



Александр Леоненков

# Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH

- Основы теории нечетких множеств и нечеткой логики
- Построение нечетких моделей в среде MATLAB Fuzzy Logic Toolbox
- Создание проектов в пакете fuzzyTECH



**МАСТЕР РЕШЕНИЙ**

**Александр Леоненков**

**Нечеткое  
моделирование  
в среде MATLAB  
и fuzzyTECH**

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2003

УДК 681.3.068  
ББК 32.973.26-018.2  
Л47

**Леоненков А. В.**

Л47 Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. —  
СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 736 с.: ил.

ISBN 5-94157-087-2

В книге рассматриваются основы нечеткого моделирования — нового направления применения наукоемких технологий для решения практических задач. Подробно описываются базовые понятия теории нечетких множеств и нечеткой логики, необходимые для построения нечетких моделей систем в технике и экономике (в т. ч. бизнесе). Исследуются особенности нечеткого моделирования в средах MATLAB и fuzzyTECH. Изложение сопровождается примерами разработки отдельных нечетких моделей и иллюстрациями выполнения всех необходимых операций с нечеткими множествами.

*Для системных аналитиков, программистов и студентов вузов*

УДК 681.3.068  
ББК 32.973.26-018.2

### **Группа подготовки издания:**

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зав. редакцией	<i>Григорий Добин</i>
Редактор	<i>Анатолий Хрипов</i>
Компьютерная верстка	<i>Натальи Смирновой</i>
Корректор	<i>Наталья Першакова</i>
Дизайн обложки	<i>Игоря Цырульникова</i>
Оформление серии	<i>Via Design</i>
Зав. производством	<i>Николай Тверских</i>

Лицензия ИД № 02429 от 24.07.00. Подписано в печать 28.04.03.

Формат 70×100<sup>1/16</sup>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 59,34.

Тираж 2500 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 198005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Гигиеническое заключение на продукцию, товар № 77.99.02.953.Д.001537.03.02  
от 13.03.2002 г. выдано Департаментом ГСЭН Минздрава России.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ФГУП ордена Трудового Красного Знамени "Техническая книга"  
Министерства Российской Федерации по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.  
198005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

# Содержание

<b>Предисловие.....</b>	<b>1</b>
Структура книги.....	3
Рекомендации по изучению материала книги .....	5
Благодарности.....	6
<b>Часть I. Основы теории нечетких множеств и нечеткой логики .....</b>	<b>9</b>
<b>Глава 1. Введение .....</b>	<b>11</b>
1.1. История развития теории и приложений нечетких множеств и нечеткой логики .....	12
Первые промышленные приложения в Европе .....	12
Япония — лидер в области промышленных приложений .....	13
Европа и США преследуют Японию .....	14
1.2. Методология системного моделирования .....	15
Анализ проблемной ситуации .....	19
Структуризация предметной области и построение модели.....	20
Выполнение вычислительных экспериментов с моделью.....	21
Применение результатов вычислительных экспериментов.....	22
Коррекция или доработка модели .....	23
1.3. Методология нечеткого моделирования .....	24
1.4. Анализ нечеткого и вероятностного подходов к моделированию неопределенности.....	26
Стохастическая неопределенность.....	27
Лингвистическая неопределенность .....	28
Моделирование лингвистической неопределенности.....	29
Нечеткая логика в сравнении с теорией вероятностей .....	30
<b>Глава 2. Основные понятия теории нечетких множеств .....</b>	<b>33</b>
2.1 Определение нечеткого множества .....	33
2.2. Основные характеристики нечетких множеств .....	43
2.3. Основные типы функций принадлежности .....	52
Кусочно-линейные функции принадлежности.....	52
Z-образные и S-образные функции принадлежности .....	54
Л-образные функции принадлежности.....	60
2.4. Некоторые рекомендации по построению функций принадлежности нечетких множеств .....	63
Прямые методы построения функций принадлежности.....	64
Косвенные методы построения функций принадлежности .....	65

<b>Глава 3. Операции над нечеткими множествами.....</b>	<b>67</b>
3.1. Равенство и доминирование нечетких множеств.....	68
3.2. Операции пересечения, объединения и разности нечетких множеств.....	70
3.3. Альтернативные операции пересечения и объединения нечетких множеств.....	79
Нечеткие операторы.....	89
3.4. Некоторые дополнительные операции над нечеткими множествами.....	93
<b>Глава 4. Нечеткие отношения.....</b>	<b>99</b>
4.1. Нечеткое отношение и способы его задания.....	99
Способы задания нечетких отношений.....	101
4.2. Основные характеристики нечетких отношений.....	110
4.3. Операции над нечеткими отношениями.....	114
Композиция бинарных нечетких отношений.....	118
4.4. Нечеткое отображение.....	124
Принцип обобщения в теории нечетких множеств.....	125
4.5. Свойства бинарных нечетких отношений, заданных на одном универсуме.....	126
Операция транзитивного замыкания бинарного нечеткого отношения.....	128
4.6. Некоторые специальные виды нечетких бинарных отношений, заданных на одном базисном множестве.....	131
<b>Глава 5. Нечеткая и лингвистическая переменные. Нечеткие величины, числа и интервалы.....</b>	<b>134</b>
5.1. Определения нечеткой и лингвистической переменных.....	134
5.2. Нечеткие величины, числа и интервалы.....	137
Операции над нечеткими числами и интервалами.....	139
5.3. Нечеткие числа и интервалы в форме $(L-R)$ -функций.....	141
Операции над нечеткими числами и интервалами $(L-R)$ -типа.....	145
5.4. Треугольные нечеткие числа и трапецевидные нечеткие интервалы.....	148
Операции над треугольными нечеткими числами и трапецевидными нечеткими интервалами.....	152
<b>Глава 6. Основы нечеткой логики.....</b>	<b>158</b>
6.1. Понятие нечеткого высказывания и нечеткого предиката.....	159
Нечеткие предикаты.....	161
6.2. Основные логические операции с нечеткими высказываниями.....	162
Логическое отрицание нечетких высказываний.....	162
Логическая конъюнкция нечетких высказываний.....	163
Логическая дизъюнкция нечетких высказываний.....	164
Нечеткая импликация.....	165
Нечеткая эквивалентность.....	167
6.3. Правила нечетких продукций.....	167
Прямой и обратный методы вывода заключений в системах нечетких продукций.....	171

<b>Глава 7. Системы нечеткого вывода</b> .....	<b>178</b>
7.1. Базовая архитектура систем нечеткого вывода .....	178
Нечеткие лингвистические высказывания.....	179
Правила нечетких продукций в системах нечеткого вывода .....	181
Механизм или алгоритм вывода в системах нечеткого вывода.....	185
7.2. Основные этапы нечеткого вывода.....	185
Формирование базы правил систем нечеткого вывода .....	187
Фаззификация (Fuzzification).....	189
Агрегирование (Aggregation).....	191
Активизация (Activation).....	192
Аккумуляция (Accumulation) .....	195
Дефаззификация (Defuzzification).....	197
Метод центра тяжести .....	197
Метод центра тяжести для одноточечных множеств .....	198
Метод центра площади .....	199
Метод левого модального значения .....	200
Метод правого модального значения .....	200
7.3. Основные алгоритмы нечеткого вывода .....	201
Алгоритм Мамдани (Mamdani).....	202
Алгоритм Цукамото (Tsukamoto) .....	202
Алгоритм Ларсена (Larsen).....	203
Алгоритм Сугено (Sugeno).....	204
Упрощенный алгоритм нечеткого вывода .....	205
7.4. Примеры использования систем нечеткого вывода в задачах управления.....	205
Нечеткая модель управления смесителем воды при принятии душа.....	208
Содержательная постановка задачи .....	208
Построение базы нечетких лингвистических правил.....	209
Фаззификация входных переменных .....	209
Нечеткая модель управления кондиционером воздуха в помещении .....	212
Содержательная постановка задачи .....	212
Построение базы нечетких лингвистических правил.....	214
Фаззификация входных переменных .....	215
Нечеткая модель управления контейнерным краном .....	218
Содержательная постановка задачи .....	218
Формирование базы правил систем нечеткого вывода .....	219
Фаззификация входных переменных .....	220
<b>Глава 8. Язык нечеткого управления — FCL</b> .....	<b>222</b>
8.1. Концептуальные основы нечеткого управления.....	222
Интеграция программируемых контроллеров .....	226
Перенос программ нечеткого управления.....	228
История разработки и стандартизации языка FCL .....	229
8.2. Базовая нотация языка нечеткого управления FCL.....	230
Основные элементы языка FCL.....	230
Нотация правил продукций.....	230
Ключевые слова языка FCL.....	232
Интерфейс функционального блока (Function Block interface).....	234
Фаззификация (Fuzzification).....	235
Дефаззификация (Defuzzification).....	237

Блок правил (Rule block) .....	239
Простой пример записи модели нечеткого управления с использованием нотации языка FCL .....	243
Необязательные параметры (Optional parameters) .....	244
Согласованность классов языка FCL .....	244
Список проверки данных .....	248
8.3. Пример разработки и записи нечетких моделей на языке FCL .....	250
Нечеткая модель управления смесителем воды при принятии душа .....	250
Нечеткая модель управления кондиционером воздуха в помещении .....	251
Нечеткая модель управления контейнерным краном .....	253
<b>Глава 9. Основы общей теории нечеткой меры .....</b>	<b>256</b>
9.1. Нечеткие меры и их основные свойства .....	256
Общее определение нечеткой меры .....	257
Меры доверия и правдоподобия .....	258
Меры возможности, необходимости и вероятности .....	259
$\lambda$ -нечеткие меры .....	261
Классификация пространств с нечеткими мерами .....	262
9.2. Нечеткий интеграл и примеры его вычисления .....	263
<b>Глава 10. Нечеткие сети Петри .....</b>	<b>267</b>
10.1. Базовый формализм классических сетей Петри .....	268
Свойства сетей Петри и задачи их анализа .....	276
10.2. Основные подклассы нечетких сетей Петри .....	280
Нечеткие сети Петри типа $V_f$ .....	280
Нечеткие сети Петри типа $S_f$ .....	286
Обобщенные нечеткие временные сети Петри типа $S_{rt}^f$ .....	291
Свойства нечетких сетей Петри .....	298
Классификация нечетких сетей Петри .....	300
10.3. Использование нечетких сетей Петри для представления правил нечетких продукций .....	303
<b>Часть II. НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB .....</b>	<b>309</b>
<b>Глава 11. Общая характеристика программы MATLAB .....</b>	<b>311</b>
11.1. Основные элементы системы MATLAB .....	311
Особенности инсталляции системы MATLAB на компьютер пользователя .....	312
Запуск системы MATLAB и элементы ее графического интерфейса .....	313
Встроенная справочная система и документация, поставляемая с системой MATLAB .....	319
11.2. Основные приемы работы в системе MATLAB .....	321
Назначение операций главного меню .....	322
Назначение операций панели инструментов .....	326
Основные приемы работы в окне команд .....	327
11.3. Графические возможности системы MATLAB .....	334

<b>Глава 12. Процесс нечеткого моделирования в среде MATLAB</b> .....	<b>343</b>
12.1. Процесс разработки системы нечеткого вывода в интерактивном режиме .....	343
Редактор систем нечеткого вывода FIS .....	344
Редактор функций принадлежности .....	349
Редактор правил системы нечеткого вывода .....	352
Программа просмотра правил системы нечеткого вывода .....	354
Программа просмотра поверхности системы нечеткого вывода .....	356
12.2. Пример разработки системы нечеткого вывода в интерактивном режиме .....	358
12.3. Процесс разработки системы нечеткого вывода в режиме командной строки .....	371
<b>Глава 13. Нечеткая кластеризация в Fuzzy Logic Toolbox</b> .....	<b>379</b>
13.1. Общая характеристика задач кластерного анализа .....	379
13.2. Задача нечеткой кластеризации и алгоритм ее решения .....	380
Общая формальная постановка задачи нечеткого кластерного анализа .....	381
Уточненная постановка задачи нечеткой кластеризации .....	383
Алгоритм решения задачи нечеткой кластеризации методом нечетких с-средних .....	385
13.3. Средства решения задачи нечеткой кластеризации в пакете Fuzzy Logic Toolbox .....	387
Решение задачи нечеткой кластеризации в командном режиме .....	387
Решение задачи нечеткой кластеризации с использованием средств графического интерфейса .....	392
Решение задачи определения числа кластеров для нечеткой кластеризации в системе MATLAB .....	395
<b>Глава 14. Основы программирования в среде MATLAB</b> .....	<b>399</b>
14.1. Основы языка программирования системы MATLAB .....	399
Операторы управления последовательностью выполнения команд .....	404
Условный оператор if...elseif...else...end .....	404
Оператор выбора switch...case...otherwise...end .....	405
Оператор цикла for...end .....	406
Оператор цикла while...end .....	407
Оператор continue .....	408
Оператор break .....	408
Оператор return .....	409
Защищенный блок try...catch...end .....	410
Текстовые комментарии .....	411
14.2. Основные приемы работы с редактором/отладчиком m-файлов .....	411
Назначение операций главного меню .....	413
Назначение операций панели инструментов .....	418
14.3. Пример программы, расширяющей возможности пакета нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox .....	420

<b>Глава 15. Основы нечетких нейронных сетей.....</b>	<b>426</b>
15.1. Общая характеристика ANFIS — адаптивных систем нейро-нечеткого вывода.....	427
Понятие нейронной сети и основные способы ее задания .....	427
Гибридная сеть как адаптивная система нейро-нечеткого вывода .....	432
15.2. Реализация ANFIS в среде MATLAB .....	432
15.3. Пример решения задачи нейро-нечеткого вывода.....	442
<b>Глава 16. Примеры разработки нечетких моделей управления в среде MATLAB .....</b>	<b>451</b>
16.1. Нечеткая модель управления кондиционером воздуха в помещении.....	451
16.2. Нечеткая модель управления контейнерным краном.....	457
<b>Глава 17. Примеры разработки нечетких моделей принятия решений в среде MATLAB .....</b>	<b>464</b>
17.1. Оценивание финансовой состоятельности клиентов при предоставлении банковских кредитов.....	464
Содержательная постановка задачи оценивания финансовой состоятельности клиентов.....	464
Описание входных и выходных переменных рассматриваемой задачи.....	465
Нечеткая модель оценивания финансовой состоятельности клиентов.....	468
Фазсификация входных и выходных переменных .....	469
Формирование базы правил систем нечеткого вывода .....	471
Построение нечеткой модели средствами Fuzzy Logic Toolbox и анализ полученных результатов.....	473
17.2. Анализ и прогнозирование валютных цен на финансовом рынке.....	479
<b>Часть III. НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ fuzzyTECH.....</b>	<b>489</b>
<b>Глава 18. Общая характеристика программы fuzzyTECH.....</b>	<b>491</b>
18.1. Общая характеристика нечеткого проекта в среде fuzzyTECH .....	492
18.2. Основные элементы рабочего интерфейса программы fuzzyTECH .....	497
Встроенная справочная система программы fuzzyTECH.....	503
18.3. Назначение операций главного меню и панели инструментов программы fuzzyTECH.....	506
Назначение операций главного меню .....	506
Назначение операций панели инструментов .....	516
18.4. Графические средства визуализации результатов нечеткого вывода в программе fuzzyTECH.....	518
Графическое окно просмотра поверхности нечеткого вывода на плоскости .....	518
Графическое окно просмотра трехмерной поверхности нечеткого вывода .....	521
Графическое окно просмотра временных графиков значений лингвистических переменных .....	524

<b>Глава 19. Процесс нечеткого моделирования в среде fuzzyTECH.....</b>	<b>527</b>
19.1. Основные средства редактирования и анализа систем нечеткого вывода в fuzzyTECH.....	527
Графический редактор лингвистической переменной и функций принадлежности их термов.....	528
Графические редакторы правил системы нечеткого вывода.....	533
Графические средства анализа результатов нечеткого вывода.....	539
19.2. Основные средства разработки проектов и компонентов систем нечеткого вывода в fuzzyTECH.....	543
Мастер нечеткого проекта.....	543
Мастер лингвистической переменной.....	549
Мастер блока правил.....	554
<b>Глава 20. Примеры разработки и анализа нечетких моделей в среде fuzzyTECH.....</b>	<b>559</b>
20.1. Пример разработки системы нечеткого вывода для задачи «Чаевые в ресторане».....	559
20.2. Нечеткая модель управления контейнерным краном.....	568
20.3. Нечеткая модель оценивания финансовой состоятельности клиентов при предоставлении банковских кредитов.....	573
<b>Часть IV. ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>583</b>
<b>Приложение 1. Основы классической теории множеств и отношений.....</b>	<b>585</b>
Множество и способы его задания.....	585
Основные теоретико-множественные операции.....	593
Булеан или множество всех подмножеств.....	599
Мультимножество или комплект.....	600
Отношения и способы их задания.....	601
Операции над бинарными отношениями.....	607
Отображение.....	609
Свойства бинарных отношений, заданных на одном базисном множестве.....	610
Некоторые специальные виды бинарных отношений, заданных на одном базисном множестве.....	612
Отношение строгого частичного порядка.....	613
Отношение толерантности.....	613
Отношение эквивалентности.....	614
Мультиотношение.....	614
<b>Приложение 2. Основы математической логики.....</b>	<b>616</b>
Классическая логика высказываний.....	617
Основные понятия логики высказываний.....	617
Основные логические операции над высказываниями.....	619
Формальные теории.....	624
Исчисление высказываний как формальная теория.....	625

Логика предикатов .....	628
Основные понятия логики предикатов первого порядка .....	629
Логические операции над предикатами .....	630
Кванторы логики предикатов.....	631
Исчисление предикатов первого порядка как формальная теория .....	632
Продукционные системы .....	635
Прямой и обратный методы вывода заключений в продукционных системах .....	637
<b>Приложение 3. Справочник функций пакета Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB.....</b>	<b>641</b>
<b>Приложение 4. Пример файла проекта для программы fuzzyTECH .....</b>	<b>705</b>
<b>Глоссарий.....</b>	<b>713</b>
<b>Литература .....</b>	<b>717</b>

# Предисловие

Книга посвящена рассмотрению теоретических основ и прикладных методов новой современной технологии — нечеткого моделирования — в контексте решения практических задач с использованием специализированных программных средств MATLAB и fuzzyTECH. Основная цель предлагаемого вниманию читателей учебного пособия — привлечь внимание студентов, аспирантов, преподавателей, инженеров, молодых научных сотрудников и программистов к нечеткой проблематике и дать доступное введение в одну из интереснейших и перспективных областей современных высоких технологий — нечеткое моделирование.

Чем же обусловлена актуальность этой новой технологии и в чем проявляется ее преимущество перед известными и ставшими уже классическими концепциями моделирования и управления?

Прежде всего — это тенденция увеличения сложности математических и формальных моделей реальных систем и процессов управления, связанная с желанием повысить их адекватность и учесть все большее число различных факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений.

С одной стороны, традиционные методы построения моделей не приводят к удовлетворительным результатам, когда исходное описание подлежащей решению проблемы заведомо является неточным или неполным. С другой стороны, стремление получить всю исчерпывающую информацию для построения точной математической модели сколь-нибудь сложной реальной ситуации может привести к потере времени и средств, поскольку это может быть в принципе невозможно.

В подобных случаях наиболее целесообразно воспользоваться такими методами, которые специально ориентированы на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных. Именно в таких ситуациях технология нечеткого моделирования оказывается наиболее конструктивной, поскольку за последнее десятилетие на ее основе были решены сотни практических задач управления и принятия решений.

Сейчас уже не вызывает сомнения тот факт, что важнейшей особенностью жизнеспособности той или иной теоретической концепции является ее реализация и поддержка в соответствующих программных инструментах. Появление и успешное развитие коммерческих программных средств, которые специально ориентированы на решение задач нечеткого моделирования, объективно свидетельствуют в пользу того, что теория нечетких множеств и нечеткая логика могут и должны быть эффективно использованы для решения широкого круга практических задач. При этом наиболее интересными программными средствами, в которых реализована технология нечеткого моделирования, по мнению автора, являются рассмотренные в книге система MATLAB и программа fuzzyTECH.

К сожалению, существующие издания по нечеткой проблематике либо излишне упрощены и поверхностны, что характерно, в первую очередь, для информации, представленной в Интернете, либо содержат абстрактное изложение отдельных, зачастую весьма узких аспектов теории нечетких множеств и различных ее направлений, что характерно для академических работ последних трех десятилетий.

С одной стороны, упрощенное изложение теории нечетких множеств и нечеткой логики на уровне картинок создает несерьезное отношение к ней со стороны профессиональных математиков и программистов, препятствуя внедрению соответствующих идей в процесс их подготовки и обучения. С другой стороны, тенденция перевести все идеи современной математики на язык теории нечетких множеств привела к появлению целого ряда работ, содержащих абстрактное обобщение тех или иных математических конструкций, которые оказались оторванными от проблематики реальных практических задач системного моделирования. По целому ряду причин эта тенденция также не нашла широкого признания в среде математиков и программистов.

В настоящей книге представлен материал, который тщательно отобран из большого многообразия идей и работ, получивших развитие в последние три десятилетия. При отборе материала автор руководствовался, главным образом, возможностью конструктивного применения соответствующих идей на практике. При этом изложение материала не является поверхностным в ущерб математической строгости, ибо, по мнению автора, теория нечетких множеств продолжает оставаться разделом математики, а нечеткая логика — разделом математической логики. Нечеткая математика не может и не должна излагаться нечетким языком. С этой целью в книге приводится теоретический материал, который необходим для адекватного понимания всех основных идей нечеткого моделирования.

В то же время конструктивное восприятие идей нечеткого моделирования возможно посредством построения и анализа нечетких моделей конкретных практических задач. С этой целью в книге рассматривается достаточное количество прикладных задач, которые не только иллюстрируют особенности реализации тех или иных идей нечеткого моделирования, но и могут быть эффективно решены с использованием соответствующих программных инструментов — MATLAB и fuzzyTECH. При этом целый ряд представленных задач имеет оригинальный характер, в чем читатель сможет убедиться самостоятельно при чтении книги.

При изложении материала невольно возникает проблема унификации терминологии и обозначений, традиционно применяемых в различных работах по теории нечетких множеств. Как представляется автору, целый ряд таких обозначений не являются вполне удобными и не отражают внутреннюю логику рассматриваемых понятий, хотя исторически применялись в целом ряде оригинальных работ. Это относится, например, к использованию символов нижнего подчеркивания, суммы и интеграла для обозначения нечетких множеств. Поскольку эти обозначения способны привести к путанице и трудностям у начинающих читателей, они не используются в книге, а заменены на более привычные теоретико-множественные, которые наиболее точно отражают обобщенный характер нечетких понятий по сравнению с понятиями классической математики.

## Структура книги

В основу книги положены две основные идеи. С одной стороны, познакомить читателя с теоретическими основами новой концепции нечеткого моделирования сложных систем, которая может быть конструктивно использована для построения нечетких моделей и без понимания которой вряд ли возможно адекватно использовать богатейший потенциал возможностей соответствующих программных инструментов.

С другой стороны, рассмотреть основные программные инструменты, которые за последние несколько лет оказались наиболее эффективными при решении практических задач с использованием технологии нечеткого моделирования.

Материал книги делится на три части. Первая часть знакомит с основными теоретическими понятиями, которые необходимы для правильного понимания базовой терминологии нечеткого моделирования и возможностей соответствующей технологии в контексте решения прикладных задач. Здесь представлен теоретический материал, необходимый для уяснения всех основных понятий теории нечетких множеств и нечеткой логики. При этом материал излагается независимо от программных инструментов, следуя логической и исторической традиции развития соответствующих научных направлений.

Вторая часть посвящена рассмотрению особенностей процесса нечеткого моделирования с использованием возможностей одной из наиболее мощных и универсальных систем компьютерной математики — системы MATLAB. Третья часть содержит описание особенностей процесса нечеткого моделирования с использованием специального программного инструментария — программы fuzzyTECH.

В *главе 1* рассматриваются особенности современного состояния нечеткого моделирования в контексте общих концепций системного моделирования, приводится исторический обзор развития методологии нечеткого моделирования сложных систем. Здесь можно познакомиться с сущностью проблемы неопределенности и основными подходами ее количественного анализа.

В *главе 2* рассматриваются основные понятия теории нечетких множеств и их связь с определением классического множества, описываются все основные типы функций принадлежности, их аналитическое и графическое представления, а также приводятся примеры различных нечетких множеств.

В *главе 3* рассматриваются операции над нечеткими множествами и основные способы их определения в контексте классических теоретико-множественных операций. При этом результаты выполнения операций над нечеткими множествами иллюстрируются целым рядом примеров.

В *главе 4* рассматриваются нечеткие отношения и операции над нечеткими отношениями, а также описывается ряд свойств нечетких отношений, которые позволяют определить нечеткое разбиение и нечеткий порядок. Приводятся примеры конкретных нечетких отношений, возникающих в экономике, бизнесе и в быту.

В *главе 5* рассматриваются нечеткая и лингвистическая переменные, которые используются в дальнейшем при определении понятий нечеткой логики, а также описываются основные операции над нечеткими числами и интервалами, которые иллюстрируются различными примерами.

В *главе 6* излагаются теоретические основы нечеткой логики, рассматриваются основные операции с нечеткими высказываниями в контексте классической логики, приводятся примеры нечетких высказываний и выполнения нечетко-логических операций.

В *главе 7* рассматриваются нечеткий вывод и системы нечеткого вывода, определяются различные способы вычисления степени истинности нечеткой импликации, приводятся примеры использования нечеткого вывода в системном моделировании.

В *главе 8* приводится описание базовой нотации языка нечеткого управления FCL в соответствии со Стандартом ИЕС 1131-7. Здесь также рассматриваются основные понятия теории нечеткого управления и приводятся примеры записи нечетких моделей управления в нотации языка FCL.

В *главе 9* рассматриваются основы теории возможностей, которая представляет одно из перспективных направлений развития технологии нечеткого моделирования. Приводится общее определение нечеткой меры и ее разновидностей — мер возможности, необходимости и вероятности в контексте адекватного представления неопределенности.

В *главе 10* рассматривается аппарат нечетких сетей Петри, который также представляется перспективным направлением развития технологии нечеткого моделирования, описываются особенности формального и графического представлений, приводятся примеры задач и построение нечетких моделей систем с использованием формализма нечетких сетей Петри.

В *главе 11* представлена общая характеристика системы компьютерной математики MATLAB и ее пакета расширения — Fuzzy Logic Toolbox, предназначенного для построения систем нечеткого вывода, а также рассматриваются графический интерфейс и основные функции режима команд системы MATLAB.

В *главе 12* описывается процесс построения нечетких моделей в среде MATLAB и соответствующие графические средства пакета Fuzzy Logic Toolbox, приводятся простейшие примеры нечеткого моделирования.

В *главе 13* рассматриваются теоретические основы нечеткой кластеризации и особенности реализации соответствующих алгоритмов в системе MATLAB, приводятся примеры решения задач нечеткой кластеризации в среде Fuzzy Logic Toolbox.

В *главе 14* излагаются основы программирования в среде MATLAB с использованием языка разработки m-файлов, рассматривается синтаксис этого языка и его основные конструкции, приводится пример разработки m-файла для реализации операций с нечеткими множествами, который расширяет возможности системы MATLAB.

В *главе 15* рассматривается новое направление нечеткого моделирования — адаптивные системы нейро-нечеткого вывода, приводится исходное определение нейронной сети и описываются особенности реализации адаптивных систем ANFIS в среде MATLAB.

В *главах 16 и 17* приводятся конкретные примеры построения нечетких моделей в среде MATLAB, предназначенные для решения задач управления и принятия решений, среди которых — нечеткие модели управления кондиционером воздуха в помещении, управления контейнерным краном в порту, оценивания финансовой состоятельности клиентов при предоставлении банковских кредитов и прогнозирования валютных цен на финансовом рынке.

В *главе 18* представлена общая характеристика программы fuzzyTECH, описаны особенности ее инсталляция и графического интерфейса, рассматриваются основные характеристики нечеткого проекта в среде fuzzyTECH.

В *главе 19* рассматриваются все специальные средства программы fuzzyTECH, предназначенные для разработки и анализа нечетких моделей, а также даются рекомендации по выполнению отдельных этапов нечеткого моделирования в среде fuzzyTECH.

В *главе 20* приводятся конкретные примеры построения нечетких моделей в среде fuzzyTECH, предназначенные для решения отдельных задач управления и принятия решений, среди которых — нечеткие модели поведения в ресторане, управления контейнерным краном в порту и оценивания финансовой состоятельности клиентов при предоставлении банковских кредитов.

В *приложении 1* рассматриваются основы классической теории множеств, которые необходимы для понимания базовой концепции теории нечетких множеств, являющейся обобщением и дальнейшим развитием описываемых здесь понятий.

В *приложении 2* рассматриваются основы математической логики, которые необходимы для понимания концепции систем нечеткого вывода, также являющейся обобщением и дальнейшим развитием описываемых здесь понятий.

В *приложении 3* приводится справочник функций пакета Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB для выполнения различных операций с системами нечеткого вывода.

В *приложении 4* приводится текст файла проекта системы нечеткого вывода в формате FTL для среды fuzzyTECH, который иллюстрирует дополнительные возможности спецификации нечетких проектов в среде fuzzyTECH.

## **Рекомендации по изучению материала книги**

Представленный в книге материал охватывает всю основную проблематику методологии нечеткого моделирования и технологии решения практических задач с использованием наиболее эффективных программных инструментов. В то же

время для всестороннего понимания особенностей разработки и применения нечетких моделей, как правило, недостаточно общей эрудиции и наличия того или иного программного инструментария. Как показывает практический опыт, для творческого овладения методологией нечеткого моделирования необходима определенная математическая подготовка и знание некоторых общих принципов моделирования и управления, разработанных в рамках прикладного системного анализа.

Читатели, впервые приступающие к изучению нечеткого моделирования и ставящие перед собой цель в совершенстве овладеть данным предметом, могут последовательно знакомиться с материалом отдельных глав, обращаясь к приложениям по мере необходимости. При этом теоретический материал, изложенный в первой части книги, используется в дальнейшем при изложении конкретных нечетких моделей. Те из читателей, кто знаком с понятиями и проблематикой теории нечетких множеств и нечеткой логики, могут сразу перейти к рассмотрению особенностей реализации нечетких моделей в средах MATLAB и fuzzyTECH, обращаясь к основному теоретическому материалу по мере необходимости. Наконец, читатели, которые интересуются прикладными аспектами отдельных направлений нечеткого моделирования, такими, как адаптивные системы нейро-нечеткого вывода или методы нечеткой кластеризации, могут выборочно обратиться к материалу соответствующих глав.

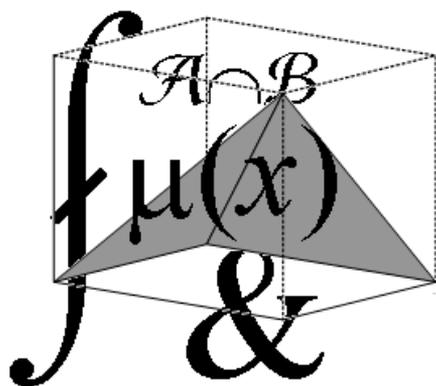
Материал книги может быть использован для постановки соответствующего учебного курса в вузах с целью подготовки специалистов математического, экономического и технического профиля. В этом случае автор надеется, что как студенты, так и преподаватели найдут в книге интересный для размышления материал, который позволит понять целый ряд особенностей и перспектив профессионального образования в области современных информационных технологий.

## Благодарности

Автор искренне благодарит К. Н. Ильинского, Е. В. Кондукову, Е. В. Строганову, А. М. Коновалова и И. А. Корнеева за предоставленные в разное время материалы, которые были использованы при написании книги, а также доцента А. Н. Павлова за конструктивное обсуждение материала отдельных глав книги. Автор искренне признателен директору Школы IT-менеджмента АНХ при Правительстве РФ ([www.itmane.ru](http://www.itmane.ru)) И. Ю. Прокиной, а также Л. А. Ермакову, В. А. Перекрестову и В. В. Фамильнову за оказанную поддержку в процессе работы над книгой. В предоставлении персональной лицензии и фирменной документации на систему MATLAB неоценимую помощь оказали Борис Манзон (SoftLine) и сотрудник компании MathWorks — Courtney Esposito.

Написание современной книги немыслимо без использования ресурсов Интернета. В этой связи хотелось бы выразить особую признательность директору Междисциплинарного Центра СПбГУ ([www.icafe.nw.ru](http://www.icafe.nw.ru)) профессору Н. В. Борисуву за предоставленную возможность электронной коммуникации.

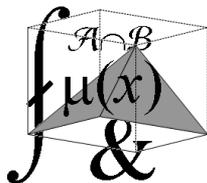
В заключение следует специально отметить одно немаловажное обстоятельство, которое усложняет понимание и распространение идей нечеткого моделирования среди отечественных математиков, инженеров и программистов. Речь идет о неустановившейся терминологии в этой области и о неоднозначности перевода отдельных терминов, имеющих зачастую многозначное толкование в том или ином конкретном контексте. С этой целью названия наиболее важных понятий и их краткая характеристика отдельно приводятся в конце книги. В любом случае автор будет признателен за все отзывы и конструктивные предложения, связанные с содержанием книги и проблематикой нечеткого моделирования, которые можно отправлять по адресу: **fuzzy@itmane.ru**.



# ЧАСТЬ I

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ  
МНОЖЕСТВ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

# Глава 1



## Введение

Теория нечетких множеств, основные идеи которой были предложены американским математиком Лотфи Заде (Lotfi Zadeh) более 35 лет назад, позволяет описывать качественные, неточные понятия и наши знания об окружающем мире, а также оперировать этими знаниями с целью получения новой информации. Основанные на этой теории методы построения информационных моделей существенно расширяют традиционные области применения компьютеров и образуют самостоятельное направление научно-прикладных исследований, которое получило специальное название — *нечеткое моделирование*.

В последнее время нечеткое моделирование является одной из наиболее активных и перспективных направлений прикладных исследований в области управления и принятия решений. Нечеткое моделирование оказывается особенно полезным, когда в описании технических систем и бизнес-процессов присутствует неопределенность, которая затрудняет или даже исключает применение точных количественных методов и подходов.

В области управления техническими системами нечеткое моделирование позволяет получать более адекватные результаты по сравнению с результатами, которые основываются на использовании традиционных аналитических моделей и алгоритмов управления. Диапазон применения нечетких методов с каждым годом расширяется, охватывая такие области, как проектирование промышленных роботов и бытовых электроприборов, управление доменными печами и движением поездов метро, автоматическое распознавание речи и изображений.

Нечеткая логика, которая служит основой для реализации методов нечеткого управления, более естественно описывает характер человеческого мышления и ход его рассуждений, чем традиционные формально-логические системы. Именно поэтому изучение и использование математических средств для представления нечеткой исходной информации позволяет строить модели, которые наиболее адекватно отражают различные аспекты неопределенности, постоянно присутствующей в окружающей нас реальности.

## 1.1. История развития теории и приложений нечетких множеств и нечеткой логики

Первой публикацией по теории нечетких множеств принято считать работу профессора из Университета Беркли (шт. Калифорния, США) Лотфи Заде, которая относится к 1965 г. Понятие нечеткого множества в смысле Л. Заде положило начало новому импульсу в области математических и прикладных исследований, в рамках которых за короткий срок были предложены нечеткие обобщения всех основных теоретико-множественных и формально-логических понятий.

Наиболее значимыми из работ в этой области следует отметить публикации Л. Заде, Д. Дюбуа (D. Dubois) и А. Прада (H. Prade) по теории нечеткой меры и меры возможности, М.Сугено (M. Sugeno) по нечеткому выводу и нечеткому интегралу, Дж. Беждека (J. Bezdek) по нечеткой кластеризации и распознаванию образов, Р. Ягера (R. R. Yager) по нечеткой логике.

Однако, несмотря на большое количество теоретических работ, прикладное значение нечетких моделей долгое время ставилось под сомнение. Даже сегодня, когда имеется информация о многих десятках успешных применений нечетких моделей, некоторые ученые все еще скептически относятся к возможностям нечеткого моделирования.

### Первые промышленные приложения в Европе

Первые реализации нечетких моделей в промышленности относятся к середине 1970-х гг. Именно в этот период в Великобритании Эбрахим Мамдани (Ebrahim Mamdani) использовал нечеткую логику для управления парогенератором. Решение этой задачи обычными методами было сопряжено с целым рядом трудностей вычислительного характера. Предложенный Э. Мамдани алгоритм, основанный на нечетком логическом выводе, позволил избежать чрезмерно большого объема вычислений и был по достоинству оценен специалистами. В этот же период нечеткие модели были применены при управлении печью для обжига цемента. Тем не менее, эти немногие приложения, использовавшие нечеткую логику, по существу скрывали этот факт, поскольку в них нечеткая логика называлась "многозначной логикой" или "непрерывной логикой".

В начале 1980-х гг. нечеткая логика и теория нечетких множеств получили свое дальнейшее развитие в целом ряде программных средств поддержки принятия решений и в экспертных системах анализа данных. Хотя многие из этих программных инструментов так и не вышли за пределы научно-исследовательских лабораторий и институтов, в ходе их разработки были получены важные эмпирические результаты по моделированию с помощью нечеткой логики процессов человеческих рассуждений и принятия решений.

## Япония — лидер в области промышленных приложений

После первых промышленных приложений в Европе Япония за короткий период времени вышла на первое место в мире по количеству устройств и механизмов, в которых были реализованы нечеткие технологии. Появление микропроцессоров и микроконтроллеров инициировало резкое увеличение бытовых приборов и промышленных установок с алгоритмами управления на основе нечеткой логики. В настоящее время в Японии запатентовано более чем 3000 соответствующих устройств в этой области. Слово "*фаззи*" (fuzzy) стало символом популярности и коммерческого успеха новых промышленных изделий в этой стране.

Имеется целый ряд обстоятельств, которые объясняют причины столь впечатляющей популярности нечеткой логики в Японии. Во-первых, нечеткая логика поддерживает разработку быстрого прототипа технического устройства с последующим усложнением его функциональности, что характерно для стиля работы японских инженеров. Во-вторых, нечеткая логическая модель более проста для понимания, чем аналогичная математическая модель на основе дифференциальных или разностных уравнений. В-третьих, нечеткие модели оказываются более простыми для своей аппаратной реализации по сравнению с классическими алгоритмами управления техническими системами.

В результате этого нечеткие технологии нашли свое применение в самых различных технических устройствах и бытовых приборах, выпускаемых японскими фирмами. Фотоаппараты и видеокамеры используют нечеткую логику, чтобы реализовать опыт фотографа в управлении этими устройствами. Например, компании Fisher и Sanyo производят нечеткие логические видеокамеры, в которых применяется нечеткая фокусировка и стабилизация изображения.

Компания Matsushita выпускает стиральную машину, в которой используются датчики и микропроцессоры с нечеткими алгоритмами управления. Датчики определяют цвет и вид одежды, количество твердых частиц, степень загрязнения, а нечеткий микропроцессор выбирает наиболее подходящую программу стирки из 600 доступных комбинаций температуры воды, количества стирального порошка и времени производственного цикла быстрого или медленного вращения и промывки.

Компания Mitsubishi объявила о выпуске первого в мире автомобиля, где управление каждой системой основано на нечеткой логике. При этом Mitsubishi также производит "нечеткий" кондиционер, который управляет изменением температуры и влажности в помещении согласно человеческому восприятию степени комфорта. Компания Nissan разработала "нечеткую" автоматическую трансмиссию и "нечеткую" противоскользкую тормозную систему и реализовала их в одном из своих последних автомобилей повышенной комфортности.

Японский город Сендай имеет метрополитен с 16 станциями, который управляется нечетким компьютером. При этом нечеткий компьютер регулирует процессы ускорения и торможения поездов метро, делая на 70% меньше ошибок, чем соответствующий человек-оператор.

На фондовом рынке Токио используется несколько трейдерских систем, основанных на нечеткой логике, которые превосходят по скоростным и динамическим характеристикам традиционные информационные системы. В Японии имеются также "нечеткие" системы управления уличным движением, "нечеткие" тостеры, "нечеткие" рисовые печи, "нечеткие" пылесосы и многие другие бытовые и технические устройства.

## Европа и США преследуют Японию

Только в начале 1990-х гг. ведущие европейские корпорации поняли, что они практически уступили Японии одну из ключевых современных технологий. С этого времени были предприняты серьезные усилия наверстать упущенные возможности в этой области. Именно в этот период в Европе появилось более 200 видов промышленных изделий и устройств, в которых были реализованы нечеткие модели. Это были, главным образом, бытовые приборы, которые характеризовались более эффективной экономией электроэнергии и водопотребления без дополнительного увеличения цены изделия. Другие промышленные приложения относились к автоматизации производства, включая управление химическими и биологическими процессами, управление станками и сборочными конвейерами, а также различные интеллектуальные датчики.

Поскольку этим приложениям сопутствовал коммерческий успех, в настоящее время нечеткая логика рассматривается как стандартный метод проектирования и получила широкое признание среди инженеров и проектировщиков. К нечетким технологиям проявляют все больший интерес компании из США, особенно те из них, кто испытывает жесткую конкуренцию со стороны фирм из Азии и Европы. Тем не менее, для американских корпораций остались открытыми целые сегменты потребительского рынка.

Например, нечеткая логика оказалась превосходным инструментом для разработки систем управления внутренними компонентами персональных компьютеров, а также алгоритмов компрессии речи и видео. Так, например, в системной плате MSI K7T Pro 266 Master-R используется система интеллектуального разгона микропроцессора Fuzzy Logic™3, которая автоматически выбирает частоту системной шины и процессора в зависимости от температуры и рабочей нагрузки базовых компонентов персонального компьютера.

Известны приложения из области теле- и радиосвязи, направленные на устранение влияния отраженных ТВ-сигналов и радиосигналов. Предложены и реализованы программные алгоритмы для сетевой маршрутизации и распознавания речи на основе нечеткой логики. Следует учитывать и другое важное обстоятельство — в настоящее время в США развернуты серьезные исследования по нейро-сетевым технологиям. Все эксперты соглашаются с тем, что комбинация нейронных сетей и нечеткой логики будет следующим серьезным шагом в дальнейшем прогрессе высоких технологий.

Сегодня количество технических изделий и программных средств, включая новые патенты, продолжает быстро расти. Поэтому, чтобы остаться конкурентоспособными, многие американские компании начинают свои собственные внут-

ренные нечеткие проекты. Хотя информации о подобных проектах недостаточно, можно отметить ассигнования Министерства обороны США на исследования в области построения систем управления вооружением и тренажеров для обучения пилотов истребителей на основе нечетких технологий. Национальное управление по аэронавтике и космонавтике (НАСА) предполагает использовать нечеткие модели для решения специальных задач в космосе.

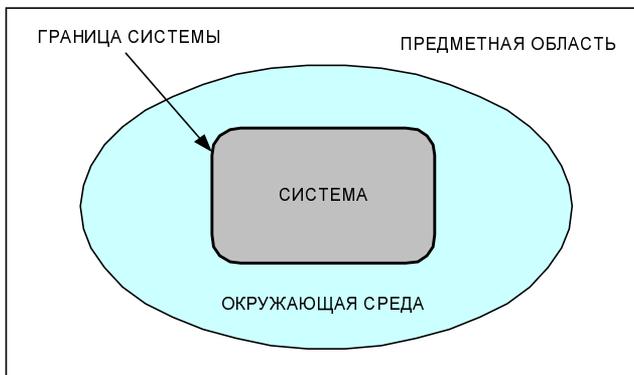
Таким образом, можно сделать вывод, что область приложений теории нечетких множеств и нечеткой логики с каждым годом продолжает неуклонно расширяться. При этом процесс разработки и применения нечетких моделей тесно взаимосвязан с концепцией системного моделирования как наиболее общей методологией построения и использования информационных моделей сложных систем различной физической природы. Именно поэтому изложению методов нечеткого моделирования предшествует рассмотрение основных особенностей методологии системного моделирования, в контексте которой возможна разработка наиболее адекватных и эффективных информационных моделей сложных систем.

## 1.2. Методология системного моделирования

Системный анализ и системное моделирование имеют более давнюю историю, чем теория нечетких множеств. Центральным понятием системного моделирования является само понятие *система*, под которой понимается совокупность объектов, компонентов или элементов произвольной природы, образующих некоторую целостность в том или ином контексте. Определяющим принципом рассмотрения некоторой совокупности объектов как системы является появление у нее новых свойств, которых не имеют составляющие ее элементы. Значимость этого принципа проявляется в том, что он получил даже специальное название — принцип *эмерджентности* (от англ. *emergence* — появление, выявление).

Системы различной физической природы окружают нас повсеместно — это и конкретные предметы и объекты: солнечная система, человек, персональный компьютер, автомобиль, самолет, аэропорт. Это и более абстрактные сущности, такие как компьютерная программа, естественный язык, коммерческая фирма, культура, политика, наука, экономика. Наиболее ортодоксальная точка зрения предполагает, что все окружающие нас предметы являются системами.

При рассмотрении той или иной системы исходным этапом ее изучения является определение ее *границы*. Речь идет о необходимости разделения всех элементов на два класса: принадлежащих и не принадлежащих системе. При этом те сущности или объекты, которые собственно принадлежат системе, и будут являться ее элементами. Напротив, не принадлежащие системе объекты, но оказывающие на нее то или иное влияние, образуют *среду* или внешнюю по отношению к системе предметную область. Традиционно одним из принципов системного анализа являлось предположение о том, что граница системы *четко* разделяет элементы системы и ее внешнюю среду (рис. 1.1).



**Рис. 1.1.** Общее представление системы и окружающей среды в контексте традиционного системного анализа

Важнейшими характеристиками любой системы являются ее структура и процесс функционирования. Под *структурой системы* понимают устойчивую во времени совокупность взаимосвязей между ее элементами или компонентами. Именно структура системы связывает воедино все элементы и препятствует распаду системы на отдельные компоненты. Структура системы может отражать самые различные взаимосвязи, в том числе, и вложенность элементов одной системы в другую. В этом случае принято называть более мелкую или вложенную систему *подсистемой*, а более крупную систему — *метасистемой*.

*Процесс функционирования* системы тесно связан с изменением свойств системы или отдельных ее элементов во времени. При этом важной характеристикой системы является ее *состояние*, под которым понимается совокупность свойств или признаков системы, которые в каждый момент времени отражают наиболее существенные особенности поведения системы.

Рассмотрим следующий пример. В качестве системы рассмотрим такой объект, как "Автомобиль". Границы этой системы четко ограничены теми компонентами, которые размещаются в корпусе отдельного автомобиля. При этом такой объект, как двигатель является элементом системы "Автомобиль". С другой стороны, двигатель сам является системой, которая состоит из отдельных компонентов, таких как блок цилиндров, свечи зажигания и др. Поэтому система "Двигатель" в свою очередь является подсистемой системы "Автомобиль". Система охлаждения двигателя и система электрооборудования также будут являться подсистемами "Автомобиль".

Структура системы может быть описана с разных точек зрения. Наиболее общее представление о структуре дает схема устройства той или иной системы. При этом взаимодействие элементов может носить не только механический, электрический или биологический характер, но и информационный, что характерно для современных организационно-технических систем. Состояние системы также можно рассматривать с различных точек зрения, наиболее общей из которых

является рассмотрение особенностей функционирования или эксплуатации той или иной системы.

*Процесс функционирования* системы отражает поведение системы во времени и может быть представлен как последовательное изменение ее состояний. Если система изменяет одно свое состояние на другое состояние, то принято говорить, что система *переходит* из одного состояния в другое. Совокупность признаков или условий изменения состояний системы в этом случае называется *переходом*. Для системы с дискретными состояниями процесс функционирования может быть представлен в виде последовательности состояний с соответствующими переходами.

При рассмотрении движущегося по трассе автомобиля можно выделить различные характеристики его состояния. Это, прежде всего, скорость движения автомобиля, угловое положение передних колес относительно продольной оси, температура охлаждающей жидкости, количество топлива в баке и другие. Изменение значений этих характеристик могут привести к изменению состояний автомобиля, в частности, к изменению его скорости и направления движения.

Методология системного моделирования служит концептуальной основой системно-ориентированной структуризации предметной области. В этом случае исходными компонентами концептуализации являются системы и взаимосвязи между ними. Результатом системного моделирования является построение некоторой модели системы и соответствующей предметной области, которая описывает важнейшие с точки зрения решаемой проблемы аспекты системы.

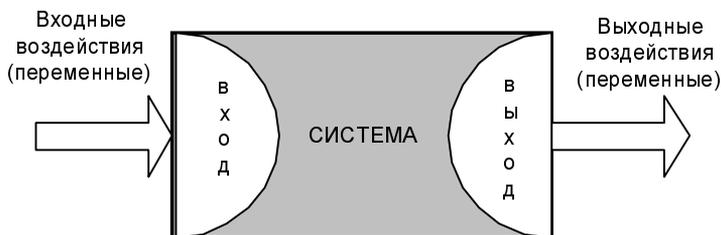
Под *моделью* будем понимать некоторое представление о системе, отражающее наиболее существенные закономерности ее структуры и процесса функционирования и зафиксированное на некотором языке или в некоторой форме. Применительно к теме нашего рассмотрения нас будут интересовать только такие аспекты построения моделей, которые связаны с информационным или логическим моделированием систем.

Примерами моделей являются не только известные физические модели (аэродинамическая модель гоночного автомобиля или проектируемого самолета), но и логические модели различных систем (математическая модель колебательной системы, аналитическая модель системы электроснабжения региона, информационная модель избирательной компании и др.).

Общим свойством всех моделей является их подобие некоторому реальному объекту или системе-оригиналу. Важность построения моделей заключается в возможности их использования для получения информации о свойствах или поведении системы-оригинала. При этом сам процесс построения и последующего применения моделей для получения информации о системе-оригинале является основным содержанием процесса *системного моделирования*.

Наиболее общей информационной моделью системы является так называемая модель "*черного ящика*". В этом случае система представляется в виде прямоугольника, внутреннее устройство которого скрыто от системного аналитика или вообще неизвестно. Однако система не является полностью изолированной от внешней среды, поскольку последняя оказывает на систему некоторые ин-

формационные или материальные воздействия. Такие воздействия получили название *входных воздействий* или *входных параметров*, *входных переменных*. Среди входных воздействий выделяют специальный класс — так называемых *управляющих воздействий* (*переменных*). Последние предназначены для того, чтобы оказывать на систему целенаправленное воздействие, предназначенное для достижения системой некоторой цели (целей) или желаемого поведения. В свою очередь система также оказывает на среду или другие системы определенные информационные или материальные воздействия, которые получили название *выходных воздействий* (*параметров*, *переменных*). Графически данная модель может быть изображена следующим образом (рис. 1.2).



**Рис. 1.2.** Графическое изображение модели системы в виде "черного ящика"

Ценность моделей, подобных модели "черного ящика", весьма условна. Основное ее назначение состоит в том, чтобы структурировать исходную информацию относительно самой системы и внешней по отношению к ней среды. Поэтому эта модель, прежде всего, фиксирует упоминавшиеся выше границы системы. В дополнение к этому модель специфицирует воздействия, на которые реагирует система, и как проявляется эта реакция на окружающие объекты и системы. При этом в случае количественного описания входных (выходных) воздействий их иногда называют входными (выходными) переменными. В рамках системного моделирования разработаны определенные методологические средства, позволяющие выполнить дальнейшую структуризацию или концептуализацию этой наиболее общей модели системы.

В самом общем случае процесс системного моделирования может быть представлен в форме взаимосвязанных этапов, на каждом из которых выполняются определенные действия, направленные на построение и последующее использование информационно-логических моделей систем (рис. 1.3). Характерной особенностью данного процесса является его циклический или итеративный характер, который отражает современные требования к анализу и проектированию сложных систем.

Таким образом, отдельными этапами процесса системного моделирования являются:

1. Анализ проблемной ситуации.
2. Структуризация предметной области и построение модели.

3. Выполнение вычислительных экспериментов с моделью.
4. Применение результатов вычислительных экспериментов.
5. Коррекция или доработка модели.



Рис. 1.3. Общая концептуальная схема процесса системного моделирования

Ниже дается краткая характеристика каждого из этапов, конкретное содержание которых зависит от специфических особенностей решаемых задач в той или иной проблемной области. При этом каждый отдельный цикл процесса системного моделирования инициируется этапом анализа проблемной ситуации, в чем проявляется реализация требования проблемно-ориентированного подхода к построению и использованию информационно-логических моделей систем.

## Анализ проблемной ситуации

Одним из основных принципов системного моделирования является проблемная ориентация процессов построения и использования моделей. Другими словами, та или иная модель конкретной системы строится в контексте решения некоторой проблемы или достижения некоторой цели. Главное назначение первого этапа — логическое осмысление решаемой проблемы в контексте методологии системного моделирования. При этом выполняется анализ всех доступных ресурсов (материальных, финансовых, информационных и др.), необходимых для построения модели, ее использования и реализации полученных результатов с целью решения имеющейся проблемы. В случае отсутствия требуемых ресурсов на данном

этапе может быть принято решение либо о сужении (уменьшении масштаба) решаемой проблемы, либо вообще об отказе от использования средств системного моделирования. На этом этапе также выполняется анализ требований, предъявляемых в той или иной форме к результату решения проблемы.

Первоначальный анализ решаемой проблемы и соответствующей проблемной области является наименее формализуемым с точки зрения применения известных аналитических подходов и средств. Поэтому на данном этапе рекомендуется применять так называемые *эвристические* или неформальные методы системного анализа. К ним относятся:

- методы построения логистических сценариев на естественном языке для анализа возможных способов и альтернативных путей решения проблемы;
- методы мозговой атаки (штурма) для генерации новых идей и нестандартных подходов к решению проблемы;
- методы морфологического и концептуального анализа для достижения требуемой полноты рассмотрения исходной проблемы;
- методы построения и анализа дерева целей и задач, которые позволяют разбить исходную проблему на ряд более частных или более простых подпроблем.

## **Структуризация предметной области и построение модели**

Целью данного этапа является построение адекватной модели системы и соответствующей предметной области в наиболее общем контексте решения исходной проблемы. Структуризация проблемной области предполагает определение и последующее уточнение ее границ, а также установление границ и состава систем, которые потенциально могут участвовать в решении исходной проблемы. Соответствующая информация представляется в форме модели системы или проблемной области в целом на некотором формально-логическом языке.

Речь идет о том, что вся доступная информация о решении проблемы должна быть зафиксирована в виде некоторой информационно-логической модели системы. При этом модель должна удовлетворять принципу адекватности отражения основных особенностей системы-оригинала. Другими словами, модель не должна быть ни поверхностной (неполной), которая не учитывает существенные аспекты структуры или поведения системы-оригинала, ни излишне сложной или избыточной, в рамках которой разработчики пытаются учесть даже несущественные с точки зрения исходной проблемы детали системы-оригинала.

Данный этап построения информационно-логической модели предполагает выполнение следующей последовательности действий:

1. Построение концептуальной или информационной модели системы и проблемной области, которая содержит наиболее общую информацию и отражает структурные взаимосвязи системы-оригинала с другими объектами окружающей среды.

2. Построение аналитической или математической модели системы, которая детализирует отдельные аспекты структуры и поведения системы-оригинала в форме текста с использованием специальной математической нотации (символики).
3. Построение имитационной или программной модели системы, которая непосредственно реализует информационно-логическую модель в форме, специально предназначенной для ее исследования с использованием компьютеров.

### Примечание

Один из принципов системного моделирования заключается в том, что для построения адекватной модели сложной системы может потребоваться не одна, а несколько моделей системы-оригинала. В этом случае каждая из подобных моделей будет являться отдельным представлением сложной системы, а полная модель системы будет состоять из комплекса взаимосвязанных моделей. Этот принцип получил специальное название — принцип *многомодельности* системного моделирования. С точки зрения системного аналитика все частные модели системы равноправны, поэтому корректно вести речь лишь об их адекватности. При этом выбор типа модели должен зависеть от характера решаемой проблемы, а не от профессиональной специализации прикладных математиков и системных аналитиков, участвующих в решении проблемы.

Процесс разработки адекватных моделей и их последующего конструктивного применения требует не только знания общей методологии системного анализа, но и наличия соответствующих изобразительных средств или языков для фиксации результатов моделирования и их документирования. Очевидно, что естественный язык не вполне подходит для этой цели, поскольку обладает неоднозначностью и неопределенностью. Поэтому для построения моделей используются формально-теоретические методы, основанные на дальнейшем развитии математических и логических средств моделирования. Для этой цели также предложены различные графические нотации и языки моделирования, в той или иной степени отражающие специфику решаемых задач на основе применения соответствующих программных инструментариев.

## Выполнение вычислительных экспериментов с моделью

Модель системы разрабатывается для получения некоторой новой информации о системе-оригинале с целью решения исходной проблемы. В этом случае базовым объектом для получения такой информации является программная модель сложной системы, реализованная на одном из языков программирования или построенная с использованием соответствующих программных инструментариев.

Реализация данного этапа в контексте методологии системного моделирования означает выполнение серии экспериментов с программной моделью системы на той или иной вычислительной платформе. При этом возможна следующая по-