

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Моисеевой Татьяны Александровны «Методы генерации баз знаний нечетких продукционных систем с использованием процедур кластеризации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.1 «Искусственный интеллект и машинное обучение».

### 1. Актуальность темы исследования

Важнейшим классом систем искусственного интеллекта являются нечеткие системы продукционного типа. Они представляют собой обобщение классических продукционных систем. Их особенность заключается в том, что для описания поведения моделируемой системы или объекта используется нечеткая лингвистическая аппроксимация, основанная либо на знаниях экспертов, либо на анализе данных, полученных в процессе наблюдения или эксперимента.

На вычислительном уровне такие системы можно рассматривать как гибкую математическую структуру, способную аппроксимировать сложные (в том числе нелинейные) зависимости с высокой степенью точности за счет использования естественного языка в форме нечетко-продукционных правил с соответствующими механизмами нечеткого логического вывода. При этом база нечетко-продукционных правил представляет собой главную составляющую «интеллекта», а ее качество напрямую влияет на качество решения прикладных задач.

В связи с этим особую актуальность при построении нечетких продукционных системы приобретают методы генерации баз нечетко-продукционных правил. В представленной диссертации развивается один из подходов к решению этой важной научно-технической задачи – использование методов кластеризации, позволяющих систематизировать накопленные данные и на основе выявленной структуры данных сформировать нечеткую базу знаний. Такой подход обеспечивает минимальное число правил в базе знаний и позволяет производить настройку значений параметров функций принадлежности в антецедентах нечетких правил при сохранении приемлемой точности модели. При этом считается, что функционирование построенной нечеткой системы осуществляется в основном в области сформированных кластеров, а возникновение других состояний носит случайный характер.

Эффективность такого подхода определяется количеством и качеством данных в обучающем множестве. Кластерный метод, выделяя группы данных, позволяет формировать интерпретируемые базы знаний, что важно для объяснительной компоненты интеллектуальной системы. При этом качество формируемой базы нечетких правил может быть улучшено за счет совершенствования применяемых алгоритмов кластеризации. Таким образом, тема диссертации, связанная с методами генерации нечетких баз знаний продукционного типа на основе кластеризации анализируемых данных, является актуальной и соответствует современным тенденциям развития в области инженерии знаний и искусственного интеллекта.

## 2. Краткая характеристика содержания диссертации и ее основных научных и прикладных результатов

Диссертация изложена на 175 страницах машинописного текста, включает 55 рисунков, 22 таблицы, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 190 наименований и двух приложений, включающих копии трех актов о внедрении и двух свидетельств о регистрации разработанных программ для ЭВМ.

В диссертации исследуется подход и предлагается новое решение для генерации баз знаний нечетких продукционных систем с использованием алгоритмов кластеризации. Процедура генерации включает следующие шаги: предобработка данных, кластеризация пространства входных и/или выходной переменных, аппроксимация данных, формирование базы нечетких правил на основе выбранной модели, оптимизация и оценка качества базы правил. Фокус исследования направлен на рассмотрение процедур кластеризации и последующей аппроксимации данных для формирования нечетких продукционных правил. Значительное внимание уделено совершенствованию метрических алгоритмов кластеризации за счет введения семейства новых нечетких метрик. На основе серии вычислительных экспериментов показано их превосходство по сравнению с евклидовой метрикой, как наиболее распространенной при выполнении процедур кластеризации. Результаты эксперимента оценивались по следующим показателям качества: коэффициент энтропии, индекс Кси-Бени, коэффициент силуэта, коэффициент разбиения, эффективность разбиения. На основе значений этих показателей сформирована комплексная оценка качества кластеризации с помощью специальной функции агрегирования.

Основными результатами, характеризующимися научной новизной, являются:

- метод формирования баз нечетко-продукционных правил, в котором каждое правило формируется на основе эллипсоидов минимального объема, что позволяет улучшить качество аппроксимации анализируемых данных по сравнению с использованием матрицам ковариаций кластеров;

- семейства нечетких метрик, полученных на основе аддитивных генераторов строгих архимедовых треугольных норм из класса рациональных функций и позволяющих учитывать структуру данных при кластеризации, а также сформулированные ограничения на значения параметров треугольных норм, обеспечивающие свойства строгости;

- модель комплексной оценки качества кластеризации, основанная на использовании функций порядкового взвешенного агрегирования и позволяющая учитывать значимые значения критериев качества кластеризации;

- алгоритм формирования базы знаний классификатора электроэнцефалограмм для асинхронного интерфейса «мозг-компьютер», позволяющего распознавать состояния покоя и реального или мысленного движения верхних конечностей.

Перечисленные научные результаты реализованы в программном комплексе, отличительной особенностью которого является наличие библиотек нечетких метрик и критериев качества кластеризации. Программный комплекс позволяет ис-

пользовать различные типы правил, соответствующие лингвистической модели, модели Такаги-Сугено и модели нечеткого классификатора. В программе реализованы как предложенные, так и известные кластерные процедуры для проведения вычислительного эксперимента и сравнительного анализа. Получены два свидетельства о государственной регистрации разработанных программ для ЭВМ, представляющих собой основные модули программного комплекса.

Представленные материалы диссертации позволяют достаточно полно оценить объем, сложность и актуальность проведенного исследования.

Автореферат диссертации достаточно точно отражает основное ее содержание.

Оформление диссертации и автореферата соответствует ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». М.: Стандартинформ, 2018, а также приказу Министерства науки и высшего образования РФ от 7 июня 2021 г. № 458 «О внесении изменений в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093».

### **3. Соответствие паспорту научной специальности 1.2.1**

Анализ научных результатов диссертации позволяет утверждать, что она соответствует паспорту научной специальности 1.2.1 «Искусственный интеллект и машинное обучение» по следующим пунктам:

- п. 5 «Методы и технологии поиска, приобретения и использования знаний и закономерностей, в том числе – эмпирических, в системах искусственного интеллекта. Исследования в области совместного применения методов машинного обучения и классического математического моделирования. Методы и средства использования экспертных знаний»;

- п. 15 «Математические исследования в области статистики, логики, алгебры, топологии, анализа функций и других областях, ориентированные на решение задач искусственного интеллекта и машинного обучения».

### **4. Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяется корректным использованием математического аппарата, согласованностью теоретических умозаключений с результатами экспериментов. Использование эллипсоидов минимального объема позволило повысить точность аппроксимации по сравнению с использованием матриц ковариации в среднем на 6-7%. Алгоритм построения эллипсоидов минимального объема, основанный на известном алгоритме Хачияна, выполнен корректно. Результаты применения нечеткого классификатора для интерфейса «мозг-компьютер» согласуются с результатами других исследователей в данной предметной области.

## **5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Теоретическая значимость полученных в диссертации результатов заключается в расширении возможностей построения нечетких продукционных систем и формирования нечетких баз знаний на основе методов интеллектуального анализа данных, направленного на выявление их структуры и извлечения из них скрытых закономерностей в виде системы нечетко-продукционных правил. Новые семейства нечетких метрик, учитывающие различные представления нечетких треугольных норм в классе рациональных функций, дополняют инструментарий машинного обучения для разработки систем искусственного интеллекта.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке многофункционального программного комплекса, реализующего предложенный метод формирования нечетко-продукционных баз знаний. Его апробация осуществлялась при реализации интерфейса «мозг-компьютер» на задаче извлечения сигналов из электроэнцефалограмм, связанных с моторными образами. Данные интерфейсы актуальны для медицинских приложений с целью восстановления двигательных функций у людей с нарушениями движения.

Практическая ценность диссертационного исследования подтверждается тем, что его результаты внедрены в деятельность финансовой компании «ООО ФПК Альфа», а также используются при проведении исследования в лаборатории медицинской кибернетики Воронежского государственного университета. Теоретические результаты используются в учебном процессе и при выполнении выпускных квалификационных работ студентами указанного университета. Внедрения подтверждаются соответствующими актами, копии которых представлены в диссертации.

## **6. Заключение о соответствии критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней**

Диссертация Моисеевой Т.А. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований предложены процедуры обработки данных, обеспечивающие генерацию нечетко-продукционных баз знаний с улучшенными аппроксимационными свойствами на основе методов кластеризации.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, составляющие личный вклад автора в науку. Метод формирования базы нечетких правил расширяет возможности приложения инженерии знаний и искусственного интеллекта к различным прикладным задачам, позволяя обобщать и использовать накопленный опыт их решения. Предложенное и исследованное семейство нечетких метрик дополняет инструментарий метрических алгоритмов кластеризации и позволяет за счет настройки значений параметров учитывать характер анализируемых данных. Кроме того, предложенные нечеткие метрики являются основой для дальнейшего построения нечетких метрических пространств.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 13 работах, в том числе в 5 статьях в журналах из Перечня ВАК, в 4 статьях в изданиях, индексируемых в Scopus, в 4 статьях в материалах конференций. Количество единоличных публикаций (с учетом двух свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ) – 4. Требование по количеству публикаций выполнено в полном объеме.

В диссертации приведены ссылки на авторов и/или источник заимствования материалов. Список использованных источников включает 190 наименований.

## 7. Замечания по диссертационной работе

1. В названии диссертации термин «методы» используется во множественном числе, хотя в работе предложен только один метод формирования баз нечетких продукционных правил. Видимо, автор диссертационного исследования под «методами» понимает не только предложенный метод, но и другие методы, которые были проанализированы и усовершенствованы в ходе выполнения исследования. Однако целесообразнее было бы использовать этот термин в единственном числе в соответствии с полученным в работе результатом.

2. При формулировке первой задачи диссертации автор допустил лингвистическую неточность, используя термин «проблема». В работе решается «научная задача», связанная с генерацией баз знаний нечетких продукционных систем. «Проблемы» рассматриваются только в докторских диссертациях.

3. В перечень решаемых задач целесообразно было бы включить задачу разработки и исследования метода формирования баз нечетких продукционных правил, так как этот метод составляет научную новизну диссертационного исследования и является результатом, выносимым на защиту. Вместо этого в диссертации решается задача разработки процедур автоматического формирования баз знаний.

4. В аналитическом разделе диссертации недостаточное внимание уделено технологиям нейронечеткого моделирования, широко используемым для формирования баз знаний мягких экспертных систем. При этом в литературном источнике под номером 73 допущена опечатка в инициалах известного российского ученого, являющегося основоположником этого научного направления.

5. Представленная на рисунке 1.3 схема больше соответствует системе нечеткого логического вывода Мамдани, а не в целом нечетким продукционным системам, так как в большинстве таких систем блок дефаззификации отсутствует.

6. В заключении диссертационной работы отсутствует привычная фраза: «Таким образом, все поставленные задачи решены, цель работы достигнута».

7. В автореферате первая глава диссертации представлена излишне лаконично и не позволяет судить о современном состоянии в области формирования баз знаний нечетких продукционных систем.

Указанные замечания не снижают теоретической и практической значимости результатов диссертационного исследования, носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

## 8. Общий вывод

Диссертационная работа Моисеевой Т.А. представляет собой завершенное самостоятельно выполненное исследование, в котором содержится решение актуальной научной задачи, имеющей значение для развития инженерии знаний и систем искусственного интеллекта. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.2.1 «Искусственный интеллект и машинное обучение», обладает внутренним единством и практической значимостью, содержит новые научные результаты, успешно используемые в практической деятельности. Диссертация написана грамотным техническим языком. В ее тексте приведены ссылки на использованные источники. Соискатель имеет достаточное число публикаций по теме диссертации.

Таким образом, диссертация «Методы генерации баз знаний нечетких производственных систем с использованием процедур кластеризации» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 16.10.2024), а ее автор, Моисеева Татьяна Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.1 «Искусственный интеллект и машинное обучение».

Официальный оппонент:

профессор кафедры систем информационной безопасности ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», д.т.н., профессор

Катасёв Алексей Сергеевич

«05» августа 2025 г.

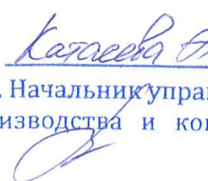
Докторская диссертация защищена по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

*Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.*

Почтовый адрес: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10

Телефон: +7 (927) 408-94-68

E-mail: ASKatasev@kai.ru

Подпись  заверяю. Начальник управления делопроизводства и контроля

