

В. В. Борисов  
В. В. Круглов  
А. С. Федулов

# Нечеткие модели и сети

*2-е издание*

Москва  
Горячая линия – Телеком  
2012

**ББК 30.17**  
**УДК 681.322**  
**Б82**

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *В. Н. Вагин*,  
 доктор техн. наук, профессор *А. И. Галушкин*

**Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С.**

**Б82** Нечеткие модели и сети. – 2-е изд., стереотип. – М.:Горячая линия–Телеком, 2012. – 284 с.: ил.  
**ISBN 978-5-9912-0283-1.**

Книга посвящена исследованию нечетких моделей, используемых для описания, анализа и моделирования сложных слабо формализуемых систем и процессов, а также вопросам построения, обучения и использования, во-первых, нечетких нейронных сетей, реализующих нечеткие продукционные, реляционные и функциональные модели, во-вторых, нейронных нечетких сетей, характеризующихся введением нечеткости в различные компоненты традиционных нейронных сетей. Рассмотрены основные разновидности нечетких моделей систем и процессов, отображаемых структурами на основе графов. Особое внимание уделено анализу способов построения, моделирования и использования нечетких когнитивных карт, реализующих расширенные возможности по анализу и моделированию сложных систем.

Для специалистов в области информатики, вычислительной техники, анализа и моделирования сложных систем и процессов, занимающихся созданием и использованием интеллектуальных систем, а также для аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

**ББК 30.17**

Адрес издательства в Интернет [WWW.TECHBOOK.RU](http://WWW.TECHBOOK.RU)

*Научное издание*

**Борисов** Вадим Владимирович  
**Круглов** Владимир Васильевич  
**Федулов** Александр Сергеевич

**НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ И СЕТИ**

*2-е издание, стереотипное*

Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 23.05.2012. Формат 60х88/16. Гарнитура Times New Roman.  
 Тираж 200 экз. (1-й завод 100 экз.) Уч.-изд. л. 18. Изд. № 120283.

ISBN 978-5-9912-0283-1

© В. В. Борисов, В. В. Круглов,  
 Федулов А. С., 2007, 2012

© Издательство «Горячая линия–Телеком», 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Нечеткое моделирование не является альтернативой различным подходам к моделированию сложных систем и процессов, а прежде всего предоставляет эффективные методы и средства для их изучения в следующих основных сферах применения.

Во-первых, недостаточность или неопределенность знаний об исследуемой системе, когда получение требуемой информации является сложной, трудоемкой, дорогостоящей или вовсе невозможной задачей. При этом четкие модели не могут быть получены либо они являются слишком сложными для практического использования. Значимая же часть информации об этих системах доступна в виде экспертных данных или в эвристическом описании процессов функционирования. Эта информация может быть нечеткой и недостаточно определенной для того, чтобы быть выраженной математическими зависимостями. Кроме того, информация о системе может быть разнокачественной, а оценка значений параметров – проводиться с помощью различных шкал. Однако зачастую возможно описать функционирование этих систем в виде эвристических предпочтений, используя конструкции естественного языка в форме нечетких правил или отношений различного типа. Другой аспект неопределенности знаний о системе связан с неясностью или нечеткостью выделения и описания границы системы или отдельных ее состояний, а также входных и выходных воздействий.

Во-вторых, адекватная обработка неопределенной информации, если параметры и входные данные не являются точными и корректно представленными. Часто традиционные методы не только не позволяют адекватно обработать данные, но также не позволяют учесть естественно присущую этим данным неопределенность. Нечеткая логика и теория нечетких множеств являются одним из эффективных подходов к решению данной проблемы.

В-третьих, «прозрачное» моделирование и идентификация реальных систем, которые являются нелинейными в своей основе и не могут быть представлены моделями, использующими существующие методы идентификации. В последнее время серьезное внимание уделяется развитию методов идентификации нелинейных систем на основе экспериментальных данных. Однако, сравнивая нечеткие модели с другими известными методами, например с искусственными нейронными сетями, можно отметить их большую прозрачность, которая возможна благодаря их лингвистической интерпретации в виде нечетких продукционных правил.

# СОДЕРЖАНИЕ

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ЧАСТЬ I. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ....	6
Глава 1. ПОНЯТИЕ СИСТЕМЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ.....	6
1.1. Понятие и определения системы.....	6
1.2. Классификация систем .....	7
Глава 2. КЛАССИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ.....	10
Глава 3. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ .....	16
3.1. Области применения нечеткого моделирования .....	16
3.2. Классификация нечетких моделей .....	20
3.3. Интеграция нечетких и нейронных сетей.....	21
ВЫВОДЫ .....	22
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	23
ЧАСТЬ II. НЕЧЕТКИЕ ПРОДУКЦИОННЫЕ И РЕЛЯЦИОННЫЕ МОДЕЛИ.....	25
Глава 4. НЕЧЕТКИЕ ПРОДУКЦИОННЫЕ МОДЕЛИ .....	25
4.1. Компоненты нечетких продукционных моделей.....	25
4.2. Способы нечеткого вывода.....	26
4.3. Создание базы нечетких продукционных правил.....	32
4.4. Введение нечеткости .....	49
4.5. Агрегирование степени истинности предпосылок правил .....	50
4.6. Активизация заключений правил.....	52
4.7. Аккумуляция активизированных заключений правил .....	54
4.8. Приведение к четкости.....	54
4.9. Параметрическая оптимизация конечной базы нечетких правил.....	60
Глава 5. АЛГОРИТМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА .....	62
5.1. Алгоритм нечеткого вывода Мамдани .....	62
5.2. Алгоритм нечеткого вывода Ларсена .....	65
5.3. Алгоритм нечеткого вывода Цукамото .....	66
5.4. Упрощенный алгоритм нечеткого вывода.....	68

5.5. Алгоритм нечеткого вывода Такаги–Сугэно.....	69
5.6. Алгоритм нечеткого вывода на основе нечеткой продукционной модели с адаптацией операций над нечеткими множествами .....	71
5.7. Аппроксимационные свойства нечетких продукционных моделей .....	75
<b>Глава 6. НЕЧЕТКИЕ РЕЛЯЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И РЕЛЯЦИОННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ .....</b>	<b>83</b>
6.1. Нечеткие реляционные модели .....	83
6.2. Реляционное представление нечеткого вывода с использованием отдельных правил .....	84
6.3. Реляционное представление нечеткого вывода с использованием базы правил .....	87
6.4. Подобие нечетких реляционных и продукционных моделей .....	88
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>90</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>91</b>
<b>ЧАСТЬ III. НЕЧЕТКИЕ НЕЙРОННЫЕ ПРОДУКЦИОННЫЕ СЕТИ .....</b>	<b>95</b>
<b>Глава 7. НЕЧЕТКИЕ НЕЙРОННЫЕ ПРОДУКЦИОННЫЕ СЕТИ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПРАВИЛ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ .....</b>	<b>97</b>
7.1. Нечеткие нейронные продукционные сети типа ANFIS .....	97
7.2. Нечеткая нейронная продукционная сеть Ванга–Менделя.....	105
7.3. Нечеткая нейронная продукционная сеть Такаги–Сугэно–Канга .....	113
<b>Глава 8. НЕЧЕТКИЕ НЕЙРОННЫЕ ПРОДУКЦИОННЫЕ СЕТИ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ КОМПОНЕНТОВ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>119</b>
8.1. Построение функций принадлежности предпосылок и заключений нечетких продукционных правил .....	119
8.2. Формирование предпосылок нечетких продукционных правил .....	120
8.3. Формирование заключений нечетких продукционных правил .....	123
8.4. Разбиение пространств входных переменных и формирование многомерных функций принадлежности предпосылок .....	126

8.5. Нечеткие продукционные сети с представлением структуры в виде нейронных сетей .....	129
ВЫВОДЫ .....	131
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	133
 ЧАСТЬ IV. НЕЙРОННЫЕ НЕЧЕТКИЕ СЕТИ.....	134
Глава 9. НЕЙРОННЫЕ НЕЧЕТКИЕ СЕТИ С ВВЕДЕНИЕМ НЕЧЕТКОСТИ В СТРУКТУРУ .....	135
Глава 10. НЕЙРОННЫЕ НЕЧЕТКИЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ НЕЙРОНОВ.....	141
Глава 11. ГИБРИДНЫЕ НЕЙРОННЫЕ НЕЧЕТКИЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОНОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ НЕЧЕТКИЕ ОПЕРАЦИИ.....	145
11.1. Нейроны, реализующие нечеткие операции .....	146
11.2. Примеры построения и использования гибридных нейронных нечетких сетей.....	148
Глава 12. ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННЫХ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ.....	173
12.1. Использование нейронных сетей с обучением с обратным распространением ошибки для реализации нечетких моделей.....	175
12.2. Обучение нейронных нечетких сетей типа 2 с нечеткими входами и выходами и четкими весами.....	178
12.3. Обучение нейронных нечетких сетей типа 3 с нечеткими входами, выходами и весами.....	181
Глава 13. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ СЕТЕЙ В НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ .....	185
ВЫВОДЫ .....	190
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	191
 ЧАСТЬ V. НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ С ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ГРАФОВ.....	195
Глава 14. НЕЧЕТКИЕ АВТОМАТЫ .....	195
14.1. Основные понятия, классификация нечетких автоматов.....	195
14.2. Обучение нечетких автоматов.....	201
Глава 15. НЕЧЕТКИЕ СЕТИ ПЕТРИ .....	202
15.1. Основные понятия, классификация нечетких сетей Петри .....	203
15.2. Нечеткие сети Петри с нечеткостью задания начальной маркировки.....	205

15.3. Нечеткие сети Петри с нечеткостью задания начальной маркировки и срабатывания переходов.....	209
15.4. Нечеткие сети Петри с нечеткостью задания начальной маркировки, времен задержки маркеров в позициях и времен срабатывания активных переходов .....	212
15.5. Задачи анализа свойств нечетких сетей Петри .....	216
Глава 16. НЕЧЕТКИЕ СИТУАЦИОННЫЕ СЕТИ .....	218
16.1. Формирование нечеткой ситуационной сети .....	219
16.2. Задачи моделирования процессов управления на основе нечетких ситуационных сетей .....	226
Глава 17. НЕЧЕТКИЕ КОГНИТИВНЫЕ КАРТЫ.....	230
17.1. Задачи построения и анализа когнитивных карт .....	231
17.2. Обзор способов построения и анализа когнитивных карт .....	232
17.3. Обучение нечетких когнитивных карт .....	249
17.4. Динамическое моделирование с помощью когнитивных карт .....	250
17.5. Требования к обобщенному представлению и анализу нечетких когнитивных карт.....	252
17.6. Обобщенные нечеткие продукционные когнитивные карты ..	253
17.7. Нечеткие реляционные когнитивные карты.....	261
ВЫВОДЫ.....	275
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	275