

ОТЗЫВ

официального оппонента Ходашинского Ильи Александровича 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

Актуальность

В Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, утверждённой Указом Президента РФ от 10.10.2019 №490, указано, что основополагающими принципами развития и использования технологий искусственного интеллекта являются объяснимость его работы и процесса достижения им результатов, а также прозрачность применяемых алгоритмов. В критически важных приложениях, где неправильное решение может привести к опасным для жизни ситуациям или экономическим потерям, существует потребность в интерпретируемых моделях машинного обучения, которые могут быть проанализированы и проверены экспертами-людьми. Поскольку нечёткие продукционные системы оперируют знаниями о проблемной области в терминах простых условных утверждений, которые пользователи могут понимать, интерпретировать и редактировать, считается, что методы нечёткой классификации и аппроксимации отвечают требованиям прозрачности и объяснимости. Нечёткие продукционные системы могут быть построены двумя способами: на основе экспертных знаний и на основе ретроспективных данных. Системы на основе экспертных знаний обладают хорошей интерпретируемостью и, как правило, невысокой точностью. Системы на основе данных при соответствующей оптимизации параметров базы правил могут обладать достаточно высокой эффективностью по двум приведенным выше критериям. Диссертационное исследование Т.А. Моисеевой, направленное на разработку интерпретируемых прогностических моделей, является актуальным и соответствует современным тенденциям развития технологий искусственного интеллекта и машинного обучения.

Краткая характеристика содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 190 наименований и 2 приложений. Полный объем работы составляет 175 страниц, включая 55 рисунков и 22 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные задачи, научная новизна, практическая значимость результатов исследования, а также выносимые на защиту положения. **В первой**

главе проведен анализ методов построения нечётких продукционных систем и их применение в задачах кластеризации и аппроксимации. Рассмотрены существующие подходы к формированию баз знаний нечётких продукционных систем на основе обучающих данных. Перечислены методы и алгоритмы, реализующие указанные подходы. Обосновывается необходимость применения методов кластеризации генерации баз правил нечётких продукционных систем. **Во второй главе** решается задача формирования нечёткой базы правил на основе эллипсоидальной кластеризации. Построение эллипсоида минимального объема есть задача выпуклого программирования, которая с использованием функции Лагранжа и условий Куна-Таккера сводится к оптимизационной задаче, решение которой находится с помощью алгоритма Хачияна. Каждому кластеру-эллипсоиду ставится в соответствие нечёткое продукционное правило. Представлены результаты вычислительного эксперимента, целью которого является сравнение оригинального авторского алгоритма и близкого аналога – алгоритма, основанного на ковариационной матрице. Анализ результатов эксперимента показал выигрыш предложенного алгоритма при малом количества кластеров. **В третьей главе** рассматривается проблема построения новых нечётких метрик на основе аддитивных генераторов треугольных норм. Получены ограничения на параметры строгих треугольных норм из класса рациональных функций и семейство построенных на основе их аддитивных генераторов сильных нечетких метрик. Проведено исследование влияния параметров на форму поверхности метрики и выделены четыре типа поверхности, на основе которых можно осуществить выбор подходящей метрики. Результаты вычислительного эксперимента показывали преимущество использования нечетких метрик в задаче нечеткой кластеризации. **В четвертой главе** представлено программное обеспечение построения нечеткого классификатора в составе интерфейса «мозг-компьютер» для анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ) при распознавании моторных образов. Показана принципиальная возможность выделения шаблонов ЭЭГ реальных и воображаемых движений обеих рук с помощью нечёткого классификатора. **В заключении** изложены основные результаты диссертационного исследования.

Анализ содержания диссертации показал, что она является завешенной научно-квалификационной работой; последовательность изложения материала логически выстроена; автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Научная новизна полученных результатов

1. Разработан алгоритм формирования базы нечётких продукционных правил на основе эллипсоидальной кластеризации, отличительной особенностью которого является использование эллипсоидов минимального объема.

2. Предложена совокупность нечетких метрик, полученных на основе аддитивных генераторов архимедовых непрерывных треугольных норм из класса рациональных функций, отличающихся набором настраиваемых параметров, что позволяет учитывать структуру данных при использовании метрических алгоритмов кластеризации.

3. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, отличительной особенностью которого является возможность реализовать конкретный способ формирования нечёткой базы правил под решаемую задачу на основе кластерных алгоритмов.

Научные результаты диссертации соответствуют Паспорту 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 ...»; п. 15 «Математические исследования в области статистики, логики, алгебры, топологии, анализа функций и других областях, необходимых для решения задач искусственного интеллекта и машинного обучения»; п.7 «Разработка специализированного математического, алгоритмического и программного обеспечения систем искусственного интеллекта и машинного обучения ...».

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Основные научные положения и выводы, представленные в диссертационной работе, в достаточной степени обоснованы и интерпретированы. Автор корректно использует научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций.

Обоснованность и достоверность научных положений, выдвигаемых автором, обеспечивается корректным применением методологии кластерного анализа, методов нечёткого моделирования, методов оптимизации, теории нечётких треугольных норм и конорм. Основные результаты работы, полученные соискателем, не противоречат опубликованным материалам в области нечеткого моделирования. Достоверность научных результатов подтверждается их сопоставлением с результатами известных подходов. Выводы логически вытекают из материалов исследований и в полном объеме отражают поставленные задачи.

Все научные результаты опубликованы, имеются 5 публикаций в журналах из Перечня ВАК; 3 статьи опубликованы в материалах международных конференций, индексируемых Scopus; получено 2 Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации, реализация результатов исследований

Научная значимость полученных результатов заключается в развитии теории нечётких систем, в которых база правил строится на основе обучающих данных с привлечением алгоритмов кластеризации.

Практическая значимость заключается в разработке и исследовании конкретных алгоритмов и методов формирования базы правил нечётких продукционных систем. На основе полученных результатов был разработан программный комплекс, его апробация на задаче построения интерфейса «мозг-компьютер». Теоретические и практические результаты исследования были внедрены в учебный процесс Воронежского государственного университета в форме модулей, которые используются при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Инженерия знаний и проектирование баз знаний», «Методы нечеткого моделирования», «Интеллектуальные информационные технологии». Научные результаты диссертации были внедрены финансовой компанией «ООО ФПК «Альфа», а также для проведения исследований, связанных с разработкой интерфейсов «мозг-компьютер» в Лаборатории медицинской кибернетики Воронежского государственного университета.

Замечания по диссертационной работе

1. В проведенном исследовании отсутствует сравнение эффективности работы авторского алгоритма с методами построения нечётких систем, отличных от применения эллипсоидных кластеров, например, часто применяемый для построения моделей Такаги-Сугено алгоритм нечёткой регрессионной кластеризации (FCRM – fuzzy c-regression models).

2. В работе отсутствует конструктивное определение понятия «интерпретируемость». Толкование указанного понятия на страницах 23 и 76 конструктивным не является. При сравнении различных методов и моделей необходимо указывать показатель интерпретируемости наряду с точностью. Замечание относится, в частности, к таблице 1.9, где указана только точность.

3. Граничные условия треугольной нормы должны содержать следующие равенства: $T(a,0) = T(0, a) = 0$ (стр. 89, d).

4. Недостаточно полно описана методика проведения эксперимента по определению влияния различных параметров на качество кластеризации (стр.

100-104). Не указано, что есть набор данных, его структура, мерность. Что значит «7000 наборов данных, содержащих 4 кластера», отсутствует характеристика кластеров. Проведено разбиение на $K = \{2,3,4,5\}$ кластеров, а оценка приведена только для $K = 4$.

5. У часто упоминаемой в диссертации лингвистической модели есть автор – это Мамдани (Ebrahim Mamdani). В литературе по нечётким системам эти модели так и называются «модели Мамдани», «модели типа Мамдани», «нечеткие системы типа Мамдани».

6. Уточнение по поводу нечетких правил реляционного типа (стр. 16). Продукционные правил реляционного типа (relational production rule¹), введенные Рональдом Ягером (Ronald R. Yager), в antecedentной (ЕСЛИ) части указывают на выполнение некоторой связи между двумя или более переменными. Определение Рональда Р. Ягера существенно отличается от определения Татьяны Александровны Моисеевой.

В целом, представленная диссертационная работа, несмотря на отмеченные недостатки, выполнена на высоком научном и профессиональном уровне. Замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации Т.А. Моисеевой.

Заключение

Диссертационная работа Т.А. Моисеевой представляет собой завершённое научное исследование, в котором содержится новое решение актуальной задачи в области инженерии знаний – повышение эффективности формирования баз знаний нечётких продукционных систем на основе обучающих данных. Диссертация соответствует Паспорту специальности 1.2.1 «Искусственный интеллект и принятия решений», содержит новые научные результаты, обладает практической значимостью и успешно внедрена в практическую деятельность. Диссертация грамотно написана, аккуратно оформлена. Автореферат точно отражает основное содержание диссертации. В тексте диссертационной работы приведены обязательные ссылки на источники, использованные в исследовании. Соискатель имеет достаточное число публикаций.

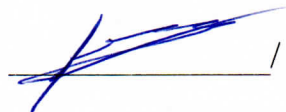
Таким образом, диссертационная работа «Методы генерации баз знаний нечетких продукционных систем с использованием процедур кластеризации» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 26.10.2023), а ее автор, Моисеева Татьяна Александровна, заслуживает

¹ Yager, R.R. The representation of fuzzy relational production rules. *Appl Intell* 1, 35-42 (1991). <https://doi.org/10.1007/BF00117744>

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение.

Официальный оппонент:

профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», доктор технических наук, профессор



/ Ходашинский Илья Александрович /

«30» июня 2025 г.

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

Даю согласие на обработку персональных данных.

Сведения об оппоненте:

ФИО: Ходашинский Илья Александрович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: профессор по кафедре автоматизации обработки информации

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Телефон: +7 952 890-53-66

Адрес электронной почты: hodashn@rambler.ru

Организация: ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Должность: профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании

Подпись *Ходашинский И.А.*

УДОСТОВЕРЯЮ

Ученый секретарь

Е.В. Герасимчук

