

Е. Ю. БУТЫРСКИЙ, А. В. МАТВЕЕВ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

Санкт-Петербург
2022

ББК 32.841

T46

УДК 621.37 + 621.391:519.216

Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. – СПб.: Стратегия будущего, 2022. – 733 с.

DOI 10.37468/book_011222

ISBN 978-5-4268-0064-9

Рецензенты

Жабко А.П. – Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории управления Санкт-Петербургского государственного университета;

Чудаков О.Е. – Заслуженный работник высшего профессионального образования Российской Федерации доктор технических наук, профессор, начальник отдела ООО «Пассат».

В монографии рассмотрены основы теории систем и математического моделирования с использованием принципов системного подхода. Большое внимание уделено теоретико-множественным, динамическим, а также агрегативным и комбинированным моделям. На основе теоретико-группового подхода рассматривается обобщение теории сигналов, их характеристики, проводится их классификация и некоторые теоремы. Отдельная глава посвящена математическим моделям взаимодействия сигнала со средой распространения. Рассмотрены также математические модели стохастических систем обработки сигналов и управления, основанные на сплайн-фильтрации, модели искусственного интеллекта и нейронных сетей. Монография может быть полезна для широкого круга специалистов в различных областях знания, занимающихся вопросами математического моделирования в своих исследованиях, а также может быть использована в качестве учебного пособия для проведения как аудиторных, так и самостоятельных теоретических и практических занятий с бакалаврами, магистрами, аспирантами по дисциплине «Теория систем и системный анализ», «Математическое моделирование» и «Оптимальное и субоптимальное оценивание случайных процессов и систем».

ISBN 978-5-4268-0064-9



© Бутырский Е.Ю., 2022

© Матвеев А.В., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ	12
1.1. Исходные понятия и определения	12
1.2. Роль моделирования в процессе научного исследования	18
1.3. Понятие о подобии объектов	27
1.4. Математическое подобие объектов	30
1.5. Основные принципы и этапы построения моделей	33
1.6. Процесс построения модели	39
1.7. Соотношения между моделью и оригиналом. Адекватность модели оригиналу	42
1.8. Процесс объединения моделей	49
1.9. Классификация моделей	55
1.10. Построение концептуальной модели	60
1.11. Подготовка исходных данных моделирования	65
1.12. Математические схемы моделирования	68
2. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	73
2.1. Три этапа математизации знаний	73
2.2. Основные понятия математического моделирования	75
2.3. Обобщенная математическая модель	82
2.4. Требования к математической модели и методы ее получения	84
2.5. Интерпретации в математическом моделировании	93
2.6. Виды и уровни интерпретаций	94
2.7. Методы разработки математических моделей сложных объектов	96
2.8. Классификация математических моделей.	98
2.9. Этапы построения математической модели	107
3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ.....	109
3.1. Модель и система	109
3.2. Классификация систем	129
3.3. Закономерности систем	137
3.4. Принципы существования сложных систем.....	145
3.5. Подходы к построению теории систем	158
3.6. Системный изоморфизм и гомоморфизм	160
4. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ СИСТЕМ.....	162
4.1. Количественные методы описания систем.....	162
4.2. Моделирование систем.....	168
4.3. Системно-структурное моделирование	177
4.4. Ситуационное моделирование и кибернетическое моделирование.....	180
4.6. Имитационное моделирование	190
4.7. Комбинированный подход	207

5. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ.....	212
5.1. Системные направления исследования сложных объектов	212
5.2. Системный подход. Принципы системного подхода.....	215
5.3. Системный подход к моделированию технических объектов	220
5.4. Основы системного анализа.	228
5.5. Принципы системного анализа	237
5.6. Структура системного анализа.....	240
5.7. Синергетический и гомеостатический подходы	244
6. МЕТАМОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА	252
6.1. Триада «субъект-объект-модель»	252
6.2. Принципы модельной деятельности эксперта	259
6.3. Системный элемент как объект моделирования	269
6.4. Целенаправленность системного элемента.....	270
6.5. Целостность системного элемента.....	271
6.6. Метод концептуального метамоделирования.....	273
6.7. Линейная непрерывная математическая модель элемента.....	278
7. ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ.....	282
7.1. Подходы к построению и задачи общей теории систем.....	286
7.2. Математические основы общей теории систем.....	288
7.3. Теоретико-множественные понятия ОТС	298
7.4. Общие временные и динамические системы.....	301
7.5. Вспомогательные функции.....	308
7.6. Классы временных систем	311
7.7. Причинность. Существование причинных реакций	316
7.8. Общая теория реализации систем	323
7.9. Каноническое представление динамической системы и характеристика состояний.....	326
7.10. Конструктивные основы представлений в пространстве состояний.....	332
7.11. Отношения эквивалентности и динамические системы	335
7.12. Коммутативная диаграмма вспомогательных функций	339
8. ДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ	344
8.1. Основные понятия динамического описания систем	344
8.2. Операторы переходов и выходов детерминированной системы	346
8.3. Детерминированные системы без последействия	350
8.4. Детерминированные системы с последействием	352
8.5. Стохастические системы.....	353
8.6. Общие сведения о непрерывно-дискретных системах	354
8.7. Непрерывно-дискретные системы и теория систем.....	358
8.8. Модели непрерывно-дискретных систем	361
8.9. Реактивность в динамических системах	373
8.10. Формально-технологические модели в общей теории систем.....	377
9. АГРЕГАТИВНОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ.....	387
9.1. Понятие агрегата в теории систем	387
9.2. Операторы выходов и переходов агрегата.....	391
9.3. Представление агрегата в виде случайного процесса.....	395

9.4. Кусочно-марковский агрегат	398
9.5. Кусочно-непрерывные агрегаты.....	399
9.6. Кусочно-линейные агрегаты	403
9.7. Сопряжение агрегатов	407
9.8. Описание вычислительной системы в виде кусочно-линейного агрегата	411
9.9. Метод управляющих последовательностей.....	418
10. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	421
10.1. Фундаментальные законы природы	421
10.2. Вариационные принципы.....	427
10.3. Применение аналогий при построении моделей	429
10.4. Иерархический подход к получению моделей.....	432
10.5. Нелинейные математические модели	436
10.6. Модели, получаемые из фундаментальных законов природы	439
10.7. Вариационные принципы и математические модели.....	445
10.8. Пример иерархии моделей	455
11. ЖЕСТКИЕ И МЯГКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ.....	461
11.1. Модель войны или сражения	461
11.2. Оптимизация как путь к катастрофе	463
11.3. Жесткие модели и ошибочные предсказания.....	469
11.4. Опасность многоступенчатого управления	472
11.5. Математические модели перестройки	474
12. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ НА ГРУППАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ	476
12.1. Базовые принципы, лежащие в основе современной науки	476
12.2. Гидроакустические сигналы и определение группы	480
12.3. Преобразования сигналов, обусловленных движением источника и приемника сигналов	497
12.4. Понятие сложного сигнала на группе преобразований.....	511
13. ФУНКЦИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СИГНАЛОВ НА ГРУППЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ	518
13.1. ФН, заданная на двухпараметрической группе преобразований	518
13.2. Основные свойства узкополосной ФНГ	525
13.3. Взвешенная ШФНГ	530
13.4. Связь между ШФН и биспектром.....	532
14. МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА НА СИГНАЛ	535
14.1. Распространение импульсов в неоднородном океане	535
14.2. Статистика фазы и интенсивности	540
14.3. Теоретико-групповые модели взаимодействия сигнала и среды	542
15. СПЛАЙНЫ В ЗАДАЧЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ	547
15.1. Сплайны в теории аппроксимации	547
15.2. Сплайн-фильтрация для стохастической системы	549
15.3. Устойчивость фильтра Калмана при применении сплайнов	560
15.4. Субоптимальное управление в стохастических системах	563
15.5. Перспективы применения сплайн-фильтрации.....	572

16. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЕКТА.	
ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ.....	574
16.1. Введение в нейронные сети. Свойства и классификация	574
16.2. Модель нейрона. Архитектура ИНС.....	584
16.3. Обучение нейронных сетей	602
16.4. Нейросети прямого распространения	607
16.5. Нейросети обратного распространения ошибки	609
16.6. Нейросети ассоциативной памяти	620
16.7. Рекуррентные нейронные сети.....	640
16.8. Сети встречного распространения. Самоорганизующиеся нейронные сети Кохонена.....	643
16.9. Сеть адаптивной резонансной теории	655
16.10. Сверточные нейронные сети и глубокие нейронные сети	671
16.11. Нейрокомпьютеры.....	682
16.12. Использование нейросетей в управлении	686
17. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	692
17.1. Классификация методов и моделей прогнозирования.....	692
17.2. Основные понятия теории временных рядов.....	696
17.3. Компоненты временных рядов.....	702
17.4. Простейший прогноз на основе экстраполяции	705
17.5. Прогнозирование тренда временного ряда	708
17.6. Оценка точности и надежности прогнозов	709
17.7. Модели авторегрессии и скользящего среднего	712
17.8. Прогнозирование на основе моделей авторегрессии –скользящего среднего	715
17.9. Прогнозирование на основе нейронных сетей	717
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	722
ЛИТЕРАТУРА	725

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АМО	абстрактный математический объект
АПВ	апостериорная плотность вероятности
АРТ	адаптивная резонансная теория
АСУ	автоматизированные системы управления
ВПГ	взвешенное преобразование Гильберта
ВШФН	взвешенная широкополосная функция неопределенности
ВШФНГ	взаимная широкополосная функция неопределенности на группе
ВХО	временные характеристики обнаружения
ГАС	гидроакустическая станция
ГП	гильбертово пространство
ДС	динамическая система
ИМ	имитационное моделирование
ИНС	искусственная нейронная сеть
КМ	концептуальная модель
КММ	концептуальная мета модель
КМО	концептуальный математический объект
КФ	корреляционная функция
ММ	математическая модель
ММВ	множество моментов времени
НС	нейронная сеть
НСДС	нелинейная стохастическая динамическая система
ОВС	общая временная система
ОГП	однопараметрическая группа преобразований
ОТС	общая теория систем
ПВК	принцип ведущей компоненты
ПМУ	принцип максимального упрощения
СА	системный анализ
САУ	система автоматического управления
СДУ	стохастическое дифференциальное уравнение
СКО	среднеквадратическая ошибка
СПС	сложная производственная система
СС	сложная система
СК	системно-комплексный
ФКБ	фильтр Калмана-Бьюси
ФНГ	функция неопределенности на группе
ФНС	функция неопределенности сигнала
ФНЧ	фильтр низких частот
ФПК	Фоккера-Планка-Колмогорова
ШПФН	широкополосная функция неопределенности
ШПС	шумоподобный сигнал
ШПФНГ	широкополосная функция неопределенности сигнала на группе
ШС	широкополосный сигнал
ЦАП	цифро-аналоговый преобразователь
ЦОС	цифровая обработка сигналов
ФН	функция неопределенности
ЯСУ	язык ситуационного управления

ВВЕДЕНИЕ

Чем дальше развивается цивилизация общества, тем сложнее становятся общественные отношения и создаваемые обществом технические, организационные, информационные, энергетические, транспортные, производственные, военные и другие системы, составляющие суть данной цивилизации. Создание и использование этих систем требует специального теоретического осмысления общих закономерностей построения и функционирования систем любой природы. Другими словами, обществу нужна системная философия, общая теория и множество специальных теорий анализа и синтеза сложных систем. Людей, практически занимающихся проектированием сложных систем, уже не устраивает вербальная философия на уровне рассуждений об общих закономерностях развития природы и общества. Современная наука ищет способы и методы строгой формализации этих рассуждений на основе последних достижений математики, логики, кибернетики, информатики и других точных наук.

В настоящее время лишь немногие ученые могут назвать себя математиками, или физиками, или биологами, не прибавляя к этому дальнейшего ограничения. Ученый становится теперь топологом, или акустиком, или специалистом по жесткокрылым.

Приведенная выше фраза Н. Винера, хотя и была высказана более полувека назад, не потеряла своей актуальности и в наши дни. Более того, ситуация усугубилась многократно. Концептуальный каркас, обслуживающий науку на протяжении многих лет, все чаще и чаще начинает не срабатывать по той простой причине, что он оказывается неадекватным современным задачам и даже самой их постановке. А.И. Уемов, ссылаясь на источники XIX века, пишет, что Лейбниц был последним человеком, знавшим «все на свете» [50]. Действительно, еще в XVIII в объем знаний был таков, что ученые того времени могли знать несколько языков, проводить опыты по физике, химии, делали открытия в математике, а в дополнение к этому занимались поэзией. В настоящее же время, знания человека о природе разрослись до такой степени, что не представляется возможным охватить не только весь их объем, но даже и отдельные его области как математика, физика, биология и т.п. Ученые все глубже углубляются в изучение своих областей, часто не отдавая себе отчета о полезности этих знаний. С другой стороны, для современного ученого необходимо получение сведений из других отраслей науки. Появление таких дисциплин, как биофизика, физическая химия, биохимия, бионика, математическая лингвистика, требует сочетания сведений из различных областей. Таким образом, налицо реальное противоречие в развитии науки [13, 15, 22, 49, 172].

Еще в первой половине XX века масштабы и характер воздействия человека на природу были таковы, что между возможностями, которые заключали в себе эти условия, и их реальным использованием существовал внушительный

интервал. Однако сейчас положение изменилось самым решительным образом. Мощь природы не только перестала казаться бесконечной, но во многих отношениях уже сейчас требует от общества специальных усилий, направленных на ее поддержание, и даже восстановление. Кроме того, сознательно регулируемым предметом деятельности становится сама деятельность человека: иначе говоря, резко усиливается воздействие человека на всю систему социальных отношений, а вместе с тем возрастает социальное знание поставляющего инструментальные и иные средства для такого воздействия. Эти причины явились предпосылками возникновения общей теории систем, которая оформилась, как самостоятельная дисциплина в 40х-50х годах XX века и призвана помочь человечеству в преодолении недостатков узкой специализации, усилении междисциплинарных связей, развитии диалектического видения мира, системного мышления. Системный анализ и системный подход со временем стали обобщающей методологией исследования сложных технических и социальных систем. Формальным выражением системного анализа и подхода является общая теория систем.

Системный анализ предоставляет инструментарий, называемый системной парадигмой, без применения которого, исследование сложных объектов как естественного, так и искусственного происхождения усложняется многократно.

Общая теория систем как формальное представление системных представлений неразрывно связана с математикой и математическим моделированием. Присущая математике идеология восхождения от частного к общему, от конкретных представлений к абстракциям сохраняет свою направленность и при построении общей теории систем. И в этом смысле ее можно рассматривать как «математическую философию». С другой стороны, и математика, и общая теория систем, и философия носят междисциплинарный и более того наддисциплинарный характер. Поэтому в настоящей книге общая теория систем и математическое моделирование рассматриваются неразрывно.

В развитии различных областей человеческой деятельности математика оказывала и оказывает существенное влияние. Ее роль складывалась исторически и зависела от двух факторов: степени развития математических понятий и математического аппарата, а также степени зрелости знания об изучаемом объекте. Математические понятия в процессе своего возникновения впитывают в себя существенные свойства предметов и явлений и их отношений в виде существующих математических законов и структур. В результате свойства чувственно-конкретных предметов и явлений концентрированно отражаются в конкретных математических понятиях и структурах.

Дальнейшее развитие математических понятий и теорий происходит на базе уже существующих математических объектов. Этот процесс характеризуется многократным абстрагированием, идеализацией и обобщением. Математические объекты и теории не только обретают чувственно абстрактность, но и уни-

версальную всеобщность, и широкую применимость. В процессе применения математики осуществляется восхождение от абстрактного к конкретному.

Структуры «мира математического» успешно применяются для анализа «мира экспериментального», ибо первый является идеально-абстрактной, обобщенной и логически более совершенной картиной второго. Возникновение новых математических структур и нового математического аппарата (например, аппарата математической физики, в связи с необходимостью глубокого изучения различных физических, гидродинамических, механических и других процессов и явлений) сопровождается проникновением нашего сознания в более глубокие структурные уровни, материи.

Современное развитие науки характеризуется потребностью изучения всевозможных сложных процессов и явлений – физических, химических, биологических, экономических, социальных и других. Происходит значительное увеличение темпов математизации и расширение ее области действия. Тезис «без математики нет науки» становится все более актуальным, особенно после появления ЭВМ. В настоящее время теории математики широко применяются в науках, казалось бы, совершенно от нее далеких – лингвистике, юриспруденции, психологии, медицине и т.д. Это вызвано естественным процессом развития научного знания, который потребовал привлечения нового и более совершенного математического аппарата, проявлением новых разделов математики, а также кибернетики, вычислительной техники и так далее, что значительно увеличило возможности ее применения. Более точное математическое описание процессов и явлений, приводит к созданию более сложных математических моделей, которые не удастся анализировать аналитическими методами в явном виде. Для решения таких задач приходится прибегать к вычислительным алгоритмам, использовать какие-либо бесконечные процессы, сходящиеся к конечному результату. Приближенное решение задачи получается при выполнении определенного числа шагов. ЭВМ обеспечивает интенсивный процесс математизации не только естественных и технических, но также общественных и гуманитарных наук. Математическое моделирование и ЭВМ получают широкое распространение во всех областях человеческой деятельности. При этом возрастает роль методологических основ теории математического моделирования и теории систем.

Таким образом, растущая роль научного познания в современной общественной жизни обуславливает превращение самой науки в предмет широких и многосторонних исследований, конечной целью, которых является обнаружение, общих закономерностей функционирования и развития науки, построение моделей этого развития. Без привлечения методов математического моделирования и общей теории систем достижение этой цели становится просто нереальным.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Исходные понятия и определения

Растущий интерес философии и методологии познания к теме моделирования был вызван тем значением, которое метод моделирования получил в современной науке, и в особенности в физике, химии, биологии, кибернетике, не говоря уже о многих технических науках.

Однако моделирование как специфическое средство и форма научного познания не является изобретением XIX или XX века. Достаточно указать на представления Демокрита и Эпикура об атомах, их форме, и способах соединения, об атомных вихрях и ливнях, объяснения физических свойств различных веществ с помощью представления о круглых и гладких или крючковатых частицах, сцепленных между собой. Эти представления являются прообразами современных моделей, отражающих ядерно-электронное строение атома вещества. В настоящее время нельзя назвать область человеческой деятельности, в которой в той или иной степени не использовались бы методы моделирования.

Остановимся на философских аспектах моделирования, а точнее общей теории моделирования. Методологическая основа моделирования заключается в следующем. Все то, на что направлена человеческая деятельность, называется *объектом* (лат. *objectum* – предмет).

Выработка методологии направлена на упорядочение получения и обработки информации об объектах, которые существуют вне нашего сознания и взаимодействуют между собой и внешней средой.

Моделированием называется замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели. Таким образом, моделирование может быть определено как представление объекта моделью для получения информации об этом объекте путем проведения экспериментов с его моделью. В основе лежит мысль, что модель средство познания, главный ее признак – отображение. Теория замещения одних объектов (оригиналов) другими объектами (моделями) и исследование свойств объектов на их моделях называется теорией моделирования [35].

Научное исследование есть процесс познания определенной предметной области, объекта или явления с определенной целью.

Процесс исследования осуществляется субъектом и заключается в наблюдении свойств объектов и выполнении действий с целью выявления и оценки, важных с точки зрения субъекта-исследователя закономерных отношений между показателями данных свойств.

Моделирование является одним из наиболее эффективных методов исследования. Оно заключается в построении и изучении специальных объектов (моделей), свойства которых подобны наиболее важным, с точки зрения исследователя, свойствам исследуемых объектов (оригиналов). В широком смысле моделирование представляет собой научную дисциплину, в которой изучаются методы построения и использования моделей для познания реального мира. Всякая научная дисциплина, как правило, основывается на исходных понятиях и определениях, позволяющих однозначно понимать язык, применяемый для изложения этой дисциплины. Моделирование, как научная дисциплина, также содержит ряд специальных понятий, которые составляют начало методологических основ этой науки. (Концептуальная часть науки).

Философскую концепцию моделирования составляют теория отражения и теория познания, а формально-методическую основу моделирования составляют теория подобия, теория эксперимента, математическая статистика, математическая логика и научные дисциплины, изучающие те предметные области, которые подлежат исследованию методами моделирования.

Изучение методологических основ моделирования целесообразно начать с рассмотрения философских понятий теории отражения реальной действительности в сознании некоторого субъекта. Это должно обеспечить нам однозначное понимание положений излагаемых далее прикладных теорий. Приведем определения наиболее существенных для моделирования философских понятий. Некоторыми из них мы уже пользовались без определения.

Определение 1.1. *Предметная область – это мысленно ограниченная область реальной действительности или область идеальных представлений, подлежащая описанию (моделированию) и исследованию.*

Предметная область состоит из объектов, различаемых по каким-либо признакам (свойствам) и находящихся в определенных отношениях между собой, или взаимодействующих каким-либо образом.

Определение 1.2. *Объект – это все что мы различаем как нечто целое, реально существующее, или возникающее в нашем сознании и обладающее свойствами, значения которых позволяют нам однозначно распознавать это нечто.*

Объект, на котором сосредоточивается внимание субъекта с целью исследования, называется **объектом исследования**.

Объекты воспринимаются и различаются субъектами лишь постольку, поскольку они обладают характерными свойствами или способностями. «Свойство» и «способность» также являются весьма важными понятиями в рассуждениях человека.

Определение 1.3. *Свойством называется характерная особенность объекта, которая может быть замечена и оценена субъектом, например, вес, цвет, длина, плотность и тому подобное.*

Для оценки исследуемого свойства объекта субъект устанавливает определенную меру, называемую *показателем свойства*. Для каждого показателя определяется множество значений (уровней, или градаций меры свойства), которые присваиваются ему в результате оценивания свойства. Следовательно, свойство объекта является реальностью, а показатель – субъективной мерой этой реальности, если, конечно, речь идет о реальных объектах.

Показатели всеобщих свойств материальных объектов, таких как пространство и время называются *основными показателями*. Подавляющее большинство показателей других свойств выражаются через показатели этих основных свойств. Поэтому единицы измерения основных показателей служат основой для построения стандартной системы единиц измерения физических величин и называются *основными единицами измерения*.

Выражение показателя некоторого свойства через основные единицы измерения, принятые в определенной стандартной системе единиц (мер), называется *размерностью* данного показателя.

С точки зрения субъекта свойства делятся на внутренние (собственные) свойства объектов, показатели этих свойств называются *параметрами*, и внешние, представляющие собой свойства среды, связанные некоторыми отношениями с параметрами данного объекта.

Определение 1.4. Показатели свойств внешней среды, влияющих на параметры исследуемого объекта, называются факторами.

Свойства объектов выявляются только при их взаимодействии, или при сопоставлении объектов друг с другом. Сопоставление (комбинация) значений показателей, наблюдаемых свойств определенных объектов называется *отношением*. Говорят, что отношение *истинно*, если оно подтверждается практическим экспериментом, или логическим выводом. Отношение считается *ложным*, если оно опровергается практической проверкой, или логическим выводом. Иначе отношение считается *неопределенным*. Понятия «истинно», «ложно», «неопределенно» являются логическими значениями любого отношения, результатами субъективной его оценки.

Определение 1.5. Отношение называется функциональным (функцией F), если оно представляет собой однозначное отображение множества X значений показателя некоторого свойства в множество Y значений показателя того же, или иного свойства.

Формально это записывают как:

$$F : X \rightarrow Y, \text{ или как } F(X) = Y, \text{ или } F : X \times Y$$

где « \times » декартово произведение множеств.

Взаимодействие объектов определяется по результатам изменения значений показателей наблюдаемых свойств этих объектов. Поэтому каждому действию, или взаимодействию, мы присваиваем определенный результат. Это может быть значение, или определенная комбинация значений, показателей свойств взаимодействующих объектов. Действия над значениями показателей

свойств объектов, выполняемые по определенным правилам и приводящие к предполагаемому результату, называются *операцией* или *процедурой*.

Значения показателей свойств объектов обозначаются символами из некоторого заранее определенного множества A , называемого *алфавитом*.

Множество объектов, взаимосвязанных между собой определенными отношениями, и выполняющих определенную общую для них целевую функцию или имеющих общее предназначение, называется *системой*.

Определение 1.6. Система, состоящая из алфавита A , строго определенных множеств отношений (G), операций (Q) и предназначенная для символического описания объектов и систем определенного класса, называется *формальной системой*.

Такие системы используются в качестве языков математического моделирования.

Определение 1.7. Способность, есть готовность объекта проявлять определенные свойства в определенных условиях. И наоборот, способность объекта вести себя определенным образом квалифицируется как его свойство.

Например, забегая вперед, отметим, что одним из свойств сознания человека является способность применять ранее накопленные знания для решения возникающих логических проблем. Эта способность называется *интеллектом*.

Энергия является одним из свойств материи, в силу, которого все материальные объекты совершают движение в пространстве и времени, находясь в энергетическом взаимодействии и пространственно-временном отношении.

Пространство и время также являются всеобщими свойствами материи. Многочисленные эксперименты подтверждают, что все материальные объекты существуют не иначе как в пространстве и во времени. Как известно, значения показателей пространства и времени входят в состав основных единиц измерения всех физических свойств объектов.

Так как все свойства объектов изменяются во времени, то любой набор значений показателей этих свойств относится к определенному значению показателя времени (к моменту времени). Это отношение называется *состоянием* объекта.

Значения показателей свойств меняются с течением времени. В результате этого происходит смена состояний объектов.

Определение 1.8. Акт смены состояний объекта, отнесенный к определенному промежутку времени, называется *событием*, а последовательность взаимосвязанных событий, происходящих на некотором интервале времени, называется *процессом*.

Важным всеобщим свойством материи является способность материальных объектов сохранять вещественные и энергетические результаты (следы) взаимодействия материальных объектов. В философии эта способность называется *отражением*. Высшая форма отражения проявляется в биологических систе-

мах, как способность чувственного восприятия окружающей среды, сохранения результатов восприятия и использования их для управления своим поведением.

Определение 1.9. *Часть материально-энергетической системы, предназначенная для восприятия и хранения результатов отражения, с целью воспроизведения и использования их в интересах системы в целом, называется **памятью**.*

Определение 1.10. *Результаты отражения объектов внешнего мира и внутренних ощущений в памяти человека называются **образами**.*

Как правило, чувственные органы человека воспринимают не полный образ наблюдаемого объекта, а только те его свойства, которые данный человек считает наиболее существенными по каким-то причинам. Человек способен присваивать образам символические **имена** из некоторого языка и связывать эти имена определенными логическими (мысленными) отношениями.

*Сформированная в памяти человека логическая система имен (идентификаторов образов) называется **понятием**.*

С другой стороны, понятие можно определить и как некоторую языковую конструкцию, имеющую определенный смысл, т.е. образное содержание. Система понятий и логических отношений между ними, отражающая какую-нибудь сторону реальной действительности, называется **знаниями**. Каждый субъект обладает памятью и механизмом целенаправленной манипуляции понятиями и знаниями. В целом эта система называется **сознанием**.

Процесс целенаправленной манипуляции знаниями в сознании субъекта называется **мышлением**.

Сознание субъекта присваивает каждому понятию, как и образу, символическое имя, определенное на языке, которым владеет данный субъект. Из имен понятий и образов формируется текст, представляющий собой знания субъекта о некоторой предметной области, закодированные на данном языке. Наглядная схема определений, связанных с понятием предметной области, представлена на рис. 1.1 [175]

Таким образом, основным элементом любого знания является понятие, представленное на определенном языке.

Понятие в процессе приобретения знаний и в процессе мышления субъекта имеет три значения:

- **семантическое**, отражающее значения свойств объектов, замечаемых субъектом;
- **синтаксическое**, связывающее понятия в выражения, предложения и тексты, имеющие определенный семантический смысл и поэтому представляющие знания субъекта о предметной области на определенном языке;
- **символическое**, представляющее понятия, как слова и формальные выражения, составленное из символов алфавита языка данного субъекта.

Выражения, предложения и фразы со своими значениями образуются при помощи грамматики языка, используемого субъектом для представления знаний.

Определение 1.11. *Грамматика представляет собой систему правил, определяющих логические отношения между понятиями с учетом их семантических, синтаксических и символических значений.*

Следовательно, приобретение знаний о предметной области есть процесс формирования в сознании субъекта понятий о существенных свойствах объектов предметной области и отношений между понятиями в виде текста, состоящего из выражений, предложений и фраз, обладающих соответствующими семантическими, синтаксическими, и символическими значениями.

Анализ данного процесса позволяет выяснить механизмы мышления субъекта и факторы, влияющие на правдоподобие (достоверность) знаний субъекта о предметной области, а также найти способы построения правдоподобных моделей предметных областей.

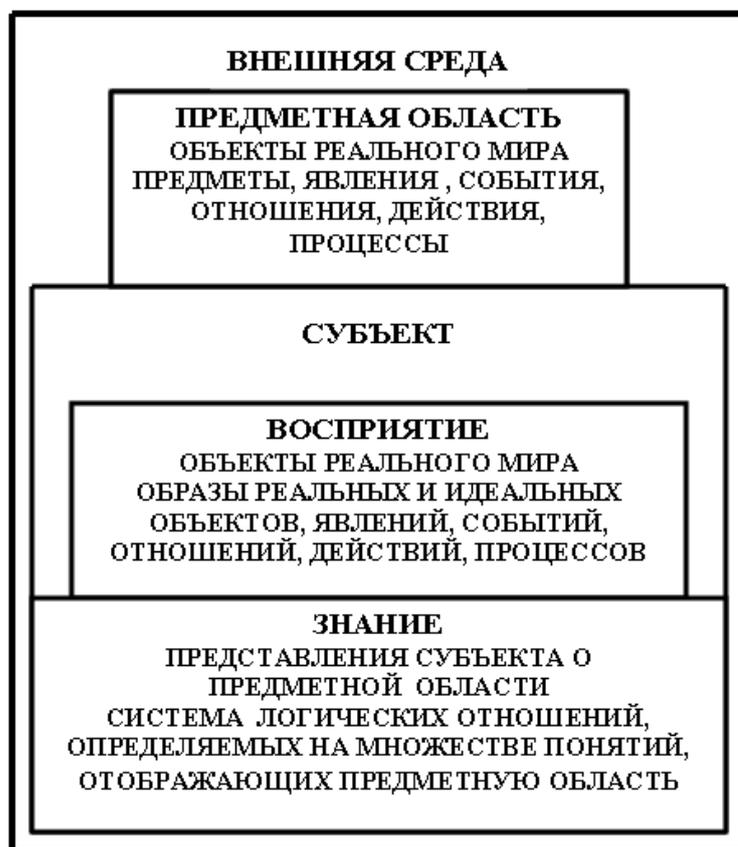


Рис. 1.1. Схема определения понятия «знания о предметной области».

Сущность процесса исследования заключается в отыскании достоверных ответов на поставленные вопросы. Общеизвестно, что какой вопрос, такой и ответ. Научные исследования предполагают отыскание ответов на корректно поставленные вопросы. В таких вопросах, как правило, требуется выбрать одно из возможных (альтернативных) решений некоторой проблемы (задачи) по определенным условиям.

Определение 1.12. *Условие, по которому осуществляется выбор искомого решения, называется критерием.*

Как правило, критерий формулируется в виде некоторого отношения на множестве значений определенного показателя, который будем называть *аргументом критерия*.

1.2. Роль моделирования в процессе научного исследования

В развитии различных областей человеческой деятельности математика оказывала и оказывает существенное влияние. Ее роль складывалась исторически и зависела от двух факторов: степени развития математических понятий и математического аппарата, а также степени зрелости знания об изучаемом объекте. Математические понятия в процессе своего возникновения как бы впитывают в себя существенные свойства предметов и явлений и их отношений в виде существующих математических законов и структур. В результате свойства чувственно-конкретных предметов и явлений концентрированно отражаются в конкретных математических понятиях и структурах.

Дальнейшее развитие математических понятий и теорий происходит на базе уже существующих математических объектов. Этот процесс характеризуется многократным абстрагированием, идеализацией и обобщением. Математические объекты и теории не только обретают абстрактность, но и универсальную всеобщность, и широкую применимость. В процессе применения математики осуществляется восхождение от *абстрактного к конкретному*.

Структуры «мира математического» успешно применяются для анализа «мира экспериментального», ибо первый является идеально-абстрактной, обобщенной и логически более совершенной картиной второго. Возникновение новых математических структур и нового математического аппарата сопровождается проникновением нашего сознания в более глубокие структурные уровни, материи. Это и дало Г. Вейлю основание заметить, что «развитие математики до известной степени дублируется в физике переходом от классической к квантовой механике».

Современное развитие науки характеризуется потребностью сложного изучения всевозможных сложных процессов и явлений – физических, химических, биологических, экономических, социальных и других. Происходит значительное увеличение темпов математизации и расширение ее области действия. Теории математики широко применяются в других науках, казалось бы, совершенно от нее далеких – лингвистике, юриспруденции. Это вызвано естественным процессом развития научного знания, который потребовал привлечения нового и более совершенного математического аппарата, проявлением новых разделов математики, а также кибернетики, вычислительной техники и так далее, что

значительно увеличило возможности ее применения. Более точное математическое описание процессов и явлений, вызванное потребностями современной науки, приводит к появлению сложных систем интегральных, дифференциальных, интегральных, трансцендентных уравнений и неравенств, которые не удается решить аналитическими методами в явном виде.

Для решения таких задач приходится прибегать к вычислительным алгоритмам, использовать какие-либо бесконечные процессы, сходящиеся к конечному результату. Приближенное решение задачи получается при выполнении определенного числа шагов.

Развитие ЭВМ стимулировало более интенсивное развитие вычислительных методов, создало предпосылки решения сложных задач науки, техники, экономики. Широкое применение при решении таких задач получили методы прикладной математики и математического моделирования.

В настоящее время прикладная математика и ЭВМ являются одним из определяющих факторов научно-технического прогресса. Они способствуют ускорению развития ведущих отраслей народного хозяйства, открывают принципиально новые возможности моделирования и проектирования сложных систем с выбором оптимальных параметров технологических процессов.

Растущий интерес философии и методологии познания к теме моделирования был вызван тем значением, которое метод математического моделирования получил в современной науке, и в особенности в физике, химии, биологии, кибернетике, общественных и гуманитарных науках, не говоря уже о многих технических науках.

В настоящее время нельзя назвать область человеческой деятельности, в которой в той или иной степени не использовались бы методы моделирования. В научных исследованиях большую роль играют гипотезы, то есть определенные предсказания, основывающиеся на небольшом количестве опытных данных, наблюдений, догадок. Быстрая и полная проверка гипотез может быть проведена в ходе специально поставленного эксперимента. При формулировании и проверки правильности гипотез большое значение в качестве метода суждений имеет аналогия.

Аналогией называют суждение о каком-либо частном сходстве двух объектов, причем такое сходство может быть существенным и несущественным.

Необходимо отметить, что понятия существенности и несущественности сходства или различия объектов условны и относительны. Существенность сходства зависит от уровня абстрагирования и в общем случае определяется конечной целью проводимого исследования. Современная научная гипотеза создается, как правило, по аналогии с проверенными на практике научными положениями.

Таким образом, аналогия связывает гипотезу с экспериментом.

Гипотезы и аналогии, отражающие реальный, объективно существующий мир, должны обладать наглядностью или сводиться к удобным для исследования логическим схемам. Такие логические схемы, упрощающие рассуждения и логические построения или позволяющие проводить эксперименты, уточняющие природу явлений, называются моделями. Другими словами модель – это объект заместитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала.

Между моделированием и получением количественного или качественного результата математическими методами существует глубокое различие. Применение математики становится возможным тогда, когда становится ясно, что и с какой целью определять, оценивать, измерять, что и как обрабатывать математическими методами. Модель для этих задач не служит.

Математическое моделирование – это не приложение математического инструмента к объекту, не решение конкретных задач математическими средствами. Это построение формальными методами и средствами абстрактного объекта изофункционального исследуемому объекту для последующего приложения математических методов количественного и качественного анализа.

В то же время, использование в моделировании математики в качестве языка (метатеории) придает полученным выводам доказательную силу. Деятельность по построению моделей не принадлежит математике и выполняется (должна выполняться) не математиками, а специалистами в конкретной области знания.

Для построения модели системы нужны те содержательные эмпирические представления, те описательные науки, которые предшествуют появлению формализованных наук. Эти описания не входят в виде составных частей в формализованную науку, а лишь облегчают процесс формализации, обогащают эвристические возможности формализации.

Определяя *гносеологическую роль теории моделирования*, т.е. ее значение в процессе познания, необходимо, прежде всего, отвлечься от имеющегося в науке и технике многообразия моделей и выделить то общее, что присуще моделям различных по своей природе объектов реального мира. Это общее заключается в наличии некоторой структуры (статической или динамической, материальной или мысленной), которая подобна структуре данного объекта.

В процессе изучения модель выступает в роли относительно самостоятельного квазиобъекта, позволяющего получить при исследовании некоторые знания о самом объекте.

Если результаты моделирования подтверждаются и могут служить основой для прогнозирования процессов, протекающих в исследуемых объектах, то го-

ворят, что модель адекватна объекту. При этом адекватность модели зависит от цели моделирования и критериев.

Обобщенно моделирование можно определить как метод опосредованного познания, при котором изучаемый объект-оригинал находится в некоем соответствии с другим объектом-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.

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

2. Моделирование, заключающееся в построении некоторой системы-модели (второй системы), связанной определенными отношениями 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.

Следует отметить, что с точки зрения философии моделирование – эффективное средство познания природы.

Процесс моделирования предполагает наличие:

- *объекта исследования;*
- *исследователя, перед которым поставлена конкретная задача;*
- *модели, создаваемой для получения информации об объекте и необходимой для решения поставленной задачи.*

По отношению к модели исследователь является, по сути дела, экспериментатором, только в данном случае эксперимент проводится не с реальным объектом, а с его моделью. Надо иметь в виду, что любой эксперимент может иметь существенное значение в конкретной области науки только при специальной его обработке и обобщении. Единичный эксперимент никогда не может быть решающим для подтверждения гипотезы, проверки теории.

Следует помнить о том, что критерием истины являются опыт, практика, экспериментальное исследование.

Методология научного подхода к исследованию любого явления состоит в формировании, основанных на опыте и интуиции абстрактных логических представлений и моделей, адекватность и целесообразность которых проверяется практикой.

Роль моделирования в социальном и техническом прогрессе человечества непрерывно возрастает.

Ф. Энгельс подчеркивал в книге «Анти-Дюринг»: «чтобы познавать отдельные стороны или частности общей картины мировых явлений мы вынуждены вырывать их из их естественной или исторической связи и исследовать каждую в отдельности по её свойствам, по её особым причинам и следствиям и т.д.». Альберту Эйнштейну принадлежат слова: «Не существует эмпирического подхода без чисто умозрительных понятий и систем, и не существует систем чистого мышления, при более близком изучении, которых не обнаруживался бы эмпирический материал, на которых они строятся».

Целью исследования обычно является определение значений параметров исследуемого объекта, удовлетворяющих определенному критерию. Это означает, что в процессе исследования необходимо изменять значения параметров исследуемого объекта и таким образом измерять значения показателя, служащего аргументом критерия.

Процесс исследования заканчивается, когда исследователь находит совокупность значений параметров объекта, удовлетворяющую заданному критерию с заданной достоверностью. Проведение таких исследований называется *экспериментом*.

На практике такое экспериментирование с реальными объектами, как правило, обходится очень дорого, либо вообще не представляется возможным из-за нежелательных последствий эксперимента. Поэтому обычно в таких случаях для проведения научных экспериментов реальные объекты заменяются соответствующими им более простыми, безопасными и доступными объектами, свойства которых подобны свойствам исследуемых реальных объектов в определенной существенной части.

Термин модель неоднозначен и охватывает чрезвычайно широкий круг материальных и идеальных объектов. Признаком, объединяющим такие, казалось бы, несопоставимые объекты как система дифференциальных уравнений математической физики и пара дамских туфель, выставленных на витрине, является их информационная сущность. Любая модель – идеальная или материальная, используемая в научных целях, на производстве или в быту – несет информацию о свойствах и характеристиках исходного объекта (объекта – оригинала), существенных для решаемой субъектом задачи. Модели – отражение знаний об окружающем мире.

Модель в общем смысле есть создаваемый с целью получения и (или) хранения информации специфический объект (в форме мысленного образа, описания знаковыми средствами либо материальной системы), отражающий свойства, характеристики и связи объекта – оригинала произвольной природы, существенные для задачи, решаемой субъектом.

Определение 1.13. *Объект, с целью изучения которого проводятся исследования, называется **оригиналом**, а объект, исследуемый вместо оригинала для изучения определенных свойств, называется **моделью**.*

В качестве моделей могут выбираться естественные объекты, обладающие свойствами, подобными соответствующим свойствам оригинала, или же создаваться специальные искусственные объекты с нужными свойствами.

Определение 1.14. *Моделирование есть метод (или процесс) изучения свойств объектов-оригиналов посредством исследования соответствующих свойств их моделей.*

Модели, представляющие собой материальные объекты, называются **натурными** или **материальными**.

При исследовании сложных систем, как правило, создать адекватную физическую модель не представляется возможным. В этих случаях ограничиваются созданием и исследованием математических описаний закономерных отношений между значениями параметров оригиналов. Такие описания называются математическими моделями.

Определение 1.15. *Модель есть объект, имеющий некоторые идентичные свойства с оригиналом.*

Определение 1.16. *Модель – это представление объекта, процесса, явления или понятия в некоторой форме, отличной от реального существования.*

Модель – средство, помогающее в объяснении и понимании окружающего нас мира, естественных или искусственных объектов, явлений и процессов.

Всякая человеческая деятельность начинается с моделирования – создания представления о ситуации, о цели и предполагаемом способе действия.

Модель предназначена для мысленного или аппаратного эксперимента с целью познания свойств реальной системы, возможных способов ее применения и способов преобразования для получения каких-то новых возможностей.

Модель является более оперативным и удобным (несмотря на ограниченность) объектом познания, чем любая реальность. Познание всегда связано с моделированием, все наши представления – модели, которые с большей или меньшей достоверностью отображают реальность.

Индивидуальность восприятия и участие внутренних, ранее сложившихся умственных моделей изменяет модель, поэтому один и тот же объект, разные наблюдатели моделируют по-разному, а одна и та же модель понимается по-разному. Примером общепринятой модели может быть *математика*, индивидуальное различие в интерпретации математических теорем незначительно.

Примером наиболее индивидуальной модели может служить *абстрактная живопись*.

Каждый индивидум воспринимает действительность по-своему, информационный образ действительности есть ее индивидуальная модель. Для взаимопонимания требуется частичная общность моделей в главном. *Выделение главного есть* моделирование, взаимопонимание невозможно без общности в этом акте моделирования.

Первоначальная модель всегда *груба, неточна*, недостаточно объективна и только путем настойчивой последующей обработке может приобрести высокую степень совершенства. Но и это не все: модель должна ожить, самостоятельно действовать, только тогда ее можно использовать для прогнозирования событий. Успешность решения проблемы возможно только в случае, если, начиная с какого-то этапа модель, начнет самостоятельно существовать, если ее элементы будут взаимодействовать и есть основания предполагать, что иногда будут взаимодействовать так, как это происходит на самом деле.

Модель есть продукт абстрагирования. Этап абстрагирования при изучении того или иного физического явления или технического объекта состоит в выделении наиболее существенных свойств или признаков явления, или объекта, и представления их в такой упрощенной форме, которая необходима для последующего теоретического и экспериментального исследований. Такое упрощенное в процессе абстрагирования представление реального явления или объекта и называют *моделью*.

Модель используется для построения путем логической дедукции внутренне непротиворечивой теории и для постановки экспериментов.

Практическая полезность выводов, полученных при использовании модели, служит критерием ее приемлемой адекватности реальному явлению или объекту. В процессе внутреннего развития теории или в процессе накопления экспериментальных данных может совершенствоваться и модель, отражая все более полно объективную реальность.

Модели, возникающие в процессе абстрактного мышления – умозрительные. Эти модели могут быть иногда материализованы в виде приборов, устройств или имитационных программ на ЭВМ. В дальнейшем речь будет идти об умозрительных моделях [13, 49, 68, 143].

Качественное описание модели.

В прикладных науках первой фазой абстрагирования является качественное описание модели (физическая модель). В зависимости от содержания исследуемого явления или объекта различают модели: физических законов процессов, технических устройств и систем, экономические, биологические, криминалистические и т.д.

Законы Ньютона, Максвелла и законы релятивистской динамики, модели атома являются примерами физических законов, которые открыли человечеству новые пути познания природы.

Для макроскопического исследования динамических процессов используют модель механической цепи, состоящую из сосредоточенных масс (материальных точек), упругих связей (пружин) и демпферов. Для исследования процессов в электрических цепях и электронных приборах применяют модель в форме принципиальной схемы, собранной из катушек индуктивности, резисторов, конденсаторов, транзисторов, интегральных схем. Для исследования работоспособности технического устройства его представляют в виде системы конечного числа элементов, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний: работоспособности и отказа. В зависимости от цели исследования для одного и того же технического устройства могут быть использованы различные модели. Так для исследования работоспособности используется модель надежности.

Теория моделирования опирается на математику и эвристику, практика моделирования – на технические средства, важнейшие из которых ЭВМ. Несмотря на то, что современная техника способна воспроизвести малую часть той модели, которую строит человеческий разум, техническое моделирование в ряде вопросов дает много больше умственного моделирования, которым пользуется человек в процессе мышления. Это обусловлено рядом причин.

1. Техническая, в том числе и математическая, модель обладает устойчивостью, неизменностью относительно исходных данных. Модель, содержащаяся в уме, устойчивостью не обладает вследствие конформности информационных образов.

2. Стабильность и определенность процедур технического моделирования, в рациональном выборе диапазона изменения переменных, однообразии преобразований и представления результатов.

3. Количественность и значительно более высокая точность технического моделирования по сравнению с умственным.

4. Многократная повторяемость процесса технического моделирования. Ни один, даже самый дисциплинированный человек не может себя заставить многократно повторять одну и ту же процедуру по заранее намеченной программе.

5. Скорость технического моделирования намного превышает скорость умственного моделирования в тысячи и миллионы раз.

Все эти преимущества покупаются дорогой ценой упрощения технических моделей по сравнению с умственными. Здесь причина не только в аппаратных ограничениях (которые достаточно сильно ощущаются, когда

речь идет о сложных процессах), но и бедности и ограниченности языка (в том числе и математического), который необходим для преобразования интеллектуальной модели в техническую. Пока нет возможности непосредственного введения мысленной модели в технические средства, языковой транслятор является непреодолимым барьером. С другой стороны, умственное восприятие математических моделей, легко доступных ЭВМ, связано с большими трудностями. К примеру, решение системы нелинейных дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами, невозможно проделать в уме. Активно усвоить простую геометрическую модель, т.е. настолько понять ее, чтобы свободно преобразовывать ее, комбинируя с другими моделями, непросто. Чтобы этому обучиться, требуется немало усилий [49].

Исследовать с помощью модели все возможные комбинации внешних условий практически невозможно, поэтому моделирование носит вероятностный характер и система ставится в разнообразные случайные условия. При прямом моделировании модель воспроизводит морфологию (структуру) и функции системы, оценивает ошибки выполнения функций с требуемой точностью. Модель может взаимодействовать с реальными системами и с другими (в частности, с умственными) моделями, что позволяет сочетать натуральный эксперимент с моделированием на ЭВМ. Модель отрабатывается и уточняется в процессе моделирования, упорядочиваются исходные данные, постепенно устраняется неопределенность, противоречивость, несогласованность и избыточность.

Конструкция модели должна допускать *цикличность* процесса моделирования, при этом каждый новый цикл учитывает информацию, полученную на предыдущем цикле. Путем последовательных приближений можно рассчитывать на устранение исходной неопределенности. Исходная неопределенность должна учитываться при построении модели и рабочих процедур с тем, чтобы достоверность результатов после завершения процесса моделирования могла быть достигнута за допустимое число циклов (определяемое временем, которое отводится на моделирование) и в пределах реализуемой трудоемкости (вычислительного ресурса) каждого цикла.

Декомпозиция, объединение, упрощение моделей являются нетривиальными, неэквивалентными преобразованиями, которые влекут за собой потери информации, выполняемые в процессе моделирования. Одной из составных частей моделирования является интерпретация, т.е. оценка результата (эффективности моделируемой системы) на основании соответствующих критериев.

1.3. Понятие о подобии объектов

Определение 1.17. *Подобие есть определенное отношение между значениями показателей свойств различных объектов, наблюдаемое и измеряемое исследователем в процессе познания.*

Определение 1.18. *Под подобием понимается такое взаимно однозначное соответствие (отношение) между свойствами объектов, при котором существует функция или правило приведения значений показателей данных свойств одного объекта к значениям тех же показателей другого объекта.*

Математические (формальные) описания подобных объектов допускают приведение их к *тождественному виду*.

Другими словами, подобие есть отношение взаимно однозначного соответствия между значениями показателей однородных свойств различных объектов. Однородными называются свойства, имеющие одинаковую размерность показателей.

Вообще говоря, объекты с различной физической природой, например, механические и электрические процессы, могут иметь однородные свойства, например свойство изменения во времени определенных параметров.

Известно несколько видов подобия объектов.

1. В зависимости от полноты учета параметров различают:

- **абсолютное (теоретическое) подобие**, которое предполагает пропорциональное соответствие значений всех параметров данных объектов, т. е. $p_j(t) / r_j(t) = m_j(t)$, где $j = 1, \dots, n$;
- **практическое подобие** – определенное функциональное взаимно однозначное соответствие параметров и показателей определенного подмножества свойств, существенных для данного исследования;
- **практически полное подобие** – соответствие показателей и параметров выделенных свойств во времени и пространстве;
- **практически не полное подобие** – соответствие параметров и выделенных свойств показателей только во времени, или только в пространстве;
- **практическое приближенное подобие** – соответствие выделенных параметров и показателей с определенными допущениями и приближениями.

2. По адекватности природы объектов различают:

- **физическое подобие**, предполагающее адекватность физической природы объектов (частными случаями физического подобия являются механическое, электрическое и химическое подобия объектов);
- **математическое подобие**, предполагающее адекватность формального описания свойств объектов (частными случаями математического