



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УЧЕБНИК ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

Под редакцией **В. Н. Волковой, В. Н. Козлова**

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

Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru

Москва ■ Юрайт ■ 2015

УДК 68(075.8)
ББК 32.965я73
М74

Ответственные редакторы:

Волкова Виолетта Николаевна — профессор, доктор экономических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (национального исследовательского университета), заслуженный работник высшей школы Российской Федерации;

Козлов Владимир Николаевич — профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой системного анализа и управления Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (национального исследовательского университета), заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.

Рецензенты:

Игнатъев М. Б. — доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета авиационного приборостроения;

Арефьев И. Б. — доктор технических наук, профессор-сенатор Морской академии Польши, член комиссии Польской академии наук по проблемам организации и управления;

Емельянов А. А. — доктор технических наук, профессор Московского энергетического института.

М74 Моделирование систем и процессов : учебник для академического бакалавриата / В. Н. Волкова, Г. В. Горелова, В. Н. Козлов [и др.] ; под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. — М. : Издательство Юрайт, 2015. — 449 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-9916-5493-7

Целью учебника является упорядочение знаний в области моделирования систем различных классов. В соответствии с этим кратко характеризуются понятия модели и моделирования. Приводится обзор подходов к моделированию систем, обосновывается классификация методов моделирования; рассматриваются методы формализованного представления систем, методы, направленные на активизацию интуиции и опыта специалистов, методы организации сложных экспертиз. Приводятся примеры специальных подходов, сочетающих возможности качественного и количественного анализов. Приводится классификация и кратко характеризуются модели интеллектуального анализа данных.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов, обучающихся по направлению «Системный анализ и управление». Может быть полезным для студентов других специальностей, связанных с проектированием сложных технических комплексов и разработкой систем управления.

УДК 68(075.8)
ББК 32.965я73

Оглавление

Авторский коллектив	7
Предисловие	8
Принятые сокращения	10
Глава 1. Понятие о моделировании систем, классификации подходов и методов моделирования	11
1.1. Понятие о модели и моделировании.....	12
1.2. Проблема принятия решений и выбора методов моделирования.....	18
1.3. Предпосылки возникновения и задачи теории систем и других междисциплинарных направлений	22
1.4. Классификации систем.....	28
1.5. Подходы к моделированию систем	34
1.6. Классификации методов моделирования систем.....	38
1.7. Классификация моделей систем	47
<i>Темы для самоконтроля</i>	52
Глава 2. Аналитические методы моделирования систем	53
2.1. Основной понятийный аппарат аналитических методов.....	54
2.2. Вариационное исчисление.....	62
2.3. Математическое программирование.....	74
2.3.1. Классификация задач математического программирования	75
2.3.2. Виды методов математического программирования	76
2.4. Метод линейного программирования, симплекс-метод и линейные оценки	78
2.4.1. Постановка задачи линейного программирования.....	78
2.4.2. Канонические формы ограничений, базисные решения, существование, единственность и ограниченность решений.....	79
2.4.3. Формирование конечной минимизирующей последовательности базисных решений.....	82
2.4.4. Методы минимизации линейных и кусочно-линейных функционалов с линейными и интервальными ограничениями	87
2.5. Методы выпуклого математического программирования и безусловные нелинейные оценки	88
2.5.1. Метод наискорейшего спуска.....	89
2.5.2. Метод Ньютона	92
2.5.3. Метод сопряженных градиентов	96
2.6. Методы выпуклого математического программирования и условные нелинейные оценки.....	97

2.6.1. Необходимые и достаточные условия оптимальности как теорема Куна — Таккера.....	97
2.6.2. Методы оптимизации на основе теоремы Куна — Таккера	102
2.6.3. Метод проекции градиента и условные нелинейные оценки.....	104
2.7. Метод динамического программирования и оценки для задач оптимального управления	110
2.7.1. Постановки задач оптимального управления.....	110
2.7.2. Необходимые условия оптимальности динамического программирования как уравнения Р. Беллмана	111
2.7.3. Вычисление оптимальных управлений и матричные уравнения Риккати	112
2.8. Методы оценки вариантов при принятии решений в условиях неопределенности.....	115
2.8.1. Метод системных (решающих) матриц и экспертные оценки в пространстве «варианты — условия»	115
2.8.2. Экспертные оценки минимаксного метода и методов Байеса — Лапласа и Сэвиджа	120
2.8.3. Производные критерии, оценки и принятие решений	123
2.9. Особенности и границы применимости аналитических методов.....	125
<i>Темы для самоконтроля.....</i>	<i>129</i>
Глава 3. Статистические методы моделирования систем.....	130
3.1. Основной понятийный аппарат статистических методов.....	130
3.2. Математическая статистика.....	137
3.3. Теория статистических испытаний, или статистического имитационного моделирования	139
3.4. Теория выдвижения и проверки статистических гипотез А. Вальда	142
3.5. Элементы теории массового обслуживания	145
3.6. Особенности и возможности применения статистических представлений.....	151
<i>Темы для самоконтроля.....</i>	<i>152</i>
Глава 4. Модели, основанные на теоретико-множественных представлениях, математической логике, математической лингвистике и теории графов	153
4.1. Общие сведения о дискретной математике	153
4.2. Теоретико-множественные представления и их применение при моделировании систем.....	155
4.3. Элементы математической логики	161
4.4. Элементы математической лингвистики и семиотики	168
4.5. Графы и сетевые методы моделирования.....	179
4.6. Возможности применения моделей, основанных на теоретико-множественных представлениях, математической логике и математической лингвистике	182
<i>Темы для самоконтроля.....</i>	<i>184</i>
Глава 5. Методы активизации интуиции и опыта специалистов	186
5.1. Методы выработки коллективных решений.....	187
5.2. Модели, основанные на методах структуризации	191

5.3. Методы и методики структурного анализа	205
5.4. Морфологические методы	219
<i>Темы для самоконтроля</i>	223
Глава 6. Подходы и модели теории систем, основанные на совместном использовании средств МАИС и МФПС	224
6.1. Теория информационного поля и информационный подход к моделированию систем А. А. Денисова	224
6.2. Подход, основанный на постепенной формализации моделей принятия решений	248
6.3. Системно-структурный синтез	267
6.4. Когнитивное моделирование сложных систем	285
6.4.1. Математическое представление когнитивных моделей.....	285
6.4.2. Методология когнитивного моделирования сложных систем	288
<i>Темы для самоконтроля</i>	313
Глава 7. Методы экспертных оценок и модели организации сложных экспертиз	314
7.1. Методы экспертных оценок	315
7.2. Метод усложненной экспертной процедуры в методике ПАТТЕРН	321
7.3. Метод анализа иерархий Т. Саати	326
7.4. Метод комбинаторной топологии, или симплициального комплекса.....	329
7.5. Метод решающих матриц Г. С. Поспелова	332
7.6. Методы организации сложных экспертиз, основанные на использовании информационного подхода А. А. Денисова.....	335
<i>Темы для самоконтроля</i>	349
Глава 8. Модели представления и извлечения знаний	350
8.1. Классификация моделей представления и извлечения знаний	350
8.2. Модели на принципах, заимствованных у природы	352
8.3. Понятие об интеллектуальном анализе данных	356
8.4. ИАД и математическая статистика	360
8.5. Регрессионные модели ИАД.....	362
8.6. Машинное обучение	365
8.7. Когнитивный подход в ИАД.....	371
8.8. Предметно-ориентированные аналитические системы	376
<i>Темы для самоконтроля</i>	380
Заключение	381
Практические задания	386
Литература	387
Приложение 1. Методы теории подобия и размерности	389
Приложение 2. Языки моделирования	397
Приложение 3. Применение информационного подхода для анализа иерархических структур.....	400
Приложение 4. Применение информационного подхода для моделирования переходных процессов становления понятий и принятия решений.....	406

Приложение 5. Модели постепенной формализации принятия плановых решений на основе морфологического подхода	409
Приложение 6. Применение технологии когнитивного моделирования	416
Приложение 7. Модели организации сложной экспертизы для управления проектами сложных технических комплексов	422
Приложение 8. Комплекс моделей организации сложных экспертиз для управления кадровыми ресурсами проектно-конструкторских подразделений предприятий или проектных коллективов.....	427
Приложение 9. Прикладная аналитическая платформа <i>Deductor</i>	435
Предметный указатель	441
Именной указатель	446

Авторский коллектив

Волкова Виолетта Николаевна — доктор экономических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Института информационных технологий и управления НИУ «СПбГПУ», заслуженный работник высшей школы РФ;

Горелова Галина Викторовна — доктор технических наук, профессор кафедры государственного и муниципального управления Инженерно-технологической академии Южного федерального университета (г. Таганрог);

Козлов Владимир Николаевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа и управления Института информационных технологий и управления НИУ «СПбГПУ», заслуженный работник высшей школы РФ;

Лыпгарь Юрий Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Института информационных технологий и управления НИУ «СПбГПУ»;

Паклин Николай Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики и МПФ физико-математического факультета Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина;

Фирсов Андрей Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Института информационных технологий и управления НИУ «СПбГПУ», заместитель заведующего кафедрой по научной работе;

Черненькая Людмила Васильевна — доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Института информационных технологий и управления НИУ «СПбГПУ».

Предисловие

Целью учебника является упорядочение знаний в области моделирования систем различных классов.

В соответствии с этой целью кратко характеризуются понятия «модель», «моделирование», «проблема принятия решений». При разработке модели необходимо осуществлять выбор методов моделирования. Для этого с самого начала развития теории систем и системного анализа применялись классификации систем, которые предлагались для того, чтобы ограничить выбор подходов к отображению системы, сопоставить выделенным классам приемы и методы системного анализа и дать рекомендации по выбору методов для соответствующего класса систем.

Поэтому приводится обзор подходов к моделированию систем, обосновывается принятая классификация моделей, основанная на классификации методов моделирования (гл. 1), включая методы формализованного представления систем (МФПС); методы, направленные на активизацию интуиции и опыта специалистов (МАИС), специальные подходы системного анализа, сочетающие возможности средств МАИС и МФПС.

Рассматриваются основные особенности и положения методов математического моделирования систем в условиях, когда известны цели, требования и необходимые данные для решения задачи, т.е. в условиях полной определенности и в условиях неопределенности ситуации принятия решения (гл. 2); кратко характеризуются статистические модели, включая основные понятия о теориях математической статистики, имитационного статистического моделирования, выдвижения и проверки статистических гипотез А. Вальда, модели массового обслуживания (гл. 3); дается представление о методах дискретной математики, включая теоретико-множественные представления, элементы математической логики, математической лингвистики, теории графов и сетевого моделирования (гл. 4); приводится обзор методов, направленных на активизацию интуиции и опыта специалистов (МАИС), реализуемых в формах коллективной генерации идей, методов структуризации, экспертных оценок и т.д. (гл. 5); излагаются специальные подходы, сочетающие возможности средств МАИС и МФПС, предложенные и развиваемые авторами учебника (гл. 6); обосновываются необходимость и принципы разработки методов организации сложных экспертиз, приводятся их примеры (гл. 7, приложения 7, 8). Кратко характеризуется направление моделирования, возникшее на основе развития методов и средств автоматизации анализа информации — модели представления и извлечения знаний (гл. 8).

В результате изучения дисциплины обучаемые должны:

знать

- классификации методов моделирования систем;
- основные особенности и возможности применения методов моделирования систем различных классов в реальных условиях, возникающих при проведении научных исследований, проектировании технических систем и управлении производственными предприятиями и научно-исследовательскими организациями;

уметь

- выбирать и предлагать новые методологические подходы к решению задач в профессиональной сфере деятельности, методы моделирования систем различных классов для принятия решений при создании автоматизированных технических комплексов, при разработке систем управления предприятиями и организациями;

владеть

- навыками применения методов моделирования систем и процессов и автоматизированных процедур для их реализации.

Предисловие, заключение и гл. 1 подготовлены совместно В. Н. Волковой и В. Н. Козловым при участии в подготовке параграфа 1.1 А. Н. Фирсова; гл. 2 — В. Н. Козловым; гл. 4, 5, 7, параграфы 3.1—3.4, 6.2 и приложение 5 — В. Н. Волковой; параграфы 6.4, 7.4 и приложение 6 — Г. В. Гореловой; параграф 6.3 — Ю. И. Лыпарем; параграфы 8.1—8.4, 8.8 и приложение 9 — Н. Б. Паклиным; параграфы 8.5—8.7 — Л. В. Черненко, параграфы 2.1, 2.2, 3.5 и приложения 1 и 2 — А. Н. Фирсовым. В учебник включены основные положения теории информационного поля и информационного подхода к моделированию систем А. А. Денисова в изложении автора (параграф 6.1, приложения 3 и 4). В приложениях 7, 8 приводятся примеры моделей, разработанных аспирантами НИУ «СПбГПУ».

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Томского государственного университета Феликсу Петровичу Тарасенко за рекомендации по структуре учебника и корректировку гл. 1, рецензентам — доктору технических наук, профессору Санкт-Петербургского государственного университета авиационного приборостроения Михаилу Борисовичу Игнатьеву, доктору технических наук, профессору-сенатору Морской Академии Польши, члену комиссии Польской Академии наук по проблемам организации и управления Игорю Борисовичу Арефьеву, доктору технических наук, профессору Московского энергетического института (Технический университет) Александру Анатольевичу Емельянову.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Системный анализ и управление». Может быть полезным для студентов других специальностей, связанных с проектированием сложных технических комплексов и разработкой систем управления.

Принятые сокращения

- АИС** — автоматизированная информационная система
АСУ — автоматизированная система управления
АСУП — автоматизированная система управления предприятия
ИАД — интеллектуальный анализ данных
ИДМ — имитационное динамическое моделирование
ИМ — имитационное моделирование
ИС — информационная система
ИУС — информационно-управляющая система
КГИ — коллективная генерация идей
КС-грамматика — контекстно-свободная грамматика
НС-грамматика — грамматика непосредственных составляющих
МАИС — методы активизации интуиции специалистов
ММЯ — метод морфологического ящика
МФПС — методы формализованного представления систем
НВВ — нововведение
НПО — научно-производственное объединение
ОАСУ — отраслевая автоматизированная система управления
ОТП — организационно-технологическая процедура
САУ — система автоматического управления
СМО — система массового обслуживания
СПУ — сетевое планирование и управление
СТК — сложный технический комплекс
ТМО — теория массового обслуживания
УЯП — универсальный язык программирования
ФАЛ — функция алгебры логики
ЭВМ — электронно-вычислительная машина
ЯИМ — язык имитационного моделирования
ЯОН — язык общего назначения

Глава 1

ПОНЯТИЕ О МОДЕЛИРОВАНИИ СИСТЕМ, КЛАССИФИКАЦИИ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- основные особенности проблемы принятия решений;
- примеры определений понятий «модель» и «моделирование»;
- причины возникновения теории систем и необходимость разработки и применения методов их моделирования;
 - принципиальные особенности формального и гуманитарного знания, роль гуманитарного знания как носителя системы ценностей при принятии решений;
 - историю возникновения подходов и методов моделирования систем и процессов;
 - классификации подходов к моделированию систем;
 - основные особенности системно-целевого, логико-лингвистического, морфологического, функционально-технологического (процессного) подходов;
 - принципы и признаки классификации методов моделирования систем и процессов;
 - классификации методов формализованного представления систем;
 - основные особенности методов «мозговой атаки», сценариев, структуризации («дерева целей» и др.), экспертных методов;
 - виды и особенности специальных подходов и методов системного анализа (имитационного динамического моделирования, ситуационного, структурно-лингвистического, когнитивного моделирования, информационного подхода к анализу систем и др.);

уметь

- обосновывать потребность в разработке модели объекта или проблемной ситуации;
- определять класс систем для исследования или проектирования конкретных объектов, процессов и проблемных ситуаций;
- выбирать подход и методы моделирования для конкретной задачи или процесса принятия решения;

владеть

- навыками обоснования класса систем для исследования или проектирования конкретных объектов, процессов и проблемных ситуаций;
 - навыками выбора подхода и методов моделирования для конкретной задачи или процесса принятия решения.
-

Характеризуются понятия «модель», «моделирование», «проблема принятия решений». Для того чтобы пояснить причины, вызвавшие необходи-

мость возникновения различных методов моделирования систем, сферы их применения и принципы выбора для моделирования конкретных систем и процессов, в данной главе приводятся сведения о причинах возникновения теории систем и других междисциплинарных направлений, обосновывается необходимость разработки и применения различных методов моделирования. Приводится обзор подходов к моделированию систем, классификаций методов моделирования систем и процессов. Предлагается классификация моделей.

1.1. Понятие о модели и моделировании

Термин «моделирование» первоначально был введен для исследования проблем, которые не удавалось сразу решить теоретическим или экспериментальным методом:

«Моделирование — исследование физических процессов на моделях. В простейшем случае модель воспроизводит изучаемое явление (оригинал) с сохранением его физической природы и геометрического подобия, а отличается от оригинала лишь тем (размерами, скоростью течения исследуемых явлений и иногда материалом), что приводит к изменению... параметров»¹.

Для реализации идеи моделирования развивалась «теория подобия, изучающая условия подобия физических явлений... опирается на учение о размерности физических величин»². При этом вводили ряд видов подобия: *геометрическое* (подобие геометрических фигур), *механическое* (характеризующее однотипные механические системы или явления, такие как потоки жидкости или газа, упругие системы и т.п.), *тепловое* (для тепловых процессов при одинаковости температурных полей и тепловых потоков), *матричное* (подобие матриц при задании их матрицами линейного преобразования). В последующем были введены термины *физического* (обобщающего механическое, тепловое и т.п. виды подобия) и его разновидностей — *кинематического* и *динамического*; *химического*, *физико-химического* и *математического* подобия.

Основой теории подобия является установление подобия критериев различных физических явлений и изучение с помощью этих критериев свойств самих явлений. Сходства в сходственные моменты времени в сходственных точках пространства значений переменных величин, параметров (которые при некотором принципиальном сходстве устанавливаются для различных видов подобия с учетом их специфики), характеризующих состояние одной системы, пропорциональны соответствующим величинам (параметрам) другой системы. Коэффициент пропорциональности для каждой из величин называется коэффициентом подобия.

Более строго основные положения теории подобия изложены в приложении 1.

Принципы теории подобия полезно использовать в качестве основы теории моделирования и в настоящее время. При этом способы установления

¹ БСЭ. 2-е изд. Т. 28. С. 29.

² Там же. Т. 33. С. 424.

сходства параметров изучаемых явлений и процессов при использовании различных методов моделирования различны.

Например, при применении теоретико-множественных представлений вводятся понятия изоморфизма и гомоморфизма, при использовании логико-лингвистических представлений — сходство предикатов и т.п.

С учетом сказанного полезно рассмотреть развитие определений модели и моделирования.

Наиболее лаконичное определение дает С. Лем¹:

«Моделирование — это подражание Природе, учитывающее немногие ее свойства».

При этом поясняет: «Почему только немногие? Из-за нашего неумения? Нет. Прежде всего потому, что мы должны защититься от избытка информации», добавляя, что возможна и недоступность информации, и поясняя на примерах, что «практика моделирования предполагает учет некоторых переменных и отказ от других» с учетом назначения модели.

Более строго *моделирование* можно определить как замещение одного объекта (оригинала) другим (моделью), фиксацию и изучение свойств модели. Замещение производится с целью упрощения, удешевления, ускорения изучения свойств оригинала. При этом замещение правомерно, если интересующие исследователя характеристики оригинала и модели определяются однотипными подмножествами параметров s_0 , имеющих определенные свойства, количественной мерой которых служит множество характеристик y_0 , и связаны определенными зависимостями с этими параметрами.

Термин «модель» используется в разных смыслах: экземпляр, вариант какого-либо изделия; макет, повторяющий какие-то особенности определенного объекта; наглядные (уменьшенные, увеличенные или в натуральную величину) копии разных объектов — конструкций машин, зданий, сооружений, кристаллов, атомов и молекул и т.п.; модели одежды, фотомодели (девушки и юноши), т.е. то, что служит образцом для художественного воспроизведения, примером для подражания или сравнения и т.д.

В справочнике по кибернетике² модель определяется как «один из важнейших инструментов научного познания, условный образ объекта исследования (или управления)», и поясняется, что «модель конструируется субъектом исследования (“наблюдателем” по Эшби) так, чтобы отобразить характеристики объекта (свойства, взаимосвязи, структурные и функциональные параметры и т.п.), существенные для цели исследования. Поэтому вопрос о качестве такого отображения — адекватность модели объекту — правомерно решать лишь относительно определенной цели». При этом подчеркивается, что наиболее строгое и общее определение модели должно опираться на понятия *гомоморфизма* и *изоморфизма*. Применительно к системным исследованиям Ф. И. Перегудов и Ф. П. Тарасенко кратко определили модель как форму существования знаний, а моделирование — как «неотъемлемый этап всякой целенаправленной деятельности» [13].

¹ Лем С. Сумма технологий. М. : Мир, 1968. С. 255.

² Математика и кибернетика в экономике : словарь-справочник / отв. ред. акад. Н. П. Федоренко. М. : Экономика, 1975. С. 332.

Позднее Ф. П. Тарасенко развивает тезис о том, что «модель — неотъемлемая часть любой деятельности»¹, и, исследуя феномен моделирования, определяет понятие модели вначале через описание *смысла построения и применения моделей*.

«Модель есть определенное (системное) отображение некоторого явления (объекта, события, процесса) в форме, воспринимаемой субъектом и пригодной для использования содержащейся в ней информации в процессе активного взаимодействия субъекта с системой, содержащей данное явление» [16, с. 9].

Затем — представляет модель как «упрощенное целевое отображение оригинала», как «материальный носитель информации»; исследует роль моделирования в деятельности человека, в процессе которого необходимо дать описание всех существенных отношений между компонентами моделирования — моделью, моделируемой сущностью (абстрактной или реальной), моделирующим субъектом, инфраструктурой моделирования, и предлагает еще одно определение модели (вербальную модель):

«Модель есть отображение оригинала: целевое (т.е. предназначенное для обеспечения достижения субъектом определенной цели): абстрактное (мысленное) или реальное (вещественное); упрощенное (огрубленное, приблизительное); имеющее как истинное, так и ложное содержание; значимое лишь в контексте культуры субъекта (ингерентное культуре); имеющее определенную степень адекватности (потенциал успешности достижения цели при использовании данной модели)» [16, с. 12].

В такой интерпретации модель является «носителем информации об оригинале», элементом процесса моделирования, в котором кроме самой модели (носителя информации) существенными частями являются: оригинал (моделируемое явление, источник информации), субъект, которому потребовалась информация об оригинале для достижения своей цели, и инфраструктура, обеспечивающая моделирование.

Ю. А. Шрейдер², рассматривая моделирование как выявление взаимоотношений между *исследователем, моделью и оригиналом*, предлагает в качестве средства отображения этих взаимоотношений *язык*, основанный на *теоретико-множественных и лингвистических* представлениях, который позволяет исследовать гносеологические аспекты отношения «модель — объект», семантику и смысл информации об объекте, содержащейся в модели, *целевые и ценностные* категории процесса моделирования.

С учетом приведенного краткого анализа по аналогии с формой представления определений системы, применяющейся в [1], [15], можно символически отобразить *определение модели как носителя информации об оригинале* для достижения *цели субъекта* в условиях определенной *инфраструктуры*:

$$M_{def} \equiv \langle O, N, Z, IS, L \rangle, \quad (1.1)$$

¹ Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ: наука и искусство решения проблем : учебник. Томск : Изд-во Томского ун-та. 2004.

² Шрейдер Ю. А., Шаров А. А. Системы и модели. М. : Радио и связь, 1982.

где O — оригинал (моделируемое явление, объект, источник информации); N — субъект («наблюдатель» по Эшби), т.е. лицо, которому потребовалась информация об оригинале для достижения своей цели (исследования, принятия решения и т.п.); Z — цель или совокупность целей; IS — инфраструктура, обеспечивающая моделирование, т.е. включающая технологии и условия моделирования: $TECH = \{meth, means, alg, \dots\}$ — совокупность технологий (*meth* — методы, *means* — средства, *alg* — алгоритмы) и $COND = \{\varphi_{ex}, \varphi_{in}\}$ — условия существования модели, т.е. факторы, влияющие на ее создание и функционирование (φ_{ex} — внешние, φ_{in} — внутренние); L — язык для исследования гносеологических аспектов отношения «модель — оригинал».

Можно представить определение модели, раскрыв понятие инфраструктуры IS :

$$M_{def} \equiv \langle O, N, Z, TECH, COND, L \rangle. \quad (1.2)$$

Ф. П. Тарасенко [16, с. 12–15] предлагает также считать видом моделей *системные представления*, поскольку «понятие системы позволяет дать конечное описание бесконечно разнообразной реальности», подчеркивая, что «совокупность структурно связанных объектов как целое обладает качественно новыми (именуемыми *эмерджентными* в статике, или *синергетическими* в динамике) свойствами, которых нет ни у одной части, свойствами, не сводящимися к свойствам частей и не выводящимися из них. При этом, как и любая модель, система изначально неизбежно неполна, является весьма общей моделью, допускающей при необходимости включение в ее состав любых комбинаций остальных понятий, и достижение цели с ее помощью зависит от *адекватности* модели».

Тогда, выбирая (формируя) определения модели в конкретных условиях, можно использовать определения системы, и в частности определение (1.2), подобное определению системы, опирающемуся на системно-целевой подход к исследованию системы, предложенное одним из авторов учебника¹.

Обобщенное определение модели, представленное в формализованном виде (1.1), не учитывало функционирования системы и ее взаимоотношения со средой в процессе функционирования объекта. Чтобы учесть это взаимодействие, предлагаются определения, основанные на идее «черного ящика».

Например, модель можно представить в виде множества величин, описывающих процесс функционирования реальной системы и образующих в общем случае следующие подмножества²: совокупность X — входных воздействий на S $x_i \in X, i = 1 \dots n_x$; совокупность воздействий внешней среды $v_l \in V, l = 1 \dots n_v$; совокупность внутренних (собственных) параметров

¹ Волкова В. Н. Развитие определения системы // Материалы международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении»: сб. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. С. 12–14.

² Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2001.

системы $h_k \in H, k = 1 \dots n_h$; совокупность выходных характеристик системы $y_j \in Y, j = 1 \dots n_y$.

В перечисленных множествах можно выделить управляемые и неуправляемые величины. В общем случае X, V, H, Y — непересекаемые множества, содержат как детерминированные, так и стохастические составляющие. Входные воздействия X и внутренние параметры H являются независимыми (экзогенными) переменными $\bar{X}(t); \bar{V}(t); \bar{H}(t)$. Выходные характеристики — зависимые переменные (эндогенные) $\bar{Y}(t)$.

Процесс функционирования S описывается оператором F_S :

$$\bar{Y}(t) = F_S(\bar{X}, \bar{V}, \bar{H}, t), \quad (1.3)$$

где $\bar{Y}(t)$ — выходная траектория; F_S — закон функционирования S ; F_S может трактоваться как функция, функционал, логические условия, алгоритм, таблица или словесное описание правил.

Алгоритм функционирования A_S — метод получения выходных характеристик $\bar{Y}(t)$ с учетом входных воздействий $\bar{X}(t); \bar{V}(t); \bar{H}(t)$. Очевидно, что один и тот же закон функционирования F_S может быть реализован различными способами, т.е. с помощью множества различных A_S .

Соотношение (1.3) является математическим описанием поведения объекта S моделирования во времени t , отражает его динамические свойства, т.е. (1.3) — это динамическая модель системы S .

Для статических условий математической модели есть отображения X, V, H в Y , т.е.

$$\bar{Y} = f(\bar{X}, \bar{V}, \bar{H}). \quad (1.4)$$

Соотношения (1.3), (1.4) могут быть заданы формулами, таблицами и т.д.

В ряде случаев соотношения могут быть получены через свойства системы в конкретные моменты времени, называемые состояниями.

Состояния системы S характеризуются векторами: $\bar{Z}^l(\bar{z}_1^l, \dots, \bar{z}_k^l)$ и $\bar{Z}^{ll}(\bar{z}_1^{ll}, \dots, \bar{z}_k^{ll})$, где $z_1^l = z_1(t^l) \dots z_k^l = z_k(t^l)$ в момент $t^l \in (t_0, T)$, $z_1^{ll} = z_1(t^{ll}) \dots z_k^{ll} = z_k(t^{ll})$ в момент $t^{ll} \in (t_0, T)$ и т.д. $k = 1, \dots, n_Z$. $Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_k(t)$ — это координаты точки в k -мерном фазовом пространстве. Каждой реализации процесса будет соответствовать некоторая фазовая траектория.

Совокупность всех возможных значений состояний $\{\bar{Z}\}$ называется пространством состояний объекта моделирования Z , причем $z_k \in Z$.

Состояние системы S в интервале времени $t_0 < t \leq T^l$ полностью определяется начальными условиями $\bar{Z}^0 = (z_1^0, \dots, z_k^0)$, где $z_1^0 = z_1(t_0) \dots$, входными $\bar{X}(t)$, внутренними параметрами $\bar{H}(t)$ и воздействиями внешней среды $\bar{V}(t)$, которые имели место за промежуток времени $t^* - t_0$ с помощью двух-векторных уравнений:

$$\bar{Z}(t) = \Phi(\bar{z}^0, \bar{X}, \bar{V}, \bar{h}, t), \quad (1.5)$$

$$\bar{Y}(t) = F(\bar{Z}, t), \quad (1.6)$$

иначе:

$$Y(t) = F(\Phi(\bar{z}^0, \bar{X}, \bar{V}, \bar{h}, t)). \quad (1.7)$$