

НЕЧЕТКИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ

А.А. Суконщиков, Д.В. Кочкин, А.Н. Швецов

# НЕЧЕТКИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ

МОНОГРАФИЯ

Рассматриваются новые расширения сетей Петри – нечеткие и нейронные сети, исследуемые применительно к моделям функционирования компонентов информационно-телекоммуникационных систем и сетей с использованием интеллектуальных программных агентов. Исследуются формально-математические модели сетевых устройств на основе нечетких и нейронных моделей. Излагаются результаты экспериментальных исследований разработанных моделей, полученные средствами программного пакета CPN TOOLS. Монография может быть полезна инженерам, аспирантам и студентам при изучении и проектировании интеллектуальных телекоммуникационных систем и сетей. Монография отражает результаты последних исследований, выполненных в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Вологодской области (проект № 18-47-350001 р\_а) и гранта РФФИ №19-01-00103.



Курск  
ЗАО «Университетская книга»  
2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.А. Суконщиков, Д.В. Кочкин, А.Н. Швецов

# НЕЧЕТКИЕ И НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ

МОНОГРАФИЯ

Курск  
ЗАО «Университетская книга»  
2019

УДК 681.324  
ББК 32.973.202  
Р 35

Рецензенты:

*Е.В. Ершов*, д-р техн. наук, профессор,  
Череповецкий государственный университет

*А.С. Пешков*, канд. техн. наук, доцент

Авторы:

А.А. Суконщиков, Д.В. Кочкин, А.Н. Швецов

Под ред. А.А. Суконщикова и А.Н. Швецова

Р 35 **Нечеткие и нейронные сети Петри**: монография / А.А. Суконщиков, Д.В. Кочкин, А.Н. Швецов; под ред. А.А. Суконщикова и А.Н. Швецова. – Курск: Изд-во ЗАО "Университетская книга", 2019. – 209 с.

ISBN 978-5-907138-77-3

Рассматриваются новые расширения сетей Петри – нечеткие и нейронные сети, исследуемые применительно к моделям функционирования компонентов информационно-телекоммуникационных систем и сетей с использованием интеллектуальных программных агентов. Исследуются формально-математические модели сетевых устройств на основе нечетких и нейронных моделей. Излагаются результаты экспериментальных исследований разработанных моделей, полученные средствами программного пакета CPN TOOLS.

Монография может быть полезна инженерам, аспирантам и студентам при изучении и проектировании интеллектуальных телекоммуникационных систем и сетей.

Монография отражает результаты последних исследований, выполненных в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Вологодской области (проект № 18-47-350001 р\_а) и гранта РФФИ №19-01-00103.

УДК 681.324  
ББК 32.973.202

ISBN 978-5-907138-77-3

© Суконщиков А.А.,  
Кочкин Д.В., Швецов А.Н., 2019

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

**ПРЕДИСЛОВИЕ** ..... 5

**1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ** ..... 8

1.1. Классификация нечетких сетей Петри ..... 12

**2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТА НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ** ..... 16

2.1. Разработка нового подкласса нечетких сетей Петри типа С1 ..... 16

2.2. Моделирование оценки текущих ситуаций в ситуационных стратах СИАМ на основе НСП типа С1 ..... 20

2.3. Представление нечетких продукционных правил на базе разработанного класса нечетких сетей Петри ..... 32

2.4. Представление событий и ресурсов на базе разработанной нечеткой сети Петри ..... 38

**3. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ** ..... 46

3.1. Свойства различных классов сетей Петри в аппарате МНСП ..... 47

3.2. Модифицированные нечеткие сети Петри ..... 53

**4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ С1** ..... 72

**5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ** ..... 77

**6. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ** ..... 82

**7. МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА БАЗЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ В CPN TOOLS** ..... 95

**8. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КЛАССА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ** ..... 127

8.1. Графическое описание нейронных сетей Петри ..... 138

8.2. Методы исследования и обучения нейронных сетей ..... 139

**9. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ** ..... 143

9.1. Применение нейронных сетей ..... 143

9.2. Исследование разработанных моделей ..... 147

9.3. Анализ результатов исследования моделей ..... 155

9.4. Разработка инструкций для пользователя и администратора ..... 159

**10. ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПЕТРИ В CPN TOOLS** ..... 166

**11. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКО-НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПЕТРИ В CPN TOOLS** ..... 181

**ЛИТЕРАТУРА** ..... 195

## Предисловие

Уважаемый читатель!

В названии нашей книги стоит имя Карла Адама Петри (Carl Adam Petri – 1926-2010), бывшего почетного профессора Гамбургского университета, основателя важного теоретического и прикладного направления компьютерной науки XX века, получившего свое название по имени создателя – сети Петри (Petri nets). Созданный им формализм применим в широком диапазоне разных областей современной науки – от математики и физики до промышленных приложений и программных комплексов.

Сетям Петри посвящено огромное количество исследований (более 11000 статей и книг по данным 2010 года) и множество научных конференций. Как отмечал сам К. Петри, графическая нотация, ставшая теперь хрестоматийной, пришла ему в голову в возрасте 13 лет, когда он пытался визуализировать химические процессы каталитической активности.

Впоследствии эти идеи получили научное оформление в докторской диссертации К. Петри "Kommunikation mit Automaten", защищенной в 1962 г. в Техническом университете Дармштадта.

В последующие годы были разработаны многочисленные модификации и расширения сетей Петри: ординарные, автоматные, синхронные, ингибиторные, предикатные, самомодифицируемые, предикатно-переходные, вложенные, временные, E-сети, иерархические, стохастические, информационные и другие.

В данной монографии исследуются и разрабатываются новые расширения сетей Петри – нечеткие и нейронные сети. Нечеткие сети Петри были введены в работах Tadao Murata в середине 90-х годов и потребовались для описания и моделирования систем, параметры и поведение которых сложно формализовать более традиционными методами. Распределенные информационно-телекоммуникационные системы обладают такими свойствами и

поэтому могут исследоваться с позиций формализма нечетких сетей Петри.

Нейронные сети Петри впервые предложены и исследованы в работах авторов этой монографии – А.А. Суконщикова и Д.В. Кочкина в период 2005-2010 г.г.

В представляемой читателю книге математические модели и методы построения нечетких и нейронных сетей Петри развиваются и расширяются применительно к созданию агентно-ориентированных моделей, позволяющих формализовать и исследовать процессы функционирования и развития интеллектуальных распределенных систем и сетей распределенных вычислений, передачи и обработки информации и знаний в современном информационном мире.

В основу монографии положены результаты научных исследований, проводимых коллективом научно-образовательного центра "Интеллектика" Вологодского государственного университета. Материалы данной книги являются результатом фундаментальных научно-исследовательских работ по грантам Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Вологодской области №18-47-350001 р\_а "Модели и методы построения нейро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах" и №19-01-00103 "Модели и методы построения информационно-телекоммуникационных систем на основе сообществ самоорганизующихся нейро-нечетких интеллектуальных агентов".

Монография ориентирована на студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата и магистратуры 09.03.01 и 09.04.01 "Информатика и вычислительная техника", 09.03.02 и 09.04.02 «Информационные системы и технологии», 09.03.03 "Прикладная информатика", 09.03.04 и 09.04.04 "Программная инженерия", 27.03.04 "Управление в технических системах" в которых предусмотрено формирование компетенций в области искусственного

интеллекта и интеллектуальных систем управления и обработки информации. Авторы надеются, что материалы, представленные в книге, стимулируют научный поиск молодых ученых и аспирантов, а также вызовут интерес у сложившихся специалистов в области информационно-телекоммуникационных систем и сетей и интеллектуальных технологий.

Авторы благодарят рецензентов – профессора доктора технических наук *Евгения Валентиновича Ершова*, и доцента кандидата технических наук *Александра Станиславовича Пешикова*, за ценные замечания и поддержку.

## 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Эффективные решения в распределенных интеллектуальных СППР разных предметных областей, требуют оперативного учета множества часто противоречивых факторов. К ним в первую очередь следует отнести: нечеткий характер взаимодействующих динамических процессов и пространства их состояний; сложное параллельно-последовательное взаимодействие процессов в условиях неопределенности; значительная сложность реализуемых задач; значительный удельный вес человеческого фактора, который во многом определяет качество и уровень решений. Для решения данных задач применяется в настоящее время искусственный интеллект (ИИ), который включает следующие основные направления: искусственные нейронные сети; нечеткие системы; генетические алгоритмы; нейро-нечеткие системы; нечетко-нейронные гибридные системы; мультиагентные системы. Основными областями использования систем ИИ на сегодня являются: моделирование, анализ, управление развитием и прогнозированием для сложных динамических объектов, функционирующих в условиях неопределенности.

В настоящее время существует значительное количество работ, исследований, моделей, методов и программных продуктов, которые с разной степенью эффективности решают различные аспекты создания систем и подходов на основе ИИ. Наиболее существенные результаты в этой области сформулированы трудами Л. Заде, В.М. Глушкова, А.Н. Борисова, А.А. Павлова, Д.А. Поспелова, Р.Р. Ягера, Д. Дюбуа, Ф. Гомиде, А. Кофмана, Х.-П. Липпа, Э. Мамдани, М. Мидзумото, Т. Мураты, К.С. Нарендры, В. Педрича, Х. Прада, М. Сугено и других.

Однако задачи комплексного обеспечения адекватного представления взаимодействующих динамических нечетких процес-