

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

**УЧЕБНИК**

*Допущено*

*Министерством образования и науки Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Автоматизация технологических процессов  
и производств» направления подготовки «Автоматизированные технологии  
и производства»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2009

УДК 681.5.017(075.8)

ББК 34.4я73

М744

Рецензенты:

руководитель направления ИСА РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. *А. П. Афанасьев*;  
зав. кафедрой «Кибернетика химико-технологических процессов» РХТУ  
им. Д. И. Менделеева, Заслуженный деятель науки Российской Федерации,  
д-р техн. наук, проф. *Л. С. Гордеев*

**Моделирование систем** : учебник для студ. высш. учеб. за-  
ведений / [С. И. Дворецкий, Ю. Л. Муромцев, В. А. Погонин,  
А. Г. Схиртладзе]. — М. : Издательский центр «Академия»,  
2009. — 320 с.

ISBN 978-5-7695-4737-9

Представлено систематизированное изложение фундаментальных основ теории моделирования и универсальных методологических подходов к моделированию технологических процессов и систем различного назначения. Особое внимание уделено математическому аппарату формализации процессов в сложных системах и методам построения математических моделей технологических процессов и производственных систем. Дано последовательное изложение аналитических моделей систем, моделей сложных систем на множестве состояний функционирования, массового обслуживания и надежности, систем искусственного интеллекта и CASE-технологии. Описаны возможности реализации моделей с использованием программно-технических средств современных ЭВМ, применения компьютерного моделирования при исследовании, проектировании и эксплуатации производственных процессов и систем.

Для студентов высших учебных заведений. Может быть полезен аспирантам, магистрантам и специалистам в области компьютерной поддержки производственных процессов и систем.

УДК 681.5.017(075.8)

ББК 34.4я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Дворецкий С. И., Муромцев Ю. Л., Погонин В. А.,  
Схиртладзе А. Г., 2009

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2009

ISBN 978-5-7695-4737-9 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2009

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
<b>Глава 1. Основы теории моделирования систем .....</b>	<b>6</b>
1.1. Принципы системного подхода .....	6
1.2. Основные понятия моделирования систем .....	11
1.3. Методология моделирования систем .....	27
1.3.1. Этапы моделирования систем .....	27
1.3.2. Основные виды моделирования систем .....	35
1.3.3. Моделирование сложных систем .....	37
1.3.4. Математические схемы моделирования систем .....	39
1.4. Методика вычислительного эксперимента .....	42
1.4.1. Адекватность математической модели .....	42
1.4.2. Планирование вычислительных экспериментов .....	44
1.4.3. Обработка и анализ результатов моделирования систем .....	54
<b>Глава 2. Методы построения математических моделей .....</b>	<b>66</b>
2.1. Классификация методов построения моделей систем .....	66
2.2. Экспериментальное определение моделей статики .....	69
2.3. Экспериментальное определение моделей динамики .....	79
2.4. Основные положения аналитического метода .....	82
2.5. Получение неформальных моделей систем .....	87
2.6. Модели сложных систем на множестве состояний функционирования .....	116
2.6.1. Множество состояний функционирования .....	116
2.6.2. Классификация сложных систем на множестве состояний функционирования .....	123
<b>Глава 3. Математическое моделирование процессов     в технологических системах .....</b>	<b>130</b>
3.1. Моделирование процесса синтеза азопигментов .....	130
3.1.1. Общие сведения .....	130
3.1.2. Проверка адекватности математической модели .....	144
3.1.3. Компьютерное исследование процесса .....	147
3.2. Моделирование процесса короткоцикловой безнагревной адсорбции .....	152
3.3. Моделирование систем на множестве состояний функционирования .....	169
<b>Глава 4. Модели производственных систем .....</b>	<b>176</b>
4.1. Предприятие как объект моделирования .....	176

4.2. Модели систем управления предприятием и его элементами .....	184
4.3. Модели управления запасами .....	190
4.4. Модели принятия решений .....	198
4.4.1. Модель принятия решений с использованием байесовского подхода и экспертных оценок .....	198
4.4.2. Модель Шортлифа — Бьюкенена .....	207
<b>Глава 5. Модели систем массового обслуживания и надежности .....</b>	<b>214</b>
5.1. Общие сведения о моделях систем массового обслуживания .....	214
5.2. Модели потоков событий .....	216
5.3. Марковские системы массового обслуживания .....	222
5.4. Модели надежности систем .....	233
5.4.1. Основные понятия .....	233
5.4.2. Неремонтируемые объекты .....	236
5.4.3. Ремонтируемые объекты .....	239
5.4.4. Системы с резервированием .....	243
<b>Глава 6. Модели систем искусственного интеллекта .....</b>	<b>250</b>
6.1. Общие сведения о системах искусственного интеллекта .....	250
6.2. Модели представления знаний .....	252
6.3. Определение и классификация неопределенности .....	255
6.4. Элементы теории нечетких множеств .....	259
6.4.1. Общие сведения .....	259
6.4.2. Основные свойства нечетких множеств .....	261
6.4.3. Операции над нечеткими множествами .....	262
6.5. Логико-лингвистические модели .....	266
6.5.1. Основные понятия нечеткой и лингвистической переменных .....	266
6.5.2. Модели нечеткого логического вывода .....	268
6.6. Нечеткое моделирование .....	273
6.7. Определение адекватности и коррекция нечеткой модели .....	276
<b>Глава 7. Компьютерные технологии в задачах моделирования .....</b>	<b>280</b>
7.1. Технологии проектирования систем .....	280
7.2. Программные средства для решения задач моделирования .....	287
7.3. Экспертные системы .....	292
7.4. Автоматизированное проектирование моделей и технологии поддержки жизненного цикла изделий .....	298
7.5. Технология когнитивного моделирования .....	301
Заключение .....	310
Список литературы .....	313

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Моделирование является основным методом исследования сложных систем и используется для принятия решений в различных сферах науки и техники. В настоящее время нельзя назвать область человеческой деятельности, в которой так или иначе не используются методы моделирования. Особенно это относится к сфере проектирования различных систем и управления ими, где главными являются процессы принятия решений на основе получаемой информации.

Моделирование можно рассматривать как один из самых мощных методов и инструментов познания, анализа и синтеза, которым располагают специалисты, ответственные за разработку и функционирование сложных технических устройств и технологических объектов (систем).

Идея моделирования состоит в замене реальной системы некоторым «образом» — математической моделью — и в дальнейшем изучении модели на компьютере с целью получения новых знаний об этой системе. При этом у исследователя появляется возможность экспериментировать с моделью системы в тех случаях, когда изучение реального объекта практически невозможно или нецелесообразно. Работа не с самим объектом (явлением, процессом), а с его математической моделью осуществляется относительно быстро и без значительных затрат на исследование его свойств и поведения в любых мыслимых ситуациях (преимущества теории). В то же время вычислительные (имитационные) эксперименты с моделью системы позволяют изучать ее поведение в достаточной полноте, недоступной при чисто теоретических подходах (преимущества эксперимента).

Важным начальным этапом построения модели является формулирование требований, которым должна удовлетворять модель, т. е. разработка технического задания на модель системы. Эти требования должны обеспечивать решение той или иной задачи, например, проектирования, оптимизации, управления, прогнозирования, исследования свойств системы с использованием ее модели.

Методология моделирования предусматривает тщательную разработку моделей. Обычно, начав с очень простой модели, постепенно продвигаются к более совершенной ее форме, отражаю-

щей сложную природу изучаемой системы наиболее точно. Искусство моделирования состоит в способности анализировать проблему, выделять из нее путем абстракции наиболее существенные черты, выбирать и должным образом модифицировать предположения, характеризующие систему, а затем отрабатывать и совершенствовать модель до тех пор, пока она не станет давать полезные для практического использования результаты. Таким образом, разработка и применение моделей все-таки в большей степени искусство, нежели наука. Следовательно, как и в других видах искусства, успех или неудача определяются не столько методом, сколько тем, как он применяется.

В складывавшейся десятилетиями последовательности основных этапов разработки и проектирования систем (технических и/или технологических) некоторый начальный объем необходимой информации создавался путем так называемых проектировочных расчетов, степень достоверности которых была невелика и обеспечивала лишь довольно грубый отбор альтернатив. Основная часть необходимой для принятия окончательного решения количественной информации (как по степени подробности, так и по уровню достоверности) формировалась на стадии экспериментальной отработки этих систем. По мере их усложнения и удорожания, а также удлинения стадии их экспериментальной отработки значимость проектировочных расчетов стала расти. Возникла необходимость в повышении достоверности таких расчетов, обеспечивающей более обоснованный отбор альтернатив на начальной стадии проектирования и формулировку количественных критериев для структурной и параметрической оптимизации.

Создание гибких автоматизированных производственных систем и сложных технических устройств, сверхзвуковой авиации, возникновение ракетно-космической техники, ядерной энергетики, разработка нанотехнологий и развитие других наукоемких отраслей современного машиностроения и приборостроения привели к дальнейшему усложнению разрабатываемых и эксплуатируемых технических и технологических систем. Для проведения экспериментальной отработки требовались большие затраты времени и материальных ресурсов, а в ряде случаев ее проведение в полном объеме превратилось в проблему, не имеющую приемлемого решения.

В этих условиях существенно увеличилось значение расчетно-теоретического анализа характеристик технических и технологических систем. Бурному развитию методов такого анализа способствовал и прорыв в совершенствовании вычислительной техники и численных методов решения различных математических задач, приведший к появлению современных ЭВМ с феноменальными объемом памяти и скоростью выполнения арифметических операций. В результате возникла материальная база для становления и

быстрого развития компьютерного моделирования не только в качестве расчетно-теоретического сопровождения на стадии отработки технических и технологических систем, но и при их проектировании, подборе и оптимизации их эксплуатационных режимов, анализе надежности и прогнозировании отказов и аварийных ситуаций, а также при оценке возможностей форсирования характеристик и модернизации таких систем.

Собственно моделирование представляет собой процесс конструирования математической модели реальной системы (технической и/или технологической) и постановки вычислительных экспериментов на этой модели с целью либо понять (исследовать) поведение этой системы, либо оценить эффективность различных стратегий (алгоритмов) ее функционирования с помощью реализуемых на компьютерах вычислительно-логических алгоритмов. Таким образом, процесс моделирования включает в себя конструирование модели и ее применение для решения поставленной задачи анализа, исследования, оптимизации или синтеза (проектирования) системы.

С развитием науки и техники объектами исследования становятся все более сложные системы, которые нельзя исследовать только в предположении их нормальной работоспособности или нормального функционирования. В сложных системах вследствие исключительно большого числа элементов, их многофункциональности, введения различных видов резервирования происходят изменения состояний работоспособности элементов без прекращения функционирования системы.

В данном учебнике рассматривается новый подход к решению задач анализа и синтеза систем, учитывающий множество состояний функционирования в процессе эксплуатации систем.

Авторы признательны руководителю направления ИСА РАН, д-ру физ.-мат. наук, проф. А. П. Афанасьеву и зав. кафедрой кибернетики химико-технологических процессов РХТУ им. Д. И. Менделеева, д-ру техн. наук, проф. Л. С. Гордееву за рецензирование рукописи и полезные замечания, которые были учтены.

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ

## 1.1. Принципы системного подхода

Основу современного подхода к решению задач анализа и синтеза сложных технических и технологических систем (ТС) составляет системный анализ [7].

*Системный анализ* есть метод научного познания, состоящий в том, что любой объект по отношению к субъекту рассматривается как система — сложное образование, состоящее из большого числа элементов, связанных между собой вещественными, энергетическими, информационными и другими связями сильнее, чем с окружающей средой.

Сущность системного анализа определяется тем, что мы вкладываем в понятие «система». Будем называть *системой* совокупность элементов, обладающую следующими свойствами:

- целостности и членимости;
- связности;
- интегративности (эмерджентности);
- организованности;
- наличия цикла существования — жизненного цикла системы.

Рассмотрим подробнее каждое из этих свойств.

**Свойство целостности и членимости.** Система — это прежде всего целостная совокупность взаимосвязанных элементов. Система допускает детализацию (расчленение) на подсистемы, т.е. на пространственно-временные агрегаты, состоящие из взаимосвязанных элементов. Элементы системы при определенных условиях могут рассматриваться как самостоятельные системы, а сама система — как элемент более высокого уровня иерархического расчленения. Расчленение системы на подсистемы и элементы часто является условным и зависит от целей проводимого исследования.

**Свойство связности системы.** Система существует как целостное образование тогда и только тогда, когда сила межэлементных связей внутри системы выше, чем сила связи этих элементов с окружающей средой. Связи между элементами различают по физическому наполнению (вещественные, энергетические, информационные) и направлению (прямые, обратные).



Упорядоченная в пространстве и времени совокупность элементов и связей образует *структуру системы*. Наглядно структура системы может быть представлена в виде графа, узлы (вершины) которого соответствуют элементам, а дуги — связям.

**Свойство интегративности.** Интегративное качество (эмерджентность) системы состоит в том, что она обладает свойствами, присущими системе в целом, но не присущими ни одному ее элементу в отдельности. Наличие интегративных качеств показывает, что свойства системы хотя и зависят от свойств элементов, но не определяются ими полностью. Отсюда следуют два важных вывода:

- система не сводится к простой совокупности элементов;
- расчлняя систему на отдельные элементы, изучая каждый из них в отдельности, нельзя познать все свойства системы в целом.

**Свойство организованности системы.** Организованность проявляется в снижении информационной энтропии (степени неопределенности) системы. Переход к более высокому уровню упорядоченности и организованности системы означает уменьшение ее текущей неопределенности (энтропии) за счет накопления информации.

**Свойство наличия жизненного цикла системы.** Существование жизненного цикла характерно для систем любого типа — естественных и искусственных, технических, биологических, социальных и др.

*Жизненный цикл системы* — это промежуток времени от момента принятия решения о создании (проектировании) до момента окончания эксплуатации (утилизации) системы.

Жизненный цикл системы, в частности, определяет характер изменения во времени главных характеристик системы (работоспособности, силы, мощности, производительности и т.д.).

**Структура и функции.** Понятие структуры определяется свойством связности. *Структура* системы есть устойчивая и упорядоченная в пространстве и во времени совокупность ее элементов и связей. Неотъемлемым свойством структуры системы является ее иерархичность (соподчиненность подсистем).

*Функция* системы есть проявление ее определенных свойств при взаимодействии с внешней средой. *Функция* элемента есть реализация его системоопределенных свойств при формировании элемента и его связей в системе. Отличительным (интегративным) свойством системы является то, что ни один из ее элементов не имеет присущих ей свойств, не может выполнять ту функцию, которую выполняет она.

Элементы системы обладают некоторым набором свойств. Одни из этих свойств при формировании связей элементов подавляются, другие, напротив, проявляются сильнее. Однако степень по-

давления системнезначимых свойств элемента, как правило, не бывает полной. В связи с этим при формировании системы возникают не только полезные функции, обеспечивающие сохранение системой ее качественной особенности, но и дисфункции, т.е. функции, негативно влияющие на функционирование системы, рост которых может привести к ее разрушению.

*Морфологическое описание* дает представление о строении системы. Глубина описания, уровень его детализации определяются целью и назначением системы. Морфологическое описание дает представление об элементном составе, связях и структуре подсистем на различных уровнях иерархии.

*Функциональное описание*, как и морфологическое, имеет иерархическую схему и отражает иерархию функций, процессов и параметров. Оно предусматривает изучение функциональных зависимостей между элементами системы, между элементами и системой в целом, между системой и внешней средой.

*Информационное описание* дает представление об организации системы, определяет взаимодействие морфологических и функциональных компонент системы в зависимости от качества и количества внутренней и внешней информации.

Системный анализ определяется его стратегией, в основе которой лежат общие принципы, применимые к решению любой системной задачи. К ним можно отнести:

- четкую формулировку цели исследования, постановку задачи по достижению заданной цели и определение критерия эффективности решения задачи;
- разработку развернутой стратегии исследования с указанием основных этапов и направлений в решении задачи: последовательно-параллельное продвижение по всему комплексу взаимосвязанных этапов и возможных направлений; организацию последовательных приближений и повторных циклов исследований на отдельных этапах; принцип нисходящей иерархии анализа и восходящей иерархии синтеза при решении составных частных задач.

Можно выделить три основные задачи, связанные с изучением и созданием систем: анализ систем, их синтез и принятие решений (при оптимизации системы, выборе оптимального управления режимами функционирования системы и т.п.).

*Анализ* состоит в изучении свойств и поведения систем в различных условиях функционирования. В ходе анализа устанавливаются численные значения показателей эффективности систем.

*Синтез* заключается в построении возможных (допустимых) вариантов систем. Различают структурный и параметрический синтез. *Структурный синтез* — это построение структуры системы (элементов и связей). *Параметрический синтез* — определение параметров элементов при заданной структуре. Задача синтеза решается при проектировании ТС.

*Оценка и принятие решений* (оптимизация) заключаются в выборе наилучшего варианта ТС из нескольких альтернативных и оценке эффективности его функционирования. Функционирование ТС характеризуется некоторым количественным или качественным *функционалом*, который называют *показателем эффективности*.

В общем случае ТС можно охарактеризовать кортежем символов, например

$$ТС = \langle \PhiН, \Phi, СТ, К, О, \mathcal{E} \rangle,$$

где ТС — техническая (технологическая) система;  $\PhiН$  — функциональное назначение;  $\Phi$  — функция; СТ — структура; К — компоновка; О — организация;  $\mathcal{E}$  — вектор показателей эффективности (качества).

*Функциональное назначение* ( $\PhiН$ ) характеризуется, например, ассортиментом выпускаемой продукции и объемом производства, а также другими директивными показателями.

*Функция* ( $\Phi$ ) вводится для представления согласованной последовательности операций, посредством которых совершают физико-химические и другие преобразования продукта согласно комплексу заданных свойств. Функцию  $\Phi$  удобно описывать ориентированным графом  $\Phi = (ТО, U)$ , в котором в качестве множества вершин  $ТО$  выступают технологические операции, а в качестве множества ребер  $U$  — материальные и информационные связи, характеризующие в процессе обработки потоки продукции, передающейся с одной операции на другую. Вариантность  $\Phi$  определяется качественными изменениями на множестве  $ТО$ , а именно заключается в возможности получения одного и того же результата различными способами (методами) обработки.

Под *структурой* (СТ) будем понимать некоторую организацию системы посредством синтеза из отдельных элементов, обладающих определенными свойствами и характеризующих цель и назначение ТС. Структура отражает качественный и количественный состав, множество связей между элементами и определяет основные свойства ТС. В качестве элемента СТ можно считать  $ТО$  в совокупности с определенным технологическим оборудованием и вспомогательными техническими средствами.

*Компоновка* (К) сводится к задаче геометрического размещения системных элементов в заданном (например, производственном) объеме или на заданной площади.

*Организация* (О) — это актуализация и упорядочение связей и самих элементов. Организация заключается в разработке схем взаимодействия материальных, энергетических и трудовых ресурсов со средствами производства во времени и пространстве. Важнейшим компонентом организации является система управления,

призванная обеспечить целенаправленное поведение ТС в условиях изменения ее внешних и внутренних параметров.

*Вектор показателей эффективности* (Э) задается совокупностью качественных и количественных показателей эффективности функционирования ТС, характеризующих полезный эффект от ее использования.

Достаточно полно методологию системного подхода отражают три основных принципа: физичности, моделируемости и целенаправленности.

*Принцип физичности:* всякой системе присущи физические законы, определяющие ее внутренние причинно-следственные связи, существование и функционирование.

*Принцип моделируемости:* система представима конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности. Выявление новых свойств и сущностей не обязательно должно сопровождаться построением обобщающих моделей, а может ограничиваться наращиванием числа упрощенных моделей, взаимодействие которых обеспечивает отражение сложной системы в целом.

*Принцип целенаправленности:* сложной системе присуща функциональная тенденция, направленная на достижение некоторого состояния или на усиление (сохранение) некоторого процесса, при этом система способна противостоять внешнему воздействию, а также использовать среду и случайные события.

Сложная система обладает способностью к *выбору поведения*, и, следовательно, однозначно предсказать и экстраполировать ее состояние невозможно ни при каком априорном знании свойств системы и ситуаций.

Сложная система строит свое поведение в существенной (хотя и неоднозначной) связи с ситуацией. Следовательно, на это поведение можно влиять. Наиболее распространенными являются эргатические системы, для которых постулат выбора выдвигается на передний план. Познание и практическое использование этого постулата имеет два аспекта.

Первый касается стимулирования или подавления «свободы» выбора. В исследовательских, поисковых, творческих системах возможность выбора должна быть максимальной — она расширяет диапазон деятельности. Исполнительные системы должны иметь возможность выбора в пределах поставленной задачи либо не иметь ее вовсе.

Второй аспект связан с количеством описаний выбора, его формальным представлением, качественной или количественной оценкой выбора и использованием этой оценки при решении задач общего характера.

Сложные системы управления имеют возможность выбора и обладают способностью выбирать поведение, т. е. реагировать на

внешние воздействия в зависимости от внутренних критериев целенаправленности; никакое априорное знание не позволяет ни надсистеме, ни самой системе однозначно предсказать этот выбор. Постулат выбора позволяет сложной системе управления, в соответствии с ее целенаправленностью, использовать редкие благоприятные события, возникающие во взаимодействии со средой, блокируя остальные (неблагоприятные) события и процессы.

## 1.2. Основные понятия моделирования систем

Замещение одной системы другой с целью получения информации о важнейших свойствах системы-оригинала с помощью системы-модели называется *моделированием*.

Моделирование может быть также определено как представление системы моделью для получения информации об этой системе путем проведения экспериментов (натурных, вычислительных и т.п.) с моделью [30, 31].

Обобщенно моделирование можно определить как метод опосредованного познания, при котором изучаемая система-оригинал находится в некотором соответствии с другой системой-моделью, причем модель способна в том или ином отношении замещать оригинал на некоторых стадиях познавательного процесса. Стадии познания, на которых происходит такая замена, а также формы соответствия модели и оригинала могут быть различными.

Моделирование может рассматриваться как познавательный процесс, содержащий переработку информации, поступающей из внешней среды, о происходящих в ней явлениях, в результате чего в сознании появляются образы, соответствующие системам.

Моделирование может заключаться в построении некоторой системы-модели (второй системы), связанной определенными соотношениями подобия с системой-оригиналом (первой системой), причем в этом случае отображение одной системы в другую является средством выявления зависимостей между двумя системами, отраженными в соотношениях подобия, а не результатом непосредственного изучения поступающей информации.

Отметим, что с точки зрения философа моделирование — эффективное средство познания природы. Процесс моделирования предполагает наличие *объекта (системы) исследования; исследователя*, перед которым поставлена конкретная задача; *модели*, создаваемой для получения информации о системе и необходимой для решения поставленной задачи. Причем по отношению к модели исследователь является, по сути дела, экспериментатором, только в данном случае эксперимент проводится не с реальной системой, а с ее моделью. Такой эксперимент для инженера есть

инструмент непосредственного решения организационно-технических задач.

Следует заметить, что любой эксперимент может иметь существенное значение в конкретной области науки только при специальной обработке и обобщении его результатов. Единичный эксперимент никогда не может быть решающим для подтверждения гипотезы, проверки теории. Поэтому инженеры (исследователи и практики) должны быть знакомы с элементами современной методологии теории познания и, в частности, не должны забывать основного положения материалистической философии, что именно экспериментальное исследование, опыт, практика являются критерием истины.

Одной из самых актуальных проблем современной науки и техники является разработка и внедрение в практику проектирования новейших методов исследования характеристик сложных ТС, в том числе информационно-управляющих и информационно-вычислительных систем различных уровней. При проектировании таких систем возникают многочисленные задачи, требующие проведения структурного и параметрического синтеза, оценки количественных и качественных закономерностей процессов функционирования сложных систем и их подсистем.

Рассматриваемые далее ТС и автоматизированные системы управления относятся к классу сложных систем, проектирование, эксплуатация и эволюция которых в настоящее время невозможны без использования различных видов моделирования. При моделировании необходимо учитывать следующие особенности: сложность структуры и стохастичность связей между элементами, неоднозначность алгоритмов поведения при различных условиях, большое количество параметров и переменных, неполноту и недетерминированность (неопределенность) исходной информации, разнообразие и вероятностный характер воздействий внешней среды и т.д. Ограниченность возможностей экспериментального исследования сложных систем делает актуальной разработку методики их моделирования, которая позволяла бы в соответствующей форме представлять процессы функционирования исследуемых или проектируемых систем, оценивать их характеристики.

Выбор метода моделирования и необходимая детализация моделей существенно зависят от этапа разработки сложной системы. На этапах обследования, например, промышленного предприятия и разработки технического задания на проектирование автоматизированной системы управления модели в основном носят описательный характер и преследуют цель наиболее полно представить в компактной форме информацию об объекте управления, необходимую разработчику системы.

На этапах разработки технического задания и рабочего проекта модели отдельных подсистем детализируются, и моделирование

служит для решения конкретных задач проектирования, т.е. выбора оптимального по определенному критерию при заданных ограничениях варианта из множества допустимых. Поэтому на этих этапах проектирования сложных систем в основном используются модели для целей синтеза.

Целевое назначение моделирования на этапе эксплуатации сложных систем — это рассмотрение возможных ситуаций для принятия обоснованных и перспективных решений по управлению объектом. Моделирование (имитацию) также широко применяют при обучении и тренировке персонала автоматизированных систем управления, вычислительных комплексов и сетей, информационных систем в различных сферах. В этом случае моделирование носит характер деловых игр. Модель, реализуемая обычно на ЭВМ, воспроизводит поведение управляемого объекта и внешней среды, а люди в определенные моменты времени принимают решения по управлению объектом.

С развитием системных исследований, с расширением экспериментальных методов изучения реальных явлений все большее значение приобретают абстрактные методы исследований, появляются новые научные дисциплины, автоматизируются элементы умственного труда. Особое значение при создании реальных систем имеют математические методы анализа и синтеза, целый ряд открытий базируется на чисто теоретических изысканиях. Однако было бы неправильно забывать о том, что основным критерием любой теории является практика, и даже сугубо математические, отвлеченные науки базируются в своей основе на фундаменте практических знаний.

Одновременно с развитием теоретических методов анализа и синтеза совершенствуются и методы экспериментального изучения реальных объектов, появляются новые средства исследования. Эксперимент был и остается одним из основных и существенных инструментов познания. Подобие и моделирование позволяют по-новому описать реальный процесс и упростить его экспериментальное изучение. Совершенствуется и само понятие моделирования. Если раньше моделирование означало реальный физический эксперимент либо построение макета, имитирующего реальный процесс, то в настоящее время появились новые виды моделирования, в основе которых лежит постановка не только физических, но также и математических (вычислительных) экспериментов.

Разработка моделей выполняется для решения каких-либо проблем или задач, стоящих перед исследователем. В зависимости от характера задачи к модели предъявляются определенные требования, прежде всего это пригодность модели для решения соответствующей задачи по форме, точности, быстродействию, диапазону изменения переменных, уровню формализации и т.д. Во мно-

гих исследовательских задачах модель служит источником информации при выполнении вычислений для получения конечного результата, а созданные для ее представления математические модели являются своего рода хранилищем и носителем информации о связях между переменными, характером их изменения, свойствах системы (процесса, явления) и т.д.

Наиболее часто исследователю приходится иметь дело со следующими классами задач, которые решаются с использованием моделей:

- проектирование различного рода сложных систем;
- оптимизация и оптимальное управление сложными системами;
- исследование свойств систем, процессов, материалов;
- прогнозирование поведения систем и процессов;
- реинжиниринг организации;
- планирование деятельности и ресурсов;
- принятие различного рода управленческих решений;
- проблемы изучения и использования искусственного интеллекта.

Необходимо отметить, что многие задачи решаются в условиях неопределенности, отсутствия достаточного объема исходных данных. Для такого рода задач наблюдается некоторое объединение модели и алгоритма решения, т.е. алгоритм, процедура решения задачи в значительной степени берет на себя функции модели, модель и алгоритм рассматриваются как единое целое. Это наблюдается, например, при использовании байесовского подхода.

В табл. 1.1 приведены основные классы задач и используемые для их решения виды моделей, а также требования, предъявляемые к этим моделям.

Понятие математической модели (ММ), как и ряд других понятий, используемых в математическом моделировании, не имеет строгого формального определения. Тем не менее, в это понятие вкладывают вполне конкретное содержание, с которым, в частности, тесно связано применение математики в инженерной практике.

Этапы развития многих естественно-научных направлений в познании законов природы и в совершенствовании техники и технологий — это построение последовательности все более точных и более полных ММ изучаемых процессов и явлений. Соответствующая реальности (адекватная) ММ является, как правило, большим научным достижением, позволяет провести детальное исследование изучаемой системы и дать надежный прогноз ее поведения в различных условиях. Но за адекватность ММ нередко приходится расплачиваться ее усложнением, что вызывает трудности при ее использовании. В этом случае на помощь математике приходит современная вычислительная техника, существенно рас-



## Основные классы задач, решаемые с использованием моделей

Задачи		Модели	
Классы	Примеры (этапы)	Виды	Требования
Проектирование	Формирование концепций, согласование технического задания, разработка технического предложения	Концептуальные и когнитивные модели	ВДР, УСФ
	Разработка эскизного проекта	Модели на множестве состояний функционирования	УСФ
	Разработка технического проекта и рабочей конструкторской документации	Модели данных	ВТ, ВУФ
	Анализ альтернативных вариантов	Модели байесовского подхода	ВДР
	Управление потоком работ (проектов)	Модели систем массового обслуживания	ВТ, УСФ
Оптимизация	Оптимизация режимов объектов с сосредоточенными параметрами	Аналитические модели (модели на основе фундаментальных законов физики, химии и т.д.); модели в виде систем алгебраических уравнений	ВТ
	Оптимизация режимов объектов с распределенными параметрами	Аналитические модели (в виде дифференциальных уравнений в частных производных)	ВТ
	Оптимальное управление динамическими режимами	Дифференциальные уравнения, передаточные функции, частотные и временные характеристики; линейные и нелинейные модели; модели на множестве состояний функционирования	ВТ, Б
	Выбор оптимального варианта	Модели Шортлифа—Бьюкенена, Демпстера—Шафера	ВДР