельзя; в такой ситуации модель — единственный способ изучения таких явлений. Пример — исторические процессы, ведь повернуть историю вспять невозможно.

*Ненаглядность*: модель позволяет заглянуть в детали процесса, его стадии. При построении модели исследователь вынужден описать причинно-следственные связи, позволяющие понять все в единстве, системе. Построение модели дисциплинирует мышление.

---

**Важно!**

Модель играет системо- и смыслообразующую роли в научном познании, позволяет *понять* явление, структуру изучаемого объекта. Не построив модель, вряд ли удастся понять логику действия системы. Это означает, что модель позволяет разложить систему на элементы, связи, механизмы, требует объяснить действие системы, определить причины явлений, характер взаимодействия составляющих.

---

Время подготовки натурного эксперимента и проведения мероприятий по обеспечению безопасности часто значительно превосходит время самого эксперимента. Многие испытания, близкие к граничным условиям, могут протекать настолько бурно, что возможны аварии и разрушения части или всего объекта.

Из сказанного следует, что натурный эксперимент необходим, но в то же время может быть невозможен либо нецелесообразен.

Выход из этого противоречия есть, и называется он «моделирование».

**Моделирование** — это замещение одного *исходного объекта-оригинала* другим объектом с целью получения информации о свойствах объекта-оригинала. Отсюда следует, что моделирование — это, во-первых, процесс создания или отыскания в природе объекта, который в интересующем исследователя смысле может заменить исследуемый объект. Этот промежуточный объект называется *моделью* (рис. 1.1).



Рис. 1.1. К понятию «моделирование»

Модель может быть материальным объектом той же или иной природы по отношению к изучаемому объекту (оригиналу). Модель может быть мысленным объектом, воспроизводящим оригинал логическими построениями или математическими формулами и компьютерными программами.

Во-вторых, моделирование — это испытание, исследование модели, т.е. моделирование связано с экспериментом, отличающимся от натурального тем, что в процесс познания включается промежуточное звено — модель. Следовательно, модель является одновременно *средством эксперимента* и *объектом эксперимента*, заменяющим изучаемый объект.

В-третьих, моделирование — это перенос полученных на модели сведений на оригинал, или, иначе, приписывание свойств модели оригиналу. Чтобы такой перенос был оправдан, между моделью и оригиналом должно быть сходство, *подобие*.

Подобие может быть физическим, геометрическим, структурным, функциональным и т.д. *Степень подобия* может быть разной — от тож-

дства во всех аспектах до сходства только в главном. Очевидно, что модели не должны воспроизводить полностью все стороны изучаемых объектов. Достижение абсолютной одинаковости сводит моделирование к натурному эксперименту, о возможности или целесообразности которого было уже сказано.

**Моделирование** — сложный многоэтапный процесс исследования систем, направленный на выявление *свойств* и *закономерностей*, присущих исследуемым системам, с целью *создания* или *модернизации* этих систем.

Остановимся на основных **целях моделирования**.

**Прогноз** — оценка поведения системы при некотором сочетании ее управляемых и неуправляемых параметров. Прогноз — главная цель моделирования.

**Объяснение и лучшее понимание объектов.** Здесь чаще других встречаются задачи оптимизации и анализа чувствительности. *Оптимизация* — это точное определение такого сочетания факторов и их величин, при котором обеспечиваются наилучший показатель качества системы, наилучшее по какому-либо критерию достижение цели моделируемой системой. *Анализ чувствительности* — выявление из большого числа факторов тех, которые в наибольшей степени влияют на функционирование моделируемой системы. Исходными данными при этом являются результаты экспериментов с моделью.

Часто модель создается для применения в качестве **средства обучения**: модели-тренажеры, стенды, учения, деловые игры, компьютерные игры и т.п.

Моделирование как метод познания применялось человечеством — осознанно или интуитивно — всегда. На стенах древних храмов предков южно-американских индейцев обнаружены графические модели мироздания. Учение о моделировании возникло в Средние века. Выдающаяся роль в этом принадлежит Леонардо да Винчи (1452—1519).

Гениальный полководец А. В. Суворов (1730—1800) перед атакой крепости Измаил тренировал солдат на модели измаильской крепостной стены, построенной специально в тылу.

Наш знаменитый механик-самоучка И. П. Кулибин (1735—1818) создал модель одноарочного деревянного моста через реку Неву, а также ряд металлических моделей мостов. Они были полностью технически обоснованы и получили высокую оценку российских академиков Л. Эйлера (1707—1783) и Д. Бернулли (1700—1782). К сожалению, ни один из этих мостов не был построен.

Огромный вклад в укрепление обороноспособности нашей страны внесли работы по моделированию взрыва — выпускник Михайловского артиллерийского училища 1869 г. генерал-инженер Н. Л. Кирпичев (1850—1927), моделированию в авиастроении — М. В. Келдыш (1911—1978), С. В. Ильюшин (1894—1977), А. Н. Туполев (1888—1972) и др., моделированию ядерного взрыва — И. В. Курчатов (1903—1960), А. Д. Сахаров (1921—1989), Ю. Б. Харитон (1904—1996) и др.

Широко известны работы Н. Н. Моисеева (1917—2000) по моделированию систем управления. В частности, для проверки одного нового метода математического моделирования была создана математическая модель Синопского сражения — последнего сражения эпохи парусного флота. В 1833 г. адмирал П. С. Нахимов (1802—1855) разгромил главные силы турецкого флота. Моделирование на вычислительной машине показало, что Нахимов действовал практически безошибочно. Он настолько верно расставил свои корабли и нанес первый удар, что единственным спасением турок было отступление. Иного выхода у них не было. Они не отступили и были разгромлены.

Сложность и громоздкость технических объектов, которые могут изучаться методами моделирования, практически неограничены. Многие крупные сооружения, построенные в нашей стране, исследовались на моделях — плотины, каналы, Братская и Красноярская ГЭС, системы дальних электропередач, образцы военных и космических систем и другие объекты.

### Исторический экскурс

Поучительный пример недооценки моделирования — гибель английского броненосца «Кэптен» в 1870 г. В стремлении еще больше увеличить свое тогдашнее морское могущество и подкрепить империалистические устремления в Англии был разработан суперброненосец «Кэптен». В него было вложено все, что нужно для «верховой власти» на море: тяжелая артиллерия во вращающихся башнях, мощная бортовая броня, усиленное парусное оснащение и очень низкие борта — для меньшей уязвимости от снарядов противника.

Консультант — инженер Рид построил математическую модель остойчивости «Кэптена» и показал, что даже при незначительном ветре и волнении ему грозит опрокидывание. Но лорды Адмиралтейства настояли на строительстве корабля. На первом же учении после спуска на воду налетевший шквал перевернул броненосец. Погибли 523 моряка. В Лондоне на стене одного из соборов прикреплена бронзовая плита, напоминающая об этом событии и, добавив мы, о пренебрежении самоуверенными лордами Британского Адмиралтейства результатами моделирования.

Моделирование является технологией решения задач. Это замечание — очень важное. Так как технология есть способ достижения результата с известным заранее качеством и гарантированными затратами и сроками, то моделирование как дисциплина:

- изучает способы решения задач, т.е. является инженерной наукой;
- является универсальным инструментом, гарантирующим решение любых задач независимо от предметной области.

## 1.3. Классификация моделей и моделирования

Каждая модель создается для конкретной цели и, следовательно, уникальна. Однако наличие общих черт позволяет сгруппировать все их многообразие в отдельные классы, что облегчает их разработку

и изучение. В теории рассматривается много признаков классификации и их количество не установилось. Тем не менее наиболее актуальны следующие **признаки классификации**:

- характер моделируемой стороны объекта;
- характер процессов, протекающих в объекте;
- способ реализации модели.

### **1.3.1. Классификация моделей и моделирования по признаку «характер моделируемой стороны объекта»**

В соответствии с этим признаком модели могут быть:

- функциональными (кибернетическими);
- структурными;
- информационными.

**Функциональная модель** отображает совокупность выполняемых системой функций. В этом случае моделируемый объект рассматривается как «черный ящик», имеющий входы и выходы. Физическая сущность объекта, природа протекающих процессов, структура объекта остаются вне внимания исследователя, хотя бы потому, что они ему неизвестны. При функциональном моделировании эксперимент состоит в наблюдении за выходом моделируемого объекта при изменении входных воздействий. По этим данным и строится модель поведения в виде некоторой математической функции.

Другими словами, функциональная (иначе — *событийная, поведенческая*) модель описывает динамику функционирования: состояние системы, события, переход из одного состояния в другое, условия перехода, последовательность событий

Компьютерная шахматная программа — функциональная модель работы человеческого мозга при игре в шахматы.

**Структурное моделирование** — это создание и исследование модели, структура которой (элементы, связи) подобна структуре моделируемого объекта. Как выяснили ранее, подобие устанавливается не вообще, а относительно цели исследования. Поэтому она может быть описана на разных уровнях детализации. Наиболее общее описание структуры — это топологическое описание с помощью теории графов.

**Информационная модель** — модель объекта, представленная в виде информации, описывающей существенные для данного рассмотрения параметры и переменные величины об объекте, связи между ними, входы и выходы объекта и позволяющая путем подачи на модель информации об изменениях входных величин моделировать возможные состояния объекта.

### **1.3.2. Классификация моделей и моделирования по признаку «характер процессов, протекающих в объекте»**

По этому признаку модели могут быть детерминированными или стохастическими, статическими или динамическими, дискретными, непрерывными или дискретно-непрерывными.

*Детерминированные модели* отображают процессы, в которых отсутствуют случайные воздействия.

*Стохастические модели* отображают вероятностные процессы и события.

*Статические модели* служат для описания состояния объекта в какой-либо момент времени.

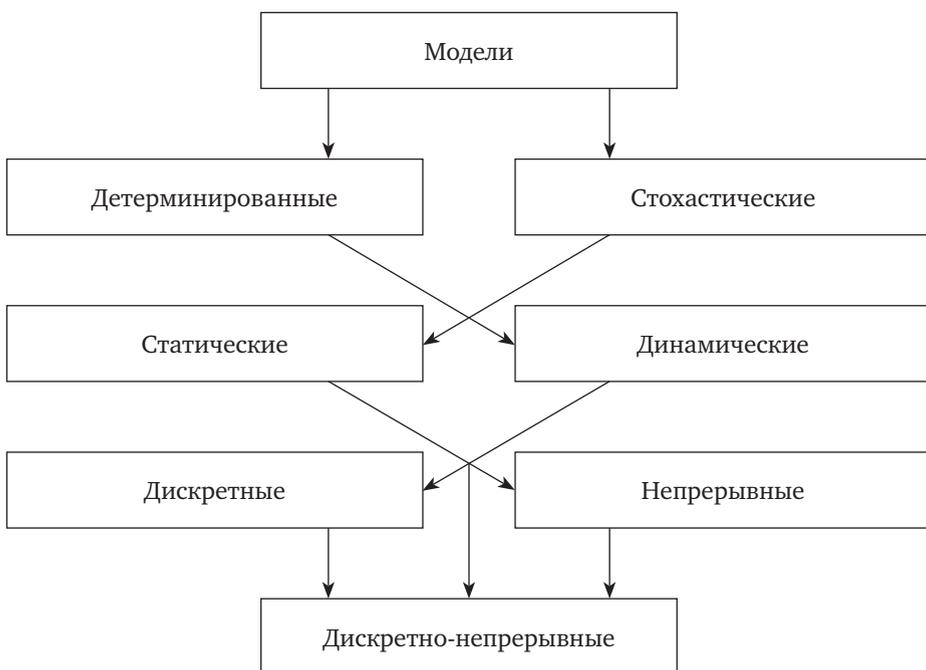
*Динамические модели* отображают поведение объекта во времени.

*Дискретные модели* отображают поведение систем с дискретными состояниями.

*Непрерывные модели* представляют системы с непрерывными процессами.

*Дискретно-непрерывные* модели строятся тогда, когда исследователя интересуют оба эти типа процессов.

Очевидно, что конкретная модель может быть стохастической, статической, дискретной или какой-либо другой (рис. 1.2).



**Рис. 1.2. Классификация моделей по признаку «характер процессов, протекающих в объекте»**

### **1.3.3. Классификация моделей и моделирования по признаку «способ реализации модели»**

Согласно этому признаку модели делятся на два обширных класса (рис. 1.3):

- абстрактные (мысленные) модели;
- материальные модели.

Нередко в практике моделирования присутствуют смешанные, абстрактно-материальные модели.

**Абстрактные модели** представляют собой определенные конструкции из общепринятых знаков на бумаге, другом материальном носителе или в виде компьютерной программы.

Абстрактные модели, не вдаваясь в излишнюю детализацию, можно разделить:

- на символные;
- математические.



Рис. 1.3. Классификация по способу реализации модели

**Символьная модель** — это логический объект, замещающий реальный процесс и выражающий основные свойства его отношений с помощью определенной системы знаков или символов. Это либо слова естественного языка, либо слова соответствующего тезауруса, графики, диаграммы и т.п.

Символическая модель может иметь самостоятельное значение, но, как правило, ее построение является начальным этапом любого другого моделирования.

**Математическое моделирование** — это процесс установления соответствия моделируемому объекту некоторой математической конструкции, называемой математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получить характеристики моделируемого объекта.

Математическое моделирование — главная цель и основное содержание изучаемой дисциплины.

Математические модели могут быть:

- аналитическими;
- имитационными;
- смешанными (аналитико-имитационными).

**Аналитические модели** — это функциональные соотношения: системы алгебраических, дифференциальных, интегро-дифференциальных уравнений, логических условий. Например, уравнения Максвелла — аналитическая модель электромагнитного поля, закон Ома — модель электрической цепи. Также аналитическими моделями являются первый и второй законы Ньютона.

Преобразование математических моделей по известным законам и правилам можно рассматривать как эксперименты. Решение на основе аналитических моделей может быть получено в результате однократного просчета безотносительно к конкретным значениям характеристик (в общем виде). Это наглядно и удобно для выявления закономерностей. Однако для сложных систем построить аналитическую модель, достаточно полно отражающую реальный процесс, удастся не всегда. Тем не менее есть процессы, например марковские, актуальность моделирования которых аналитическими моделями доказана практикой.

**Имитационное моделирование.** Создание вычислительных машин обусловило развитие нового подкласса математических моделей — имитационных.

Имитационное моделирование предполагает представление модели в виде некоторого алгоритма — компьютерной программы, — выполнение которого имитирует последовательность смены состояний в системе и таким образом представляет собой поведение моделируемой системы. Имитационная модель реализует временную диаграмму функционирования моделируемой системы.

Процесс создания и испытания таких моделей называется имитационным моделированием, а сам алгоритм — имитационной моделью.

**Имитационная модель** — универсальное средство исследования сложных систем, представляющее собой логико-алгоритмическое описание поведения отдельных элементов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность событий, возникающих в моделируемой системе.

В чем заключается принципиальное различие имитационных и аналитических моделей?

В случае аналитического моделирования компьютер является мощным калькулятором, арифмометром. Аналитическая модель *решается* на компьютере.

В случае же имитационного моделирования имитационная модель — программа — *реализуется* на компьютере.

Имитационные модели достаточно просто учитывают влияние случайных факторов. Для аналитических моделей это серьез-

ная проблема. При наличии случайных факторов необходимые характеристики моделируемых процессов получаются многократными прогонами (реализациями) имитационной модели и дальнейшей статистической обработкой накопленной информации. Поэтому часто имитационное моделирование процессов со случайными факторами называют **имитационным статистическим моделированием**.

**Статистическое моделирование** — метод исследования сложных систем, основанный на описании процессов функционирования отдельных элементов в их взаимосвязи с целью получения множества частных результатов, подлежащих обработке методами математической статистики для получения конечных результатов. В основе статистического моделирования лежит метод статистических испытаний — **метод Монте-Карло**.

Если исследование объекта затруднено использованием только аналитического или имитационного моделирования, то применяют смешанное (*комбинированное*), **аналитико-имитационное моделирование**. При построении таких моделей процессы функционирования объекта декомпозируют на подпроцессы, для которых используют аналитические модели, а для остальных подпроцессов строят имитационные модели.

**Материальное моделирование** основано на применении моделей, представляющих собой реальные технические конструкции. Это может быть сам объект или его элементы (*натурное моделирование*). Это может быть специальное устройство — модель, имеющая либо физическое, либо геометрическое подобие оригиналу. Это может быть устройство иной физической природы, чем оригинал, но процессы в котором описываются аналогичными математическими соотношениями. Это так называемое *аналоговое моделирование*. Такая аналогия наблюдается, например, между колебаниями антенны спутниковой связи под ветровой нагрузкой и колебанием электрического тока в специально подобранной электрической цепи.

Нередко создаются **материально-абстрактные модели**. Та часть операции, которая не поддается математическому описанию, моделируется материально, остальные — абстрактно. Например, командно-штабные учения, когда работа штабов представляет собой натуральный эксперимент, а действия войск отображаются только в документах.

Приведенная выше классификация является *идеальной*. Модели сложных систем обычно имеют комплексный вид, используют в своем составе сразу несколько представлений. Если удастся свести модель к одному типу, для которого уже есть математический аппарат, то исследование модели, решение задач на ней существенно упрощается, становится типовым. Для этого модель должна быть различными способами приведена к каноническому виду, т.е. к виду, для которого уже есть методы решения.