

На правах рукописи



Петухова Алина Владимировна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ЗАДАЧАХ
ВЫБОРА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ**

Специальность 2.3.4. Управление в организационных системах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Краснодар – 2025

Работа выполнена на кафедре анализа данных и искусственного интеллекта
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Кубанский государственный университет»
г. Краснодар (ФГБОУ ВО «КубГУ»)

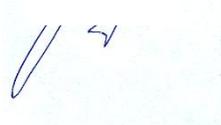
- Научный руководитель:** **Коваленко Анна Владимировна,**
доктор технических наук, доцент
- Официальные оппоненты:** **Угольницкий Геннадий Анатольевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»,
заведующий кафедрой «Прикладная математика и
программирование», г. Ростов-на-Дону
- Никольчаев Евгений Витальевич,**
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»,
профессор кафедры «Цифровые технологии обработки
данных», г. Москва
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «18» сентября 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета
Пермского национального исследовательского политехнического университета
Д ПНИПУ.05.21 по адресу: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,
ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Пермского
национального исследовательского политехнического университета (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «__» июля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат экономических наук,
доцент

Алексеев Александр Олегович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время существенно возрастает размер и сложность организаций. Например, большинство компаний розничной торговли не только расширяют свои сферы деятельности в основном бизнесе, но также включают в себя подразделения, соответствующие ранее деятельности их поставщиков. Многие компании розничной торговли не только занимаются продажей, но и производят некоторые товарные группы, а также осуществляют логистическую деятельность. Расширение деятельности усложняет структуру таких предприятий и процессы управления ими. Применение традиционных методов моделирования и управления системами для таких процессов является сложной, которая во многих случаях не дает ожидаемых результатов. Современные вызовы, связанные с цифровизацией и автоматизацией процессов управления, также оказывают значительное влияние на сложность организационных систем. Внедрение технологий искусственного интеллекта и машинного обучения изменяет традиционные подходы к управлению, требуя разработки новых методов анализа и принятия решений. Компании вынуждены адаптироваться к быстроменяющимся условиям рынка, интегрировать цифровые инструменты и перестраивать бизнес-процессы, что требует создания более сложных и адаптивных моделей управления.

Основными исследовательскими вопросами являются:

- Как организациям преодолеть трудности, возникающие при управлении расширяющимися предприятиями?
- Как передовые системы поддержки принятия решений могут помочь в преодолении этих трудностей?
- Какие особенности должны учитывать комплексные модели управления для эффективного сценарного моделирования операционной деятельности предприятий?

На сегодняшний день отсутствует комплексная модель для сценарного моделирования и управления в сложных организациях, позволяющая учитывать всю сложность процессов операционной деятельности. В отрасли существует необходимость построения новых моделей для задач управления и сценарного планирования на таких предприятиях, применяя методы, которые позволяют учитывать имеющиеся экспертные знания о системе, количественные и качественные компоненты системы. Такие методы базируются на когнитивном подходе, при котором для моделирования системы строятся нечёткие когнитивные карты (НКК), основанные на синтезе нечёткой логики и теории графов. НКК рисует причинно-следственную картину для представления модели и поведения системы. Однако, текущий математический аппарат НКК не позволяет решить задачу обратного моделирования, которая является критической при увеличении сложности систем, что показывает **противоречие в науке**. При существующих методах и алгоритмах решения прямой задачи сценарного моделирования, в которой задается начальное изменение параметров системы и определяется в какое состояние перейдет система, отсутствует система, позволяющая решить обратную задачу моделирования (ОЗМ), которая позволит задать целевое

состояние системы и определить необходимые начальные изменения параметров. Возможность решения ОЗКМ позволит значительно ускорить процесс принятия решения и разработки дальнейших стратегий развития компаний.

Анализ публикаций в области математического моделирования и интеллектуальных систем поддержки принятия решений, основанных на НКК для принятия решений в слабоструктурированных задачах выбора, свидетельствует об активном развитии теории в этой области. Число исследовательских работ по НКК в 2010 году почти вдвое превышает число исследовательских работ, представленных в 2006 году, и этот тренд сохраняется до 2025 года.

Исследования в этом направлении интенсивно ведутся в России и зарубежных странах, начиная с 1980-х годов. Среди отечественных специалистов здесь следует отметить Леденёву Т.М., Силова В.Б., Максимова В.И., Кулинича А.А., Гамазова И.Н., Аверкина А.Н., Ярушева С.А., Павлова В.Ю., Ефремову Н.А., Гинис Л.А., Оськина А.Ф. и Оськина Д.А. и многих других. Моделированию сложных слабоструктурированных систем на основе НКК посвящены труды Ларичевой Е.А., Строковой Л.А., Мешалкина В.П. и Белозерского А.Ю., Маригодова В.К., Гореловой Г.В. и Радченко С.А., Заболотского М.А., Поляковой И.А. и Тихонина А.В., Путятю М.М.

В период с 2019 по 2025 год исследователи расширили приложения НКК на такие сферы, как телекоммуникации (Бычков Е.Д., Лузан Д.С.), теория игр (Onari M.A. и Rezaee M.J.), автодорожные карты (Wang J. и Zhen Peng Z.), электронное обучение (D'Aniello G. и Falco M.), виртуальные среды (Юрин А.А. и Емельяненко А.С.), искусственный интеллект (Gonzalo Nápoles G. и Jastrzębska A.), прогнозирование временных рядов (Vanhoenshoven F.) и распознавание образов (Papakostas G. и Boutalis Y.). Однако, при большом количестве систем моделирования НКК для поддержки принятия управленческих решений отсутствует преемственность программных продуктов, возможность воспроизвести полученные результаты и применить систему на предприятии. В силу чего имеется **противоречие в практике**, которое заключается в том, что существующие системы не адаптированы под нужды предприятий и в имеющихся программных продуктах отсутствует техническая возможность интеграции новых алгоритмов, полученных в результате исследований в области НКК. В рассмотренных в работе программных продуктах остаётся нерешённой проблема учёта менее значимых параметров для исследования и чувствительности результата.

Данная работа направлена на разработку методов и алгоритмов для системы управления реальными предприятиями на примере предприятий розничной торговли, системы развития муниципальных образований и системы электродиализной установки для предприятия очистки воды. Задачами разрабатываемых методов и алгоритмов являются построение и анализ структуры НКК по методу Коско, решение прямых и ОЗМ для поддержки принятия управленческих решений на основе заданных целевых приращений концептов с использованием теории нечётких реляционных уравнений (НРУ), анализ возможности построения НКК с использованием больших языковых моделей, определение рисков использования НКК на

предприятиях. Реализация такой системы позволит получить прикладной программный комплекс анализа НКК модульного типа; провести анализ уже существующих НКК, разработанных российскими и зарубежными экспертами, что позволит качественно улучшить знания о системах, обнаружить и учесть скрытые взаимосвязи концептов и, в итоге, решить актуальные задачи в соответствующих областях знаний.

Таким образом, рассматриваемая в работе задача построения, анализа и моделирования сложных систем на основе НКК для принятия решения в слабоструктурированных задачах выбора с целью поддержки принятия управленческих решений в организационных системах актуальна.

Цель и задачи исследования. Цель диссертации состоит в повышении эффективности управления и скорости принятия управленческих решений в таких организационными системами, как предприятия розничной торговли, муниципальные образования, предприятия очистки воды на основе концепции нечётких когнитивных карт.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- провести сравнительное исследование методов и алгоритмов построения НКК, методов решения ОЗМ в НКК;
- построить и исследовать модель системы розничной торговли на основе НКК для повышения эффективности управления предприятием;
- построить и исследовать модель стратегии развития города на основе НКК;
- построить и исследовать модель электродиализной установки для предприятия очистки воды на основе НКК;
- разработать и программно реализовать алгоритм и методы решения ОЗКМ систем на основе НКК;
- провести анализ проблемы неразрешимости НРУ, разработать метод минимально значимых корректировок;
- провести анализ возможности использования больших языковых моделей при определении связей между концептами в НКК;
- провести анализ рисков использования НКК на предприятиях;
- развить научно-методологический аппарат математического моделирования и разработать соответствующий программный комплекс для моделирования организационных систем;
- спроектировать и реализовать прототип программного комплекса для анализа системных характеристик НКК и решения задачи динамического моделирования.

Объект исследования: нечеткие когнитивные карты.

Предмет исследования: математические модели управления организационными системами предприятий розничной торговли, муниципальных образований и предприятий очистки воды их и использование для поддержки принятия управленческих решений.

Методология и методы исследования. В работе применялись методы математического моделирования, системного анализа, теории нечетких множеств и нечеткой логики, теории графов, когнитивного и имитационного

моделирования, нечеткого реляционного анализа, теории нейросетей, теории машинного обучения, численные методы, математическая статистика, а также принципы структурного и модульного программирования и проведение вычислительных экспериментов.

Содержание диссертационного исследования соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.4. Управление в организационных системах: п.3 - Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах; п.4 - Разработка информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах; п.5 - Разработка методов получения данных и идентификации моделей, прогнозирования и управления организационными системами на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации. п.9 - Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах.

Научная новизна исследования. В диссертации получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

- впервые описаны модифицированные алгоритмы решения ОЗМ на основе методов решений НРУ, базирующиеся на введении понятий доминантных уравнений и детерминирующих коэффициентов, позволяющие эффективно определять необходимые изменения на предприятии для достижения поставленных стратегических целей;

- предложено решение проблемы формальной неразрешимости ОЗМ с помощью минимально значимой корректировки вектора целевых показателей и метод оптимизации структуры НКК для выделения целевых и управляющих концептов в начальной структуре карты, обеспечивающие возможность стратегического планирования для более широкого спектра проблем;

- впервые описано использование больших языковых моделей при построении НКК и проведен сравнительный анализ полученных матриц взаимодействий с НКК составленными экспертами;

- сформулирован алгоритм комплексного анализа НКК, отличающийся от существующих возможностью выбора произвольной операции композиции (T -нормы и S -нормы), для получения наиболее полной информации об исследуемой системе;

- разработана и реализована модульная программа «FuzzyM», моделирования с использованием НКК, отличающаяся гибкой модульной структурой и возможностью расширения функционала и позволяющая использовать алгоритмы в других научных исследованиях;

- сформированы и проанализированы математические модели системы управления предприятием розничной торговли, стратегии развития муниципального образования город Краснодар, системы функционирования электродиализной установки на предприятии очистки воды, позволяющие описать комплексные процессы на предприятиях методами НКК и использовать разработанную систему при принятии решений;

Теоретическая значимость заключается в развитии методов управления организационными системами на основе концепции нечётких когнитивных карт.

Практическая значимость состоит в возможности использования разработанных моделей исследователями разного уровня для формирования и проверки гипотез, связанных с поведением сложных организационных систем при различных внешних воздействиях, а также синтеза и анализа стратегий управления такими системами.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием фундаментальных положений нечёткой логики, нечетких реляционных уравнений, математических методов, элементов теории статистического анализа, теории систем, теории когнитивного и имитационного моделирования. Достоверность проверена сопоставлением с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов, опубликованием полученных результатов в рецензируемых журналах и разработкой программного комплекса, на который получены свидетельства о государственной регистрации, и подтверждается проведённой апробацией на предприятиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика применения методов системного анализа НКК с учетом различных операций композиции.
2. Методы и алгоритмы синтеза множества стратегий управления системой на основе решения обратной задачи когнитивного моделирования, метод минимально значимой корректировки при неразрешимости ОЗМ, метод оптимизации структуры карты при неразрешимости ОЗМ.
3. Метод получения взаимовлияний концептов НКК на основе LLM.
4. Программный комплекс «FuzzyM» для поддержки принятия решений с использованием аппарата НКК, учитывающий слабоструктурированность организационных систем и предприятий.
5. Математические модели управления предприятием розничной торговли, управления муниципальным образованием, электродиализной установки на предприятии очистки воды.

Внедрение результатов работы. Методы и алгоритмы, реализованные в программном комплексе «FuzzyM», а также отдельные элементы теоретических исследований и программные модули использованы при формировании стратегии управления предприятия розничной торговли разрабатываемой компанией LTD «TectumAI», что способствовало сокращению времени на принятие решения на 45%, в 3.5 раза увеличить количество проанализированных сценариев на один цикл и на 40% увеличить уверенность экспертов в прогнозе. Программный комплекс «FuzzyM», а также разработанный алгоритм решения ОЗМ использован при разработке системы принятия решений с целью оптимизации процессов планирования и управления организацией ООО «Программные технологии». Внедрение результатов работы подтверждается актами.

Апробация результатов исследования. Результаты научно-исследовательской работы, полученные во время исследования, докладывались и обсуждались на семинарах кафедры прикладной математики КубГУ (2015–2018); использованы в Программе стратегического развития ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», в проектах РФФИ №13-08-96507, РФФИ №13-08-01168; были представлены в конкурсе «Премия

IQ года 2018»; на конференциях Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, г. Краснодар (2022), Современная математика и концепции инновационного математического образования, г. Москва (2022). Диссертация под названием «Разработка системы поддержки принятия решений на предприятиях розничной торговли и в муниципальных образованиях на основе нечётких когнитивных карт» проходила защиту в Южном федеральном университете и результаты работы были опубликованы в рукописи. Работа была снята с защиты по личному заявлению, диссертация была доработана: уточнены объект, предмет исследования, скорректирована тема настоящей диссертационной работы, добавлен пример использования разработанных методов и алгоритмов для решения задачи моделирования на предприятии очистки воды, расширен обзор литературы, описан алгоритм использования больших языковых моделей для построения НКК, дополнительно вышли публикации.

По результатам научного исследования был составлен курс лекций для факультативной дисциплины «Введение в теорию нечётких когнитивных карт» для магистров направления подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика, профиль Математическое и информационное обеспечение экономической деятельности.

Публикации. Основные результаты научного исследования опубликованы в 11 печатных и приравненных к ним работах, из которых 5 соответствуют Перечню ВАК, в т.ч. 2 статьи опубликованы в журналах Web of Science/Scopus, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личное участие соискателя в получении результатов. Основные результаты диссертации получены лично автором, а именно: методика применения методов системного анализа НКК с использованием различных операций композиции, методы использования больших языковых моделей при построении НКК, методы и алгоритмы синтеза множества стратегий управления системой на основе решения ОЗКМ, метод минимально значимой корректировки и метод оптимизации структуры карты при неразрешимости ОЗМ, программный комплекс для поддержки принятия решений.

В работе [1] авторским вкладом является разработанный алгоритм решения ОЗМ в НКК, применение алгоритма для решения различных задач. В работе [2] – применение разработанного программного комплекса «FuzzyM» для НКК, описывающей работу компании розничной торговли. В [3] – анализ предприятия розничной торговли как сложной системы и решение ОЗМ, [4] – анализ задачи развития муниципальных образований. В [5] – обзор методов прогнозирования развития и алгоритмов построения систем поддержки принятия решений. В [8] в разработке метода использования больших языковых моделей. В [9] – обоснование рисков использования НКК при управлении бизнес-процессами. В [10] [11] – обзор методов прогнозирования развития и алгоритмов обучения сложных систем с применением теории НКК.

Структура и объём работы. Научно-исследовательская работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка литературы,

приложений. Общий объём диссертации 180 страниц, в том числе 24 рисунка, 29 таблиц, 7 приложений, список литературы из 211 наименований.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований, определены объект и предмет диссертационного исследования, выполнена постановка целей и задач, представлены научная и практическая значимость проводимых исследований, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе осуществляется обзор и анализ существующих теоретических и практических исследований в области интеллектуальных систем поддержки принятия управленческих решений. Определено, что тенденция их развития – поддержка принятия управленческих решений на всех этапах от постановки задачи и анализа имеющихся данных до формирования стратегий управления. Делается вывод об эффективности использования когнитивного анализа при исследовании организационных систем в случаях, если параметры и входные данные не являются точными и корректно представленными или в случае, если требуется представить функциональную, легко интерпретируемую экспертом зависимость между входом и выходом исследуемого объекта. Установлено, что существует недостаток аналитических алгоритмов и программного обеспечения, позволяющего проводить сценарное моделирование таких систем и определение необходимых изменений в системе, которые обеспечат переход в новое целевое состояние. Проведённый анализ определяет цель научно-исследовательской работы, которая состоит в разработке новых методов анализа комплексных систем, алгоритмов поддержки принятия решений и разработке модульного программного комплекса для сценарного моделирования организационных систем.

Разработанные методы когнитивного анализа основываются на математическом аппарате НКК. Подробно рассмотрена структура НКК, указаны математические основы формирования нечёткого каузального графа и механизмов формирования причинно-следственных связей.

Проведена математическая постановка научной задачи исследования, которая представлена в следующем виде модифицированного уравнения Коско, проведён анализ методов обучения НКК, суть которых заключается в получении матрицы весов $\mathbf{W}_{(M \times M)}$, основываясь на мнении экспертов и/или доступных ретроспективных данных. Показано, что большинство существующих подходов к обучению предполагают, что набор помеченных концептов предоставляется априори экспертом и обучается только матрица весов. Рассмотрены существующие обучающие алгоритмы НКК, основанные на принципах, заимствованных из области искусственных нейронных сетей. Описаны алгоритмы обучения трёх типов: Хеббовские обучающие алгоритмы, обучающие алгоритмы Силова и обучающие алгоритмы, зависящие от ошибки. Проведено сравнение алгоритмов обучения и делается вывод о том, что Хеббовские методы могут быть эффективными в решении задач управления, в которых заранее

известны ограничения предметной области; подходы, зависящие от ошибки, более подходят для решения задач классификации паттернов и прогнозных задач, где имеется несколько циклов симуляции, в то время как карты Силова применимы, когда матрица весов содержит отрицательные связи, что наиболее соответствует характеристикам реальных социально-экономических систем. Установлена необходимость корректного определения операции композиции для устранения эффекта сходимости при обучении НКК. На основе этого вывода сформирована одна из задач исследования.

Во второй главе на основе задач, сформированных при анализе существующих подходов, формируются математические основы разрабатываемой системы. Детально описан алгоритм решения прямой задачи прогнозирования с применением различных операций композиции, описано влияние операции на интерпретацию процесса. Показано, что корректный выбор операции каузальной алгебры предоставляет уточнить взаимовлияние между концептами и учесть малые взаимосвязи между элементами нечёткой модели, что позволяет обеспечить гибкость построенной модели и увеличить точность моделирования. Рассмотрены системные показатели, используемые для анализа обученной НКК. Описана постановка ОЗМ в НКК и предложен алгоритм её решения.

Подробно рассмотрен метод обучения НКК на основе алгоритма Силова. Так как веса могут быть отрицательными, а операции над нечёткими множествами определены для функции принадлежности на $[0,1]$, проблема решается за счет удвоения мощности множества концептов путем перехода от исходной НКК со связями $\mathbf{W} = |w_{ij}|$ к матрице положительных связей $\mathbf{R} = |r_{ij}|$.

Для определения скрытых влияний в НКК произведено транзитивное замыкание матрицы $\mathbf{R} : \bar{\mathbf{R}} = R \vee R^2 \vee \dots$, где R^2 определяется по формуле:

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R} \circ \mathbf{R} \quad (1)$$

где \circ – выбранная S -норма.

При построении транзитивного замыкания матрицы \mathbf{R} нечёткие значения выходного концепта получаются с использованием операций T -норм над нечёткими значениями приращений входных концептов и весов причинно-следственной связи.

Для исследования динамического влияния компонентов на систему и обратного влияния получена матрица $\mathbf{V} = (v_{ij}, \bar{v}_{ij})$ преобразованием:

$$\begin{cases} v_{ij} = \max(r_{2i-1,2j-1}^*, r_{2i,2j}^*) \\ \bar{v}_{ij} = -\max(r_{2i-1,2j}^*, r_{2i,2j-1}^*), \end{cases} \quad (2)$$

где v_{ij} характеризует силу положительного влияния, а \bar{v}_{ij} - силу отрицательного влияния.

Для получения прогноза использован метод импульсных процессов, по формуле:

$$A_i^{t+1} = S_{j=1}^N \left(A_i^t, f(q_i^{t+1}) + o_i^{t+1} + T(w_{ij}, A_j^t) \right) \quad (3)$$

где q_i^{t+1} – внешнее воздействие на концепт, o_i^{t+1} – управляющее воздействие на концепт, $w_{ij} = w(C_i, C_j)$ – сила связи между концептами C_i и C_j , A_j^t – приращение концепта, T – операция T -нормы, S – операция S -нормы.

Проведена постановка ОЗМ в НКК для поддержки принятия решений, описаны существующие методы и их ограничения, и предложен алгоритм её решения. Сформирована задача адаптации методов применяемых при решении НРУ для систем, базирующихся на НКК.

Из исходной матрицы $\mathbf{W} = |w_{ij}|$ выделены: матрицы состояния $\mathbf{A} = |a_{ij}|_{n_x \times n_x}$, управления $\mathbf{B} = |b_{ij}|_{n_x \times n_u}$, цели $\mathbf{C} = |c_{ij}|_{n_y \times n_x}$ и прямого влияния $\mathbf{D} = |d_{ij}|_{n_y \times n_u}$:

$$\vec{s}_{k+1} = \mathbf{W}^t \circ \vec{s}_k = \begin{bmatrix} \otimes & \otimes & \otimes \\ \mathbf{B} & \mathbf{A} & \otimes \\ \mathbf{D} & \mathbf{C} & \otimes \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \vec{u}_k \\ \vec{x}_k \\ \otimes \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \otimes \\ \vec{x}_{k+1} \\ \vec{y}_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

Вектор \vec{s}_k разделен на $\vec{u}_k, \vec{x}_k, \vec{y}_k$, где \vec{u}_k – управляющие концепты, \vec{x}_k – вектор состояний, \vec{y}_k – целевые концепты. Правило: элементы, содержащие 0 в строках \mathbf{W} относятся к управляющим \mathbf{B} , содержащие 0 в столбцах \mathbf{W} – к целевым \mathbf{C} . В результате получено НРУ для решения ОЗМ в НКК:

$$\begin{aligned} \vec{x}_k &= \mathbf{A}^* \circ \mathbf{B} \circ \vec{u}_0, \\ \vec{y}_k &= \mathbf{C} \circ \mathbf{A}^* \circ \mathbf{B} \circ \vec{u}_0 \vee \mathbf{D} \circ \vec{u}_0 \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{A}^* = \bigcup_{k=0}^{\infty} \vec{A}_k$ — транзитивное замыкание в нечёткой матричной регулярной алгебре, \vec{y}_k — задан по сценарию, \vec{u}_0 — неизвестный вектор управляющих концептов.

Задача заключающаяся в определении \mathbf{A} при известных \mathbf{X} , \mathbf{B} и \circ . Рассмотрены основные понятия НРУ, обозначенного как $\mathbf{O} \circ \mathbf{P} = \mathbf{Z}$:

$$\left| \begin{array}{l} (o_{11} \wedge p_{11}) \vee \dots \vee (o_{1n} \wedge p_{1n}) = z_1, \\ \dots \dots \dots \\ (o_{m1} \wedge p_{m1}) \vee \dots \vee (o_{mn} \wedge p_{mn}) = z_m. \end{array} \right. \quad (6)$$

Полный набор решений разрешимого НРУ определяется максимальным решением и конечным числом минимальных решений. Максимальное решение уравнения определяется по формулами:

$$p_j = \begin{cases} o_{ij}, & \text{если } o_{ij} > z_j, \\ 1, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

$$p_i = S_{j=1, j \neq i}^N(p_j) \quad (8)$$

Метод нахождения минимальных решений НРУ, базируется на выделении в исходных уравнениях детерминирующих концептов и использовании понятия доминирующих решений в сочетании с операцией перебора списков. Если \mathbf{P}^{\max} является наибольшим решением системы, отметим все коэффициенты, которые вносят вклад в решение системы. Преобразуем систему (6) в:

$$\mathbf{O}^* \circ \mathbf{P} = \mathbf{Z} \quad (9)$$

с помощью выражения:

$$o_{ij}^* = \begin{cases} 0, & \text{если } o_{ij} < p_i^{\max}, \\ p_i^{\max}, & \text{если } o_{ij} = p_i^{\max}, \\ 1, & \text{если } o_{ij} > p_i^{\max}. \end{cases} \quad (10)$$

Сформируем матрицу \mathbf{H} включив столбец j если хотя бы один элемент $O_j^* > 0$. Коэффициент H -типа характеризует степень влияния одного концепта на другой в НКК. После каждому уравнению $i \in \{1, \dots, m\}$ сопоставим множество \mathbf{R}_i , которое содержит список всех коэффициентов O_{ij} , которые вносят вклад в решение i -го уравнения при O_{ij}, P_j, Z_i по правилу:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{z_i}{o_{ij}}, & \text{если } h_{ij} = 1, \\ o_{ij} \\ 0, & \text{если } h_{ij} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Определение 1. Множество \mathbf{R}_i , элементами которого являются индексы $j \in \{1, \dots, n\}$ (в порядке возрастания) в i -м уравнении (6), в котором $o_{ij} \wedge p_j = z_i$, называется маркировочным множеством для i -го уравнения (6).

Определение 2. Пусть O_l и O_k – l -ое и k -ое уравнения, соответственно, в (6) и $z_l \geq z_k$. Уравнение O_l называется доминирующим по отношению к уравнению O_k если для каждого $j \in \{1, \dots, n\}$ имеет место: если o_{ij} – коэффициент H – типа, то o_{kj} также является коэффициентом H – типа.

Если O_l является доминирующим уравнением для O_k , это означает, что всякий раз, когда O_l удовлетворяет решению (6) это решение также удовлетворяет O_k . Следовательно, O_k является избыточным уравнением и может быть исключено из системы, что уменьшает временную сложность построения решений, оптимизируя выбор объектов, по которым выполняется поиск.

Полученное максимальное решение соответствует весам входных концептов когнитивной карты для консервативного сценария развития системы, тогда как минимальные решения соответствуют демократичным сценариям управления, предполагающими минимально возможные вмешательства в

управляющие концепты системы. Понятие “консервативный сценарий” определяется как подход, при котором учитываются самые неблагоприятные, но реалистичные условия и предполагаются необходимые воздействия на концепты, чтобы гарантировать, что любые принятые решения и стратегии будут устойчивыми даже в худших возможных условиях. При демократичных сценариях предполагаются благоприятные условия для системы, равномерное и сбалансированное изменение воздействия на концепты системы. В этих сценариях значения концептов и их взаимодействий оцениваются с учетом справедливого распределения влияния и воздействия.

Представлен метод минимальных корректировок, используемый при отсутствии явного решения ОЗМ, когда изначально заданные целевые показатели недостижимы и приводят к неразрешимости системы. При отсутствии решения для заданных целевых показателей предложено найти скорректированные значения столбца \mathbf{Z} , подставив в исходное уравнение полученные значения для максимального решения системы уравнений. В результате получим вектор минимальных корректировок целевых показателей \mathbf{Z}^{upd} , который всегда $\mathbf{Z}^{upd} \leq \mathbf{Z}$.

Разработан метод оптимизации структуры НКК для выделения целевых и управляющих концептов в начальной структуре карты. Структура решения НРУ требует присутствия в начальной структуре НКК матрицы управления и цели, что может отсутствовать в сильно связанных моделях, полученных экспертами. Для выделения этих матриц предлагается ввести дополнительные (буферные) концепты в НКК, имеющие единственную единичную связь с целевыми или управляющими концептами, что позволит вычленить из концептов состояний сильно связанной НКК искомые показатели.

В третьей главе выполнен обзор имеющихся в настоящее время программных комплексов, позволяющих реализовать как существующие алгоритмы обработки НКК, так и будущие результаты теоретических и/или практических исследований.

Определено, что описанным программным реализациям недостаёт средств проведения экспериментов и/или они не позволяют решать задачи поддержки принятия решений, что значительно препятствует их применимости в реальных ситуациях. Делается вывод о том, что для устранения этого ограничения необходима разработка модульной программной системы на языке, широко используемом не только исследователями, но и на реальных предприятиях.

Сформулированы основные требования к разрабатываемой СППР на основе НКК. Описан разработанный программный комплекс «FuzzyM» для моделирования процессов в организационных системах и поддержки принятия решений на основе НКК, в состав которого вошли:

1. построение структуры НКК, описывающей заданную предметную область,
2. динамическое моделирование развития модели на основе НКК с использованием правила активации с учетом прошлого значения концепта,
3. выявление косвенных связей в НКК,

4. анализ оптимистичных, консервативных и реалистичных сценариев развития процессов,
5. расчёт системных характеристик и кластеризация концептов НКК по уровням взаимного положительного и отрицательного влияния, консонанса и диссонанса,
6. возможность выбора различных операций композиции (T -норма, S -норма) при поиске стратегий управления системой,
7. поддержка принятия решений для управления системой путем решения ОЗМ разработанным методом,
8. метод минимальных корректировок при отсутствии явного решения ОЗМ,
9. метод оптимизации структуры НКК,
10. отображение результатов анализа и возможных стратегий принятия решений в виде таблиц и графиков с возможностью экспорта в MS Excel.

Разработаны модели анализа организационных систем. Так, были построены модели для задачи моделирования стратегий развития предприятия розничной торговли, муниципального образования город Краснодар, электродиализной установки для предприятия очистки воды.

Получена математическая модель управления предприятием розничной торговли и проведена оценка различных подсистем компании, включая технический уровень развития, состояния рынка, взаимодействия с клиентами и сотрудниками, отношения с поставщиками и финансовую подсистему.

Проведён детальный анализ сценария, направленного на изменение концептов «Качество продуктов» и «Уровень лояльности сотрудников». Установлено, когда вместе с качеством продукции будет повышена лояльность сотрудников, стратегия запустит цикл усиления уровня лояльности клиентов, что приведёт к увеличению целевого концепта прибыль компании. Проанализированы системные показатели НКК, такие как влияние концепта на систему, влияние системы на концепт, консонанс и диссонанс. Установлено, что система усиливает целевой концепт «Репутация компании», а концепт усиливает систему. Диссонанс усиления ниже среднего, следовательно, наблюдается тенденция к стабилизации репутации компании. Модель показывает, что без какого-либо влияния на систему прибыль в розничной торговле будет иметь тенденцию к падению из-за высокой конкуренции и низкой маржи в секторе. «Уровень обслуживания клиентов» в наибольшей степени, по сравнению с другими концептами, усиливает систему, а система, в свою очередь, усиливает этот концепт слабее. Это подтвердило на системном уровне факт, что обслуживание клиентов всегда будет одним из главных факторов, влияющих на то, как клиенты воспринимают розничные бренды.

Представлен анализ различных операторов нечёткой логики для системы розничной торговли. Предложен метод выделения оптимальной T -нормы при анализе НКК. Выделена наиболее подходящая T -норма для системы – алгебраическое произведение, позволяющее сформировать оптимальное количество кластеров при анализе.

Решена ОЗМ для целевой стратегии заключающейся в увеличении прибыли и репутации компании. Получено максимальное решение ОЗМ, которое

определяет необходимость в увеличении товарного ассортимента. Эта стратегия требует увеличения концепта в максимальном и минимальном решении, что показывает важность ассортимента для увеличения прибыли и репутации компании. Разработанный ПК протестирован для формирования стратегий управления на предприятии розничной торговли ООО «Тандер» и может выступать как инструмент стратегического планирования, для определения развития компаний розничной торговли и прогнозирования результатов управленческих решений.

Рассмотрена задача формирования стратегии развития муниципального образования на примере города Краснодара. С помощью опроса экспертов сформирована НКК и проведен расчёт и анализ системных показателей НКК. Система ослабляет концепт «туристическая привлекательность города», при этом диссонанс ослабляющего действия выше среднего, что означает тенденцию к стабилизации туристической привлекательности города. Целевые концепты «уровень социального благополучия» и «эколого-экономическая эффективность» усиливаются системой, при этом консонанс выше среднего, что отображает оптимистичную тенденцию развития системы по этим концептам. Проведена кластеризация системных показателей карты, выявление активных концептов, которые влияют на развитие системы в большей мере, а также пассивных концептов, сравнение сформированных кластеров концептов при использовании различных операций каузальной алгебры.

Описана задача поддержки принятия решения и формирование стратегий развития системы. Заданы целевые приращения концептов «туристическая привлекательность города», «уровень социального благополучия» и «эколого-экономическая эффективность». Полученная максимальная стратегия направлена на незначительные увеличения «Уровня обеспеченности зелеными территориями», «Политической стабильности» и «Жилого фонда», что позволит увеличить «Туристическую привлекательность региона» до целевой и даже в незначительной мере увеличить остальные целевые показатели.

Проведён анализ влияния различных операций композиции на формирование стратегий. Делается вывод о том, что при решении ОЗМ в НКК формирования стратегии развития г. Краснодара решение более устойчиво при использовании операции $max - boundediff$, самые мягкие условия изменения приращений концептов получены при применении операции $max - min$, что соответствует свойствам рассмотренных операций каузальной алгебры.

Разработана модель электродиализной установки на предприятии очистки воды, которая может использоваться для оптимизации технологических процессов. Проведен опрос экспертов для выявления концептов и их причинно-следственных взаимосвязей, выделено 19 концептов для рассматриваемой системы. Целевыми концептами являются Y_1 - Срок работы мембраны и Y_2 - Расход электроэнергии (электродиализ + работа насоса).

В результате анализа НКК можно заключить, что наиболее значимыми факторами для оптимизации работы установки являются электропроводность мембран, расстояние между ними и производительность аппарата. Улучшение

этих параметров может способствовать повышению срока службы мембран и снижению энергозатрат, однако необходимо учитывать баланс между качеством очистки и экономической эффективностью.

Решена ОЗМ, направленная на повышение Y_1 и снижение Y_2 . Полученное максимальное решение направлено на снижение значений основных управляющих концептов, за исключением концепта «Расстояние между мембранами в аппарате». Действительно, при увеличении концепта «Расстояние между мембранами в аппарате» целевые концепты растут, но значительно снижается концепт «Качество очистки».

Применение программного комплекса «FuzzyM» позволило экспертам оперативно оценить динамику развития системы, выявить проблемные зоны и предложить оптимальные стратегии развития описанных предприятий.

Предложен метод получения взаимовлияний концептов НКК на основе больших языковых моделей при определении весов и направления взаимовлияния концептов в НКК. С его помощью построены НКК предприятия розничной торговли, стратегии развития муниципального образования, электродиализной установки на предприятии очистки воды. Проведен анализ полученных НКК и делается вывод, что языковая модель имеет потенциал для использования в нечетком моделировании и хорошо определяет связи в социально-экономических моделях небольшой размерности, но при увеличении размерности не все нужные связи выводятся.

Описаны риски, которые необходимо учитывать при использовании НКК на предприятиях. Выделено девять видов риска: финансовые; операционные; риски, связанные с безопасностью; риски недостоверности данных; риски сложности интерпретации; недостатка экспертных знаний; стратегические; репутационные и правовые. Описаны рекомендации по минимизации этих рисков.

На примерах, рассмотренных в работе, показано, как представленная программная среда «FuzzyM» позволяет широкому кругу пользователей легко составлять НКК, получать качественные модели изучаемой системы и проводить анализ возникающих задач для принятия решений в сложных системах.

В заключении кратко описаны научные и практические результаты, полученные автором в процессе исследований, описаны ограничения использования НКК и предложены направления дальнейших исследований.

В приложении приведены полученные матрицы взаимовлияний для исследуемых нечетких систем.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертации исследования, а также результаты вычислительных экспериментов и моделирования дали возможность получить следующие основные результаты.

1. Поставлена и впервые решена актуальная проблема решения обратной задачи при математическом моделировании сложных слабоструктурированных систем, имеющая важное значение для управления организационными системами. Разработан метод минимальных корректировок целевых приращений

концептов нечёткой когнитивной карты, позволяющий избежать проблему отсутствия решений обратной задачи. Впервые представлен метод оптимизации структуры НКК, позволяющий находить значения управляющих концептов для достижений заданного состояния системы при сильно связанной структуре НКК. Предложен метод использования больших языковых моделей для построения НКК. Таким образом, показано, что разработанные методы позволяют выполнять прогнозирование для поддержки принятия решения в слабоструктурированных задачах выбора.

2. Разработан модульный программный комплекс «FuzzyM» для моделирования нечётких систем, который позволяет проводить экспертную оценку, проектирование и системный анализ сложных нелинейных организационных систем, выявлять основные концепты, влияющие на систему и подверженные влиянию системы, определять скрытые связи в сложных системах, осуществлять стратегическое планирование, находить оптимальные пути развития системы, проводить визуализацию развития системы при влиянии на управляющие концепты.

3. Внедрение результатов диссертационного исследования в процессы управления предприятиях розничной торговли, а именно, методов системного анализа НКК с применением различных операций композиции, методов и алгоритмов синтеза множества стратегий управления системой на основе решения обратной задачи когнитивного моделирования, метода минимально значимой корректировки при неразрешимости обратной задачи, метода оптимизации структуры карты при неразрешимости обратной задачи, а также программного комплекса «FuzzyM», предназначенного для поддержки принятия решений с использованием аппарата НКК с целью повышения эффективности принятия стратегических решений способствовало сокращению времени на принятие решения на 45%, в 3.5 раза увеличить количество проанализированных сценариев на один цикл и на 40% увеличить уверенность экспертов в прогнозе.

IV. СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук:

1. **Petukhova, A. V.** Algorithm for Optimization of Inverse Problem Modeling in Fuzzy Cognitive Maps / A. V. Petukhova, A. V. Kovalenko, A. V. Ovsyannikova // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, № 19. – Art. 3452. – DOI 10.3390/math10193452 (**Web of Sciences Core Collection, Scopus**)
2. **Petukhova, A.** Retail System Scenario Modeling Using Fuzzy Cognitive Maps / A. Petukhova, N. Fachada // Information. – 2022. – Vol. 13, № 5. – Art. 251 – DOI 10.3390/info13050251 (**Web of Sciences Core Collection, Scopus**)
3. **Петухова, А. В.** Решение обратной задачи моделирования для предприятия розничной торговли с использованием теории нечётких когнитивных карт /

А. В. Петухова // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №.3. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2023/8262>.

4. **Петухова, А. В.** Использование нечетких когнитивных карт для решения задачи развития муниципальных образований / А. В. Петухова, А. В. Коваленко, М. В. Шарпан // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 2(110). – С. 238-262. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2024/9037>.

5. **Петухова, А. В.** Системы поддержки принятия решений на основе интеллектуальных технологий. Архитектура, проектирование и использование СППР в различных областях. / Петухова А. В., А. В. Коваленко // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2025. – № 1. – С. 47–58. – DOI 10.15593/2499-9873/2025.1.04

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

6. **Петухова, А. В.** Св. о гос. рег. Программы для ЭВМ №2020616550 от 15.07.2020 г. Модуль поддержки принятия решений к программе моделирования социально-экономических процессов «FuzzyM» / А. В. Петухова, А. В. Коваленко.

7. **Петухова, А. В.** Св. о гос. рег. Программы для ЭВМ №2018615414 от 26.06.2018 г. Программа моделирования социально-экономических процессов на основе нечётких когнитивных карт «FuzzyM» / А. В. Петухова, В. Н. Кармазин.

Прочие публикации:

8. **Petukhova, A.** Text clustering with large language model embeddings / A. Petukhova, J.P. Carvalho, N. Fachada // International Journal of Cognitive Computing in Engineering. – 2025. – Vol. 6. – P. 100-108 – DOI 10.1016/j.ijcse.2024.11.004.

9. **Петухова, А. В.** Риски использования нечётких когнитивных карт при управлении бизнес-процессами / А. В. Петухова, А. В. Коваленко, А. В. Овсянникова // Современная математика и концепции инновационного математического образования. – 2022. – № 1. – С. 171–177.

10. **Петухова, А. В.** Методы прогнозирования развития сложных систем с применением теории нечётких когнитивных карт / А. В. Петухова, А. В. Коваленко // Информатика. – 2022. – Т. 1, № 1. – С. 81–95

11. **Петухова, А. В.** Обзор динамических свойств и алгоритмов обучения нечетких когнитивных карт / Петухова А. В., Коваленко А. В., Теунаев Д.М. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2021. – № 167. – С. 43–74.