

На правах рукописи

Петухова Алина Владимировна

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ И В МУНИЦИПАЛЬНЫХ
ОБРАЗОВАНИЯХ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ**

Специальность 2.3.4 – Управление в организационных системах
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону – 2024

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и программирования
института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича «Южный
федеральный университет
г. Ростов-на-Дону

Научный руководитель: **Коваленко Анна Владимировна,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Леденёва Татьяна Михайловна,**
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой вычислительной математики и
прикладных информационных технологий
ФГБОУ ВО "Воронежский государственный
университет"

Акперов Имран Гурруевич,
доктор экономических наук, профессор,
ректор Южного университета
(Институт управления, бизнеса и права)

Защита состоится **5 июля 2024 года в 16 ч. 30 мин.** на заседании диссертационного совета
ЮФУ 801.02.01 на базе Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И.
Воровича Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул.
Мильчакова, 8А, а. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю. А. Жданова
Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, и
на сайте www.sfedu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,
д.т.н.

Горбанёва Ольга Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время существенно возрастает размер и сложность компаний розничной торговли. Большинство этих организаций не только расширяют свои сферы деятельности в основном бизнесе, но также включают в себя подразделения, соответствующие ранее деятельности их поставщиков. К примеру, 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.

На сегодняшний день отсутствует комплексная модель управления на предприятии розничной торговли для сценарного моделирования, позволяющая учитывать всю сложность процессов операционной деятельности. В отрасли существует необходимость построения новых комплексных 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 (НKK), основанные на синтезе нечёткой логики и теории графов. НKK рисует причинно-следственную картину для представления модели и поведения системы. Однако, текущий математический аппарат НKK 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, которая позволит задать целевое состояние системы и определить необходимые начальные изменения параметров. Возможность решения обратной задачи 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 НKK для решения слабоструктурированных задач, свидетельствует об активном развитии теории в этой области. Число исследовательских работ по НKK в 2010 году почти вдвое превышает число исследовательских работ, представленных в 2006 году, и этот тренд сохраняется до 2022 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., Терехова В.И., Аверкина А.Н., Ярушева С.А., Павлова В. Ю., Ефремову Н.А., Гинис Л.А., Оськина А.Ф., Оськина Д. А. и многих других. Моделированию сложных слабоструктурированных систем

на основе НКК посвящены труды Ларичевой Е.А., Лагерёва Д.Г., Строковой Л.А., Мешалкина В.П., Белозерского А.Ю., Маригодова В.К., Гореловой Г.В., Радченко С.А., Заболотского М.А., Поляковой И. А., Тихонина А.В., Путятю М.М.

В период с 2019 по 2022 год исследователи расширили приложения НКК на такие сферы, как телекоммуникации (Бычков Е.Д., Лузан Д.С.), теория игр (Mohsen Abbaspour Onari, Mustafa Jahangoshai Rezaee), автодорожные карты (Jingyuan Wang, Zhen Peng), электронное обучение (Giuseppe D'Aniello, Massimo de Falco), виртуальные среды (Юрин А.А., Емельяненко А.С.), искусственный интеллект (Gonzalo Nápoles, Agnieszka Jastrzębska), прогнозирование временных рядов (Kaixin Yuan, Frank Vanhoenshoven) и распознавание образов (Georgios D. Karatzinis, Yiannis S. Boutalis). 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 меньших по значению влияний и чувствительности результата моделирования к входным приращениям управляемых концептов, что плохо согласуется с физическим смыслом причинно-следственных отношений между концептами.

Данная работа направлена на разработку системы управления предприятиями розничной торговли и муниципальными образованиями, позволяющую проводить построение и анализ структуры НКК по методу Коско, разработку новых алгоритмов и методов решения обратных задач моделирования для поддержки принятия управленческих решений на основе заданных целевых приращений концептов с использованием теории нечётких реляционных уравнений (НРУ). 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 факторов и, в итоге, решить актуальные задачи в соответствующих областях знаний.

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

Диссертация выполнена на кафедре анализа данных и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет».

Цель и задачи исследования. Цель диссертации состоит в повышении эффективности управления такими организационными системами, как предприятия розничной торговли и муниципальные образования, на основе концепции нечётких когнитивных карт.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести сравнительное исследование методов и алгоритмов построения НКК, методов решения обратных задач в НКК и НРУ;
- 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;
- разработать и программно реализовать алгоритм и методы решения обратной задачи моделирования систем на основе НКК;
- провести анализ проблемы неразрешимости НРУ, разработать метод минимально значимых корректировок;
- развить научно-методологический аппарат математического моделирования и разработать соответствующий программный комплекс для моделирования нечётких слабоструктурированных систем;
- спроектировать и реализовать прототип программного комплекса для анализа системных характеристик НКК и решения задачи динамического моделирования.

Объект исследования: управление слабоструктурированными организационными системами.

Предмет исследования: построение и исследование математических моделей управления организационными системами предприятий розничной торговли и муниципальных образований и их использование для поддержки принятия управленческих решений.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы теории графов, математического моделирования, теории систем, теории нечётких множеств и нечёткой логики, теории когнитивного и имитационного моделирования, нечёткого реляционного исчисления, теории нейронных сетей, теории машинного обучения, численных методов, математической статистики, структурного и модульного программирования, вычислительные эксперименты.

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:

- сформированы и проанализированы математические модели системы розничной торговли и стратегии развития города Краснодара, позволяющие описать комплексные процессы на предприятиях методами НКК и использовать разработанную систему при принятии решений;

- 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;

- впервые описаны модифицированные алгоритмы решения обратной задачи 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 обратной задачи 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;

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

Теоретическая значимость заключается в развитии методов управления социально-экономическими 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, слабоструктурированных социально-экономических 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. Система управления организацией на основе концепции нечётких когнитивных карт должна учитывать эффект влияния различных операций композиции на результат прогноза.

2. Для формирования множества стратегий управления организацией необходимо получить начальные значения управляющих факторов модели посредством решения обратной задачи когнитивного моделирования.

3. При неразрешимости обратной задачи моделирования следует использовать приближённое решение, применяя метод минимально значимой

корректировки и метод оптимизации структуры НКК.

4. Применение модели НКК на предприятии увеличивает скорость принятия управленческих решений и позволяет повысить количество факторов, учтённых при стратегическом планировании.

5. Для научно обоснованного подхода к управлению социально-экономическими системами необходима разработка модульного программного комплекса, интегрирующего результаты опроса экспертов, модели прогноза и стратегического планирования с использованием аппарата нечётких когнитивных карт, позволяющего интегрировать результаты теоретических исследований в используемую на предприятии систему управления.

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 повышению скорости принятия управленческих решений на 45%, повысило количество учтённых факторов при стратегическом планировании с 28 до 47, с высоким ожидаемым экономическим эффектом от внедрения в процесс управления. Программный комплекс «FuzzyM», а также разработанный алгоритм решения обратной задачи 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).

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 8 печатных работах, из которых 4 соответствуют Перечню ЮФУ, в т.ч. 2 статьи опубликованы в журналах Web of Science/Scopus, получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личное участие соискателя в получении результатов.

Основные результаты диссертации получены лично автором, а именно: методы системного анализа НКК с применением различных операций композиции, методы и алгоритмы синтеза множества стратегий управления

системой на основе решения обратной задачи когнитивного моделирования, метод минимально значимой корректировки и метод оптимизации структуры карты при неразрешимости обратной задачи, программный комплекс для поддержки принятия решений.

В работе [1] авторским вкладом является разработанный алгоритм решения обратной задачи в НКК, применение алгоритма для решения транспортной задачи, задачи оценки экологического состояния города, задачи описания работы банковской системы. 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 обратной задачи моделирования, [4] – анализ задачи развития муниципальных образований. В [5] – обоснование рисков использования НКК при управлении бизнес-процессами. В [6,7] – обзор методов прогнозирования развития и алгоритмов обучения сложных систем с применением теории НКК. В [8] авторский вклад заключается в анализе математических моделей в НКК.

Структура и объём работы.

Научно-исследовательская работа состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения, списка литературы, приложений. Общий объём диссертации 151 страница, в том числе 27 рисунков, 21 таблица, 1 приложение, список литературы из 155 наименований.

ОСНОВНОЕ 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 слабоструктурированных 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 слабоструктурированных 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 социально-экономических систем.

Разработанные методы когнитивного анализа основываются на математическом аппарате нечётких когнитивных карт (НKK). Подробно рассмотрена структура НKK, 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:

$$A_i^{(t+1)} = f \left(\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^M w_{ji} A_j^{(t)} \right) \quad (1)$$

где $A(0)$ является начальной активацией концепта, w_{ij} – величина причинно-следственной связи, связывающая концепт C_j с концептом C_i , а $A_i^{(t)}$ характеризует величину активации концепта C_i на временном шаге t .

Отмечено, что на каждом дискретном временном шаге НKK будет генерировать выходной сигнал, содержащий в себе информацию о величине активации всех концептов. Показано, что правило обновления, широко используемое во многих информационных системах, созданных на основе НKK,

не позволяет учитывать прошлые величины концептов. Рассмотрено модифицированное правило обновления, в котором концепты, помимо соответствующих весов и величин активации других концептов, учитывают свои собственные прошлые величины активации. Это правило обновления предпочтительно при обновлении концептов, которые не подвергаются влиянию других концептов и имплицитно устраняет ограничение $i \neq j$, присутствующее в уравнении Коско:

$$A_i^{(t+1)} = f \left(\sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^M w_{ji} A_j^{(t)} + A_i^{(t)} \right) \quad (2)$$

Проведён анализ методов обучения НКК, суть которых заключается в получении матрицы весов $W_{(M \times M)}$, 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, 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. Проведённый анализ позволил определить необходимость рассмотрения существующих методов моделирования нечётких систем и интеграцию их в существующие программные комплексы.

Рассмотрено применение НКК решения различных типов задач, представлен обзор методов решения задач прогнозирования временных рядов, классификации и моделирования сложных систем с использованием НКК.

Показано, что основное приложение НКК состоит в моделировании сценариев развития сложных систем. Перечислены основные алгоритмы, используемые при решении практических задач для сложных слабоструктурированных систем, позволяющие улучшить точность и надежность результатов моделирования.

Описано применение НКК для решения задач прогноза временных рядов и задачи классификации. На основе работ авторов Vanhoenshoven F., Alghzawi A. Z., Parageorgiou E. I. и Froelich W. установлено, что прогнозные модели, основанные на НКК, как правило, сходятся к точечному аттрактору при реализации процесса логического вывода. Проявление этого эффекта в

сценариях с использованием временных рядов нежелательно. Установлена необходимость корректного определения операции композиции для устранения эффекта сходимости. На основе этого вывода сформирована одна из задач исследования. Решение этой задачи является критичным при прогнозировании сценариев развития сложных систем, так как если сеть сойдётся к точечному аттрактору, то прогнозная модель будет непригодна для временного ряда.

Рассмотрена задача классификации паттернов, на основе работ Papakostas G. A., Koulouriotis D. E. и Kannappan A. установлено, что прогнозные оценки низкоуровневых классификаторов на основе НКК часто все ещё ниже оценок их аналогов - «чёрных ящиков». Описаны высокоуровневые классификаторы, позволяющие получить прогнозные оценки на основе НКК. Показано, что применение высокоуровневых классификаторов показывает хорошие результаты по сравнению с традиционными «чёрными ящиками», однако они более не располагают инструментарием для проведения низкоуровневого анализа.

Подробно рассмотрены НКК, разработанные российскими исследователями. Отмечено разнообразие задач и областей применения НКК в проведённых исследованиях. Особенностью работ, опубликованных российскими исследователями, является подробное описание методов балансировки экспертного мнения и статистического анализа компонентов. Такой подход, вероятно, обусловлен необходимостью решения реальных задач и практическим использованием НКК на различных уровнях управления в России. Существует большой спрос на внедрение рассматриваемых систем в процесс менеджмента предприятий и использования для прогноза потенциальных сценариев и путей развития компаний, что подчёркивает актуальность исследования и необходимость внедрения новых методов для моделирования систем. Отмечено отсутствие общей базы знаний о существующих картах как разработанными российскими коллективами, так и зарубежными. Создание такой базы позволило бы упростить внедрение НКК и расширить области их применения.

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

Рассмотрено наиболее значимое разработанное программное обеспечение, разработанное в области моделирования НКК. Делается вывод, что FCM Designer, Mental Modeler, FCM Tool, Курс, Канва, Стратег, ИГЛА и ИКС имеют пользовательский графический интерфейс, удобный для экспертов при анализе сценариев и проведении экспериментов с новыми ситуациями, тогда как JFCM подходит для разработки модулей НКК с возможностью их повторного использования в более сложных сценариях. 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. Несмотря на свои функциональные возможности, представленные программные продукты не

могут ликвидировать отставание разработки полнофункциональных практических приложений НКК от уровня теоретических знаний в этой области. 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.

Во второй главе на основе задач, сформированных при анализе существующих подходов, формируются математические основы разрабатываемой системы. Детально описан алгоритм решения прямой задачи прогнозирования, приведены системные показатели НКК, описаны операции каузальной алгебры в НКК и их влияние на интерпретацию процесса. Сформированы методы применения различных операций каузальной алгебры при моделировании сценариев развития сложных систем. 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.

В модели Силова отношения между концептами НКК представлены в виде весов $w_{ij} \in [-1, 1]$ и рассматриваются как элементы нечёткой матрицы смежности для графа НКК. Так как веса могут быть отрицательными, а операции над нечёткими множествами определены для функции принадлежности на $[0, 1]$, то существует проблема обработки отрицательных влияний. Решение возможно за счет удвоения мощности множества концептов путем перехода от исходной НКК с положительно отрицательными нечёткими связями $W = |w_{ij}|$ к нечёткой матрице положительных связей $r = |r_{ij}|$ размерностью $2n \times 2n$ (n – число концептов).

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

$$\mathbf{R}^2 = \mathbf{R} \circ \mathbf{R} \quad (3)$$

где $\circ$ – выбранная S -норма.

При построении транзитивного замыкания нечёткой матрицы положительных связей $\mathbf{R}$ нечёткие значения выходного концепта получаются с использованием характерных для нечёткой логики операций t -норм над нечёткими значениями приращений входных концептов и весов причинно-следственной связи. Значение выходного концепта A_j , смежного с N входными концептами A_i , определяется следующим образом:

$$A_j^{(t+1)} = S_{i=1}^N (A_i T w_{ij}) \quad (4)$$

где T - операция T -нормы, S - операция S -нормы.

Иллюстрация возможности использования в качестве основы для реализации пересечения нечётких множеств операторов как $\min$, так и *algebraic product*, указывает на неоднозначность способа выполнения данной

операции. Выбор оператора пересечения множеств зависит от конкретного приложения и может приводить как к хорошим, так и к плохим результатам.

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

$$\begin{cases} v_{ij} = \max(r_{2i-1,2j-1}, r_{2i,2j}) \\ \bar{v}_{ij} = -\max(r_{2i-1,2j}, r_{2i,2j-1}) \end{cases}, \quad (5)$$

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

Описаны показатели для системного анализа НКК и их применение при анализе сложной системы. В результате определены показатели взаимного консонанса, диссонанса, положительное и отрицательное влияние концептов друг на друга и на систему в целом при использовании различных операций композиции. Показано влияние оператора композиции на развитие моделируемой системы.

Для получения прогноза развития ситуации на основе построенной когнитивной карты использован метод импульсных процессов. Импульсный процесс позволяет определять состояние концептов в дискретные моменты времени, анализируя которые, эксперт получает прогноз изменения состояния системы при реализации различных стратегий управления и действиях со стороны внешней среды. В рамках данного метода определяется, что состояние j -го концепта в момент времени $t+1$ зависит от внешнего воздействия на него в указанный момент времени, состояния данного концепта в предыдущий момент времени t , а также характера изменения в момент t состояния других концептов, влияющих на данный концепт. Для описания характера изменения параметров когнитивной карты во времени в работе использована следующая модель импульсного процесса:

$$A_i^{(t+1)} = S \left(A_i^{(t)}, q_i^{(t+1)} + o_i^{(t+1)} + \sum_{j=1}^K T(w_{ij}, A_j^{(t)}) \right) \quad (6)$$

где $q_i^{(t+1)}$ – внешнее воздействие на i -й концепт в момент времени $(t+1)$,
 $o_i^{(t+1)}$ – управляющее воздействие на i -й концепт в момент $(t+1)$,
 $w_{ij} = w(A_i, A_j)$ – сила связи между концептами A_i и A_j , $A_j^{(t)}$ – приращение значения j -го концепта в момент времени t , T – операция T -нормы, S – операция S -нормы.

Далее в работе описаны существующие методы поддержки принятия решений, их ограничения и проблемы реализации. Сформирована задача адаптации методов применяемых при решении НРУ для систем, базирующихся на НКК. Проведена постановка обратной задачи для НКК и предложен алгоритм её решения, позволяющий решить задачу поддержки принятия решений в сложных системах.

Для решения обратной задачи рассмотрена структура НКК. Из исходной матрицы $W = |w_{ij}|$ выделены: матрица состояния $A = a_{ijn_x \times n_x}$, матрица управления $B = b_{ijn_x \times n_u}$, матрица цели $C = c_{ijn_y \times n_x}$ и матрица прямого влияния $D = d_{ijn_y \times n_u}$:

$$s(k+1) = W^T \circ s(k) = \begin{bmatrix} \otimes & \otimes & \otimes \\ B & A & \otimes \\ D & C & \otimes \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} u(k) \\ x(k) \\ \otimes \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \otimes \\ x(k+1) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Вектор $s_i(k)$ был разделен на соответствующие векторы $u(k), x(k), y(k)$ по алгоритму: элементы, содержащие 0 в строках матрицы W относятся к управляющим B , содержащие 0 в столбцах матрицы W – к целевым C . В результате получено НРУ для решения обратной задачи в НКК:

$$\begin{aligned} x &= A^* \circ B \circ u_0, \\ y &= C \circ A^* \circ B \circ u_0 \vee D \circ u_0 \end{aligned} \quad (8)$$

где $A^* = \bigcup_{k=0}^{\infty} A^k$ — транзитивное замыкание в нечёткой матричной регулярной алгебре.

Разработан алгоритм решения обратной задачи в НКК, использующий математический аппарат НРУ. Рассмотрена обратная задача для нечётких соответствий, заключающаяся в определении A при известных X, B и $\circ$ в силу коммутативности t -нормы при $\circ = (max, T)$.

Показано, что если НРУ содержит композицию неизвестной вектор-строки и заданной матрицы или заданной матрицы и неизвестного вектор-столбца, то решение сводится к решению системы нечётких полиномиальных уравнений (СНПУ). Рассмотрены основные понятия СНПУ, обозначенного как $A \cdot X = B$:

$$\begin{cases} (a_{11} \wedge x_{11}) \vee \dots \vee (a_{1n} \wedge x_{1n}) = b_1, \\ \dots\dots\dots \\ (a_{m1} \wedge x_{m1}) \vee \dots \vee (a_{mn} \wedge x_{mn}) = b_m. \end{cases} \quad (9)$$

Полный набор решений разрешимой конечной системы левых НРУ определяется максимальным решением и конечным числом минимальных решений.

Множество решений системы нечётких уравнений выпукло упорядочено, т. е., если (x_{ij}) и (y_{ij}) — два различных решения и $x_{ij} \leq z_{ij} \leq y_{ij}$ для любых i и j , то решением будет и (z_{ij}) . Выделена основная задача решения СНПУ для НКК как отыскание основания и всех ответвлений уравнения.

Подробно рассмотрен метод решения НРУ, базирующийся на выделении в исходных уравнениях детерминирующих концептов и использовании понятия доминирующих решений в сочетании с операцией перебора списков, при котором число потенциальных минимальных решений СНПУ не превышает

$$PN1 = \prod_{i=1}^m |H_i| \quad (10)$$

где $|H_i|$ – число коэффициентов H -типа в i -м уравнении $A \cdot X = B$.

Предлагаемый в работе алгоритм, основываясь на доминировании и использовании операций перебора списков, для нахождения только нижних решений, реализует наиболее быстрый подход и более эффективен среди всех доступных алгоритмов. Подход базируется на поиске всех выбранных элементов A_{ij} в A , которые являются решениями i -го уравнения (т. е. A_{ij}, X_j, B_i).

Если система $A \cdot X = B$ разрешима и X является наибольшим решением системы, используя X , отметим все коэффициенты, которые вносят вклад в решение системы. Каждому уравнению $i = \overline{1, m}$ сопоставим множество M_i , содержащее список всех индексов i коэффициентов A_{ij} , которые вносят вклад в решение i -го уравнения при A_{ij}, X_j, B_i .

Определение 1. Множество M_i , элементами которого являются индексы $j \in \{1, \dots, n\}$ в i -м уравнении, в котором $a_{ij} \wedge \hat{x}_j = b_i, X_j, B_i$, называется *маркировочным множеством* для i -го уравнения.

Если j элемент M_i , то это означает, что a_{ij} – коэффициент H -типа, но обратное не всегда верно – может существовать коэффициент H -типа a_{ij} и j не принадлежит M_i . Следовательно, имеет место: $|M_i| \leq |H_i|$, где $|M_i|$ – мощность M_i , а $|H_i|$ – мощность H_i .

Определение 2. Пусть A_l и A_k – l -е и k -е уравнения, соответственно, и $b_l \geq b_k$. Уравнение A_l называется *доминирующим по отношению к уравнению A_k* (и A_k называется *доминируемым A_l*), если для каждого $j = \overline{1, n}$ имеет место: если a_{lj} – коэффициент H -типа, то a_{kj} также является коэффициентом H -типа.

Если A_l – доминирующее уравнение для A_k , то это означает, что всякий раз, когда A_l удовлетворяет решению, это решение также удовлетворяет A_k . Следовательно, A_k является избыточным уравнением, и временная сложность алгоритма может быть оптимизирована с нахождения решений только доминирующих уравнений.

Определение 3. Пусть M_l, M_k принадлежат маркировочным множествам для (9) и $b_l \geq b_k$. Если M_l является подмножеством M_k , то M_l называется *доминирующим множеством над M_k* , а M_k называется *доминируемым множеством M_l* .

Набор всех доминирующих маркировочных множеств для (9) обозначается через $\hat{M}$. Число нижних решений теперь не превышает оценку

$$PN2 = \prod_{i=1}^m |M_i|, \text{ где } M_i \in \hat{M} \quad (11)$$

Новая матрица $\tilde{A} = (\hat{a}_{ij})$ была получена из A^* и $\hat{M}$. Доминируемые множества удалены и $\tilde{A}$ имеет те же решения, что и A .

Полученное максимальное решение соответствует весам входных концептов по отношению к когнитивной карте для консервативной модели системы, минимальные решения соответствуют демократичным или минимально возможным воздействиям на управляющие концепты системы.

Представлен метод минимальных корректировок, используемый при отсутствии явного решения обратной задачи моделирования. При работе с реальными системами нередки случаи, когда изначально заданные целевые показатели недостижимы и приводят к неразрешимости системы. При поиске максимального решения для НРУ можно определить, разрешима ли исходная система относительно целевых концептов. При отсутствии решения для заданных целевых показателей предложено найти скорректированные значения столбца b , подставив в исходное уравнение полученные значения для максимального решения системы уравнений. В результате получим вектор минимальных корректировок целевых показателей b_upd , который всегда $b_upd \leq b_i$.

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. Аналогично при постановке цели моделирования эксперты выделяют управляющие и целевые концепты, не рассматривая существующий каузальный граф. Для выделения этих матриц предлагается ввести дополнительные концепты в НКК, имеющие единственную единичную связь с целевыми или управляющими концептами, задаваемыми экспертом. Такие дополнительные концепты предложено называть буферными, и внедрять их в структуру начальной матрицы НКК для выделения целевых или управляющих концептов в отдельную матрицу, что позволит вычленить из концептов состояний сильно связанной НКК искомые показатели.

В третьей главе сформулированы основные требования к разрабатываемой СППР на основе НКК, приводятся результаты разработки и численного исследования метода формирования стратегий управления на основе решения НРУ. 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 или ситуацию,
- 2) динамическое моделирование развития модели на основе НКК с использованием правила активации с учетом прошлого значения фактора и различных функций активации,
- 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) метод минимальных корректировок при отсутствии явного решения обратной задачи моделирования,
- 8) метод оптимизации структуры НКК для выделения целевых и управляющих концептов в начальной структуре НКК,
- 9) поддержка принятия решений для управления системой путем решения обратной задачи моделирования разработанным методом,
- 10) отображение результатов анализа и возможных стратегий принятия решений в виде таблиц и графиков с возможностью экспорта в MS Excel.

Рассмотрены примеры анализа слабоструктурированных систем. Так, рассмотрены задачи моделирования стратегий развития предприятия розничной торговли и города Краснодара.

С помощью разработанного программного комплекса «FuzzyM» разработана математическая модель предприятия розничной торговли. Описаны основные свойства изучаемой системы как представителя класса организационных систем, выделены концепты рассматриваемой системы и взаимовлияния между ними, проведён структурный анализ классов концептов, прогнозирование развития системы при изменении управляющих концептов, разработаны стратегии развития системы для достижения целевого состояния.

Показано, что компания розничной торговли является сложной организационной системой, состоящей из взаимодействующих компонентов, таких как отношения с поставщиками и клиентами, финансовое и стратегическое планирование, технические операции, управление сотрудниками и многие другие. Исходя из этого, для моделирования системы такого типа необходимо использовать нечёткие методы.

Построена модель предприятия розничной торговли с применением методологии НКК и проведена оценка различных подсистем розничной компании, включая технический уровень развития, взаимодействие с клиентами и сотрудниками, отношения с поставщиками, уровень состояния рынка и финансовую подсистему.

Проведён анализ сценария, определено изменение управляемых концептов, предусматривающее изменение управляемых концептов «Качество продуктов» и «Уровень лояльности сотрудников». Установлено, что в сценарии, когда вместе с качеством продукции будет повышена лояльность сотрудников, стратегия имеет гораздо более сильное влияние на целевой концепт и запустит цикл усиления уровня лояльности клиентов, что приведёт к увеличению прибыли компании.

С помощью модуля системных характеристик разработанного ПК «FuzzyM» 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. Дополнительно

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. Концепт «Уровень обслуживания клиентов» в наибольшей степени, по сравнению с другими концептами, усиливает систему (положительное влияние концепта на систему составляет 0.16), 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 оптимальная t - норма для рассматриваемой системы – алгебраическое произведение, позволяющее сформировать оптимальное количество кластеров при системном анализе.

С помощью разработанного модуля поддержки принятия решений решена обратная задача формирования стратегии развития предприятия розничной торговли. Целевая стратегия состоит в увеличении прибыли и репутации компании. Получено верхнее решение обратной задачи, которое определяет необходимость в незначительном 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 компании и прогнозирования результатов управленческих решений.

Рассмотрена задача формирования стратегии развития города Краснодара. Выделены основные цели моделирования: проверка математических методов описания развития города в НКК, анализ позитивной и негативной составляющих связей в модели развития города, структурный анализ классов концептов, синтез предполагаемых стратегий развития города.

С помощью разработанного ПК «FuzzyM» систематизирован процесс анализа развития города в виде модели на основе НКК. Применение когнитивного метода позволило провести анализ важной управленческой задачи по формированию целей развития и на основе выявленных проблем сформировать задачи управления развитием города. Проведены расчёт и анализ системных показателей НКК и сформированы системные и интегральные показатели взаимовлияния концептов и системы. На основе проведённого анализа можно сделать вывод о том, что 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.

С использованием графического интерфейса 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.

Структурный анализ НКК даёт достаточно информации для «реструктурирования» проблемы, что позволяет найти противоречивые места системы с целью изменения структуры и весов причинно-следственных связей в исходной матрице, что можно рассматривать как обучение стабилизированной НКК.

Описана задача поддержки принятия решения и формирование стратегий развития системы. Заданы целевые приращения концептов в табл. 1.

Таблица 1

Заданные в рамках стратегии приращения целевых концептов

Целевой концепт	Приращение	Консонанс
Туристическая привлекательность города	0.040	0.300
Уровень социального благополучия	0.007	0.177
Эколого-экономическая эффективность	0.001	0.177

При решении задачи получен вектор значений приращений управляющих факторов, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Приращения управляющих концептов при композиции *min-algebraic product*

Управляющий концепт	Верхняя стратегия	I нижняя стратегия	II нижняя стратегия	III нижняя стратегия	IV нижняя стратегия
Уровень обеспеченности "зелеными" территориями	0.011	0.011	0.011	0.011	0.001
Политическая стабильность	0.058	0	0.058	-0.041	0.058
Жилой фонд	0.087	0.087	-0.061	0.087	0

Полученная верхняя 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. При этом консонанс управляемых концептов низкий, поэтому при воздействии на данную систему необходимо стимулировать как положительные, так и отрицательные компоненты стратегии.

Проведён анализ влияния различных операций композиции на формирование стратегий. Делается вывод о том, что при решении обратной задачи 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.

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 и предложены направления дальнейших исследований.

В приложении приведены полученные матрицы взаимовлияний для исследуемых нечетких систем.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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. Таким образом, показано, что разработанные методы позволяют решать задачи прогноза в сложных слабоструктурированных организационных системах.

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 повышению скорости принятия управленческих решения на 45%, повысило количество учтенных факторов при стратегическом планировании с 28 до 47, с высоким ожидаемым экономическим эффектом от внедрения в процесс управления.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из списка Scopus:

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, No. 19. – P. 3452. – DOI 10.3390/math10193452.

2. Petukhova, A. Retail System Scenario Modeling Using Fuzzy Cognitive Maps / A. Petukhova, N. Fachada // Information (Switzerland). – 2022. – Vol. 13, No. 5. – P. 251. – DOI 10.3390/info13050251.

В изданиях из Перечня ЮФУ:

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(99). – С. 135-146. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8262> (дата обращения 12.04.2024) (K2).

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/ru/magazine/archive/n2y2024/9037> (дата обращения 12.04.2024) (K2).

Другие статьи и материалы конференций:

5. 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. – Т. 9, № 1. – Р. 171-177.

6. Petukhova, A. V. Methods for forecasting the development of complex systems using the theory of fuzzy cognitive map / A. V. Petukhova, A. V. Kovalenko // Computational Mathematics and Information Technologies. – 2022. – Vol. 1, No. 2. – Р. 81-95. – DOI 10.23947/2587-8999-2022-1-2-81-95

7. Петухова, А. В. Методы прогнозирования развития сложных систем с применением теории нечетких когнитивных карт / А. В. Петухова, А. В. Коваленко // Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Краснодар, 18-23 апреля 2022 года. – Краснодар : Краснодарский ЦНТИ, 2022. – С. 85-88.

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

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618008 Российская Федерация. Модуль поддержки принятия решений к программе моделирования социально-экономических процессов "FuzzyM" : № 2020616550 : заявл. 29.06.2020 : опубл. 15.07.2020 / А. В. Петухова, А. В. Коваленко.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617520 Российская Федерация. Программа моделирования социально-экономических процессов на основе нечётких когнитивных карт "FuzzyM" : № 2018615414 : заявл. 17.05.2018 : опубл. 26.06.2018 / А. В. Петухова, В. Н. Кармазин.