

На правах рукописи



Исаев Руслан Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННАЯ
ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ
УПРАВЛЕНИЯ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Специальность 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Брянск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Информатика и программное обеспечение»
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель **Подвесовский Александр Георгиевич,**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты **Борисов Вадим Владимирович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительной техники
филиала ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске

Орешков Вячеслав Игоревич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры систем автоматизированного
проектирования вычислительных средств
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»


Защита состоится 25 марта 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного
совета Д 212.211.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», по адресу: 390005, г. Рязань,
ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте
по адресу: <http://rsreu.ru/post-graduate/zashchita>

Отзывы на автореферат присылать по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина,
59/1, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.211.02.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.02,
доктор технических наук, доцент



Перепелкин Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В классе социально-экономических и организационных систем существует обширный подкласс систем, неотъемлемым свойством которых является слабая структурированность, характеризующаяся наличием в системе большого числа разнородных факторов, сложно поддающихся формализации, а также преобладанием факторов качественной природы. Возникающие в таких системах задачи управления характеризуются, как правило, отсутствием достаточного объема информации для принятия точных управленческих решений, однако имеющиеся в наличии данные позволяют проводить разведочный, оценочный анализ стратегий управления, с целью прогнозирования сценариев развития проблемных ситуаций при различных управляющих воздействиях. Одним из подходов, положительно зарекомендовавшим себя при решении подобных задач, является когнитивный подход.

В качестве основного инструмента моделирования задач управления и принятия решений в социальных и экономических системах, применяемого в рамках когнитивного подхода, выступают когнитивные модели. Идеи и положения когнитивного моделирования развиваются в работах отечественных ученых: Н.А. Абрамовой, З.К. Авдеевой, В.В. Борисова, В.Е. Гвоздева, Г.В. Гореловой, Д.А. Новикова, Б.Г. Ильясова, В.А. Камаева, С.В. Ковриги, А.А. Кулинича, Д.Г. Лагерева, В.И. Максимова, Л.В. Массель, А.Г. Подвесовского, А.Н. Райкова, В.Б. Силова, А.С. Федулова, а также зарубежных: R. Axelrod, P.P. Groumpos, V. Kosko, E.I. Papageorgiou, F.S. Roberts, J.L. Salmeron, C.D. Stylios.

В качестве математического аппарата, применяемого для представления когнитивных моделей и лежащего в основе методов их анализа, чаще всего используется нечеткая логика. Благодаря этому возник целый класс когнитивных моделей, основанный на различных типах нечетких когнитивных карт (НКК).

Большое количество современных публикаций, затрагивающих как теоретические вопросы когнитивного моделирования, так и вопросы его практического применения в различных сферах, позволяет сделать вывод о мультипредметности и междисциплинарности когнитивного подхода и о высоком интересе к нему научного сообщества. Наблюдается интерес и к программной поддержке когнитивных моделей, существует ряд систем когнитивного моделирования: «Канва», «Ситуация», «Strice», «Mental Modeler», «FCM Expert» и другие. Одной из таких систем является система поддержки принятия решений (СППР) «ИГЛА» (Интеллектуальный Генератор Лучших Альтернатив), позволяющая осуществлять генерацию и отбор сценариев управления слабоструктурированными системами на основе нечетких когнитивных моделей.

Одной из разновидностей НКК, хорошо зарекомендовавшей себя в задачах разведочного анализа и при моделировании задач управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах в условиях наличия большого числа факторов, сложно поддающихся измерению, являются НКК В.Б. Силова, которые сочетают в себе наглядность и хорошую

интерпретируемость модели с одной стороны и широкие возможности анализа с другой стороны. Так, значимым преимуществом НКК Силова перед другими видами моделей является хорошо развитый аппарат структурно-целевого анализа. Однако следует отметить ограничения математического аппарата НКК Силова, проявляющиеся на других этапах моделирования и выражающиеся, в числе прочего, в недостаточном учете человеческого фактора. Во-первых, недостаточно разработаны методы их построения, в частности, отсутствует комплексный подход к структурной и параметрической идентификации НКК Силова, допускающий совместное применение экспертных знаний и статистических данных. Во-вторых, аппарат сценарного анализа требует доработок в части учета точки зрения ЛПР на характер передачи влияний между концептами НКК. В-третьих, отсутствуют эффективные методы визуализации НКК, позволяющие упрощать визуальное восприятие когнитивной модели со стороны ЛПР, тем самым повышая эффективность ее визуального анализа.

Таким образом, выявлено **противоречие** между потенциальными возможностями существующей технологии поддержки управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова и ограничениями ее математического обеспечения. Разрешение данного противоречия является актуальной научной задачей.

Объектом исследования являются процессы управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе нечетких когнитивных моделей.

Предметом исследования являются подходы, методы и модели идентификации, сценарного анализа и визуализации нечетких когнитивных карт Силова, направленные на повышение эффективности управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах за счет разработки новых и совершенствования существующих подходов, методов и моделей идентификации, сценарного анализа и визуализации нечетких когнитивных карт Силова.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд **задач**:

1. Предложить новую информационную технологию поддержки управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова, с реализацией идентификации, сценарного анализа и визуализации НКК.
2. Разработать подход к структурной и параметрической идентификации НКК Силова, основанный на совместном применении экспертных знаний и статистической информации и обеспечивающий повышение внутренней согласованности экспертных суждений.
3. Разработать обобщенную модель импульсного процесса для сценарного анализа НКК Силова для обеспечения более детального учета точки зрения ЛПР на характер передачи влияний между концептами НКК.

4. Разработать подход к визуализации НКК, основанный на формализации понятия когнитивной ясности и направленный на упрощение визуального восприятия когнитивной модели со стороны ЛПР.
5. Выполнить программную реализацию предложенных подходов, методов и моделей и провести их апробацию на прикладных задачах управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах.

Методы исследования. В ходе выполнения работы применялись положения теории управления организационными системами и теории принятия решений, методы эконометрики, теории графов, положения теории нечетких множеств, методы получения и обработки экспертной информации, теория и методы когнитивного моделирования.

Научная новизна результатов:

1. Предложена информационная технология поддержки управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова, реализующая новые подходы, модели и методы идентификации, сценарного анализа и визуализации НКК Силова. (*п. 1, 12 паспорта специальности*)
2. Разработан новый подход к структурной и параметрической идентификации НКК Силова, включающий в себя (*п. 4, 5, 6, 7 паспорта специальности*):
 - а) модификации экспертных методов построения функций принадлежности дискретных нечетких множеств: метода парных сравнений Т. Саати, отличающуюся использованием альтернативной шкалы оценки превосходства, и метода множеств уровня Р. Ягера, отличающуюся наличием механизма оценки согласованности суждений эксперта;
 - б) методику идентификации НКК Силова на основе статистических данных, отличающуюся способностью обработки данных, представленных в форме как пространственной выборки, так и временных рядов.
3. Впервые предложена обобщенная модель импульсного процесса для сценарного анализа НКК Силова, отличающаяся возможностью учета различных смысловых интерпретаций импульса и разного темпа передачи влияний между концептами. (*п. 4, 5 паспорта специальности*)
4. Предложен новый подход к визуализации НКК с использованием разработанного метода построения оптимальной метафоры визуализации на основе формализованных критериев когнитивной ясности. (*п. 4, 5 паспорта специальности*)

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов управления и принятия решений в социально-экономических системах за счет разработки новых и совершенствования существующих методов структурной и параметрической идентификации, сценарного анализа и визуализации НКК Силова в рамках предложенной информационной технологии. Кроме того, доработка метода множеств уровня для построения функций принадлежности дискретных нечетких множеств, состоящая в добавлении в него процедуры оценки

согласованности суждений эксперта, вносит вклад в целом в развитие методов теории нечетких множеств.

Практическая значимость работы состоит в следующем.

1. Выполнена программная реализация полученных теоретических результатов в составе СППР «ИГЛА»: разработаны подсистема идентификации НКК и подсистема визуализации НКК, а также расширены возможности ядра СППР «ИГЛА» за счет реализации обобщенной модели импульсного процесса для сценарного анализа НКК.
2. Разработанное математическое и программное обеспечение поддержки когнитивного моделирования применялось при решении ряда прикладных задач:
 - а) планирование работ и оценка рисков на ранних стадиях жизненного цикла программных проектов (совместно с ООО «КИТ-Интегратор»);
 - б) исследование стратегий управления комплексным развитием сельских территорий (совместно с ВНИИЭиН – филиалом ФГБНУ «Федеральный Ростовский аграрный научный центр»);
 - в) моделирование трудноформализуемых задач принятия решений в управлении процессом организации производства (совместно с Инжиниринговым центром в области высокотехнологичного машиностроения “HIGH-TECH ENGINEERING” Брянского государственного технического университета).
3. Результаты работы внедрены в учебный процесс БГТУ при подготовке магистров по направлениям «Программная инженерия» и «Информатика и вычислительная техника» (дисциплина «Интеллектуальные системы»).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная информационная технология поддержки управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова расширяет возможности когнитивного подхода к управлению и принятию решений на основе НКК и обеспечивает более существенный учет человеческого фактора.
2. Разработанный подход к структурной и параметрической идентификации НКК Силова позволяет:
 - а) при применении модифицированных экспертных методов повысить точность и достоверность результатов параметрической идентификации НКК, в том числе, снизить влияние внутренней несогласованности экспертных суждений на результаты идентификации;
 - б) повысить обоснованность результатов идентификации НКК за счет учета статистических данных, в том числе, обеспечить возможность корректного установления факта наличия влияний между концептами, а также сократить время работы экспертов в ходе идентификации НКК.
3. Обобщенная модель импульсного процесса для сценарного анализа НКК Силова позволяет учитывать различные точки зрения ЛПР на характер передачи влияний между концептами НКК, за счет чего могут быть выявлены

ранее не обнаруженные эффективные стратегии управления моделируемой системой.

4. Предложенный подход к визуализации НКК Силова позволяет упростить для ЛПР восприятие когнитивной модели и повысить эффективность ее визуального анализа.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV международной конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2016)» (Уфа, 2016); VIII международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке и образовании» (Брянск, 2016); I и II международных научных конференциях «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» (Москва, 2016, 2017); II международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017» (Рязань, 2017); III и IV международных конференциях «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017, ИТНТ-2018)» (Самара, 2017, 2018); 28-й и 29-й международных конференциях по компьютерной графике и машинному зрению «ГрафиКон-2018» (Томск, 2018) и «ГрафиКон-2019» (Брянск, 2019). Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программных продуктов для ЭВМ и 4 документа о внедрении.

Результаты исследования использовались при выполнении финансируемого РФФИ научного проекта № 19-07-00844 по теме «Новые методы формирования и применения многомерных визуальных моделей для представления, обработки, анализа, интерпретации и использования больших мультисенсорных данных».

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований отражены в 17 научных работах, из которых 5 опубликованы в рецензируемых журналах из Перечня ВАК РФ, 6 – в изданиях, индексируемых в международной библиографической базе Scopus.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором: предложена новая информационная технология управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова, разработан новый подход к структурной и параметрической идентификации НКК Силова, предложена обобщенная модель импульсного процесса для сценарного анализа НКК Силова, предложен новый подход к визуализации НКК. Постановка задач исследования и формулировка положений научной новизны осуществлялись совместно с научным руководителем. При решении прикладных задач в рамках апробации результатов исследования, в качестве экспертов в предметных областях привлекались Копелиович Д.И., Сафонов А.Л., Вилюха А.В., Титарев Д.В., Подгорская С.В., Антонова Н.И., Тарасов А.С., Бахматова Г.А.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение, библиографический список из 138 наименований и 3 приложения. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста без библиографического списка и приложений, включает 68 рисунков и 35 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертации, ставятся цель и задачи исследования, определяются научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, рассматривается структура работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ проблем управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК.

Рассмотрены особенности когнитивного подхода к управлению и принятию решений в социально-экономических системах. На примере проанализированных работ показана актуальность задачи повышения эффективности моделирования слабоструктурированных систем при помощи НКК.

Приведен краткий обзор существующих видов когнитивных моделей и обоснован выбор нечетких когнитивных карт Силова как предмета исследования.

Рассмотрены возможности СППР на основе НКК Силова «ИГЛА». Выделен ряд имеющихся недостатков данной системы, ограничивающих потенциал ее применения. Ключевыми из них являются слабая поддержка методов идентификации НКК, ограниченные возможности сценарного анализа, отсутствие эффективной поддержки визуализации.

В рамках исследования использован известный подход к идентификации параметров НКК Силова на основе экспертных методов построения функций принадлежности дискретных нечетких множеств. Данный подход предполагает рассмотрение нечетких множеств двух следующих типов.

1. Нечеткое множество концептов, подверженных влиянию со стороны некоторого выбранного концепта A (рисунок 1, а):

$$A_{\rightarrow} = \{w_1 / B_1, w_2 / B_2, \dots, w_m / B_m\}. \quad (1)$$

2. Нечеткое множество концептов, влияющих на концепт A (рисунок 1, б):

$$A_{\leftarrow} = \{p_1 / C_1, p_2 / C_2, \dots, p_k / C_k\}. \quad (2)$$

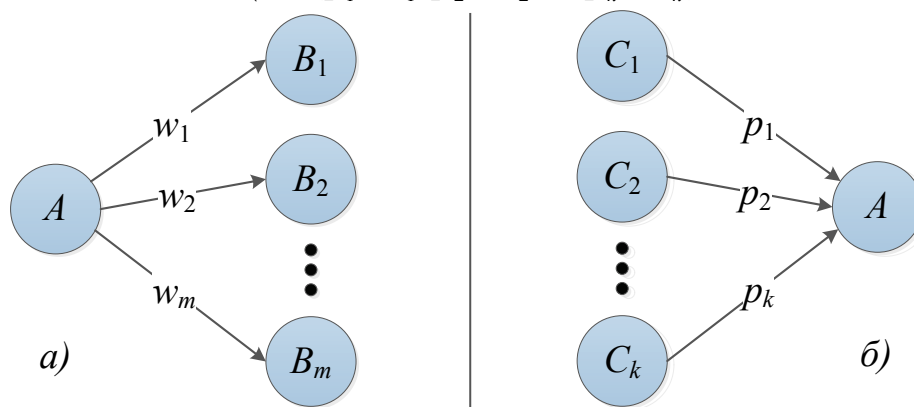


Рисунок 1 – Фрагменты НКК, представляющие нечеткое множество концептов, подверженных влиянию (а), и нечеткое множество влияющих концептов (б)

Приведены описания двух методов, применяемых в рамках данного подхода: метода парных сравнений Т. Саати и метода множеств уровня Р. Ягера.

Для каждого из методов выявлены и проанализированы его недостатки в контексте применения в данной задаче, и определены направления работы для устранения этих недостатков. В случае с методом парных сравнений недостаток

относится к используемой оценочной шкале, и состоит в ее недостаточной выразительной способности, что существенно ограничивает возможности эксперта. Таким образом, необходима разработка альтернативной шкалы оценки степеней превосходства в методе парных сравнений для ее использования в задаче определения весов связей НКК. Недостатком метода множеств уровня является отсутствие в нем процедуры оценки внутренней согласованности суждений эксперта. В связи с этим необходима разработка данной процедуры и обоснование критерия оценки достаточности степени согласованности.

Описаны известные подходы к идентификации параметров НКК Силова на основе статистических данных, проанализированы их недостатки. Обоснована необходимость разработки новой методики структурной и параметрической идентификации НКК Силова на основе статистических данных, представленных как в форме пространственной выборки, так и в форме временных рядов. Это способствует повышению обоснованности получаемых моделей, а также корректности решения задачи структурной идентификации НКК. Выделено основное требование к разрабатываемой методике, а именно, существенный учет различий между формами представления данных и обработка разных форм разными методами.

Сделан вывод о необходимости разработки нового подхода к структурной и параметрической идентификации НКК Силова, основанного на совместном применении экспертных знаний и статистической информации и, таким образом, объединяющего экспертные методы и методику идентификации НКК Силова на основе статистических данных.

Проанализированы ограничения существующего аппарата импульсных процессов, лежащего в основе методов сценарного анализа НКК Силова. Обоснована необходимость разработки моделей импульсного процесса, основанных на альтернативных подходах к интерпретации влияний между концептами и предусматривающих учет разнотемповости влияний. Это обеспечит возможность более детального учета точки зрения ЛПР на характер передачи влияний между концептами НКК, что позволит повысить эффективность сценарного анализа НКК за счет увеличения количества рассматриваемых сценариев.

Рассмотрены понятия и проблемы, связанные с этапом визуализации НКК. Важность поддержки данного этапа обусловлена тем, что при когнитивном подходе визуализация из средства отображения информации превращается в полноценный инструмент анализа и моделирования. Отмечено, что существующие подходы к визуализации графов не учитывают специфику НКК и потому не позволяют упростить для ЛПР визуальное восприятие когнитивной модели. Рассмотрено понятие когнитивной ясности (обозначающее простоту интуитивного восприятия некоторой информации) применительно к НКК и сделан вывод о необходимости разработки подхода к визуализации НКК, основанного на формализации данного понятия.

Таким образом, необходима разработка новой информационной технологии управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-

экономических системах на основе НКК Силова, расширяющей существующую технологию за счет реализации новых подходов и методов идентификации, сценарного анализа и визуализации НКК.

В результате проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе описаны предлагаемые решения в области идентификации, сценарного анализа и визуализации НКК Силова. Глава поделена на четыре части.

В первой части главы приведено описание предлагаемой информационной технологии управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова (рисунок 2). На схеме показаны авторские решения в составе технологии, обеспечивающие поддержку идентификации, сценарного анализа и визуализации НКК.

Вторая часть главы посвящена разработке подхода к идентификации НКК Силова, основанного на совместном применении экспертных знаний и статистической информации.

При этом этап идентификации может быть разделен на два подэтапа:

1) структурная идентификация, которая подразумевает определение множества концептов и четкого отношения на этом множестве, т.е. установление самого факта наличия связей между концептами;

2) параметрическая идентификация, которая подразумевает переход от четкого отношения к нечеткому, т.е. определение весов связей (интенсивностей влияний) между концептами.

Представлены модификации метода парных сравнений Т. Саати и метода множеств уровня Р. Ягера, исправляющие выявленные недостатки данных методов в задаче определения весов связей НКК. Модификация метода парных сравнений основана на применении альтернативной шкалы оценки превосходства, свободной от выявленного недостатка классической шкалы. Значения элементов предложенной альтернативной шкалы имеют вид $a_i = \frac{9}{10-i}$, где $i = 1, \dots, 9$.

Суть модификации метода множеств уровня заключается во введении в классическую версию метода процедуры оценки степени согласованности суждений эксперта. Для изложения предлагаемой процедуры был произведен переход к представлению экспертных суждений в форме бинарной матрицы. Элемент матрицы B_{ij} равен 1, если эксперт указал на принадлежность элемента x_j множеству уровня α_i , и равен 0 в противном случае. Тогда суждения являются согласованными относительно элемента x_j , если

$$\forall i, k (B_{i,j} = 1) \wedge (B_{k,j} = 0) \Rightarrow i < k. \quad (3)$$

Процедура основана на оценке количества перестановок элементов в j -м столбце матрицы, приводящих к выполнению условия (3). Полученная в итоге выполнения процедуры величина m_j характеризует степень согласованности суждений относительно элемента x_j . Введен и обоснован критерий необходимости пересмотра суждений эксперта. За основу взят подход, используемый в методе парных сравнений и основанный на нахождении среднего значения индекса согласованности как случайной величины. Показано, что такое значение может быть вычислено по формуле (M – количество множеств уровня):

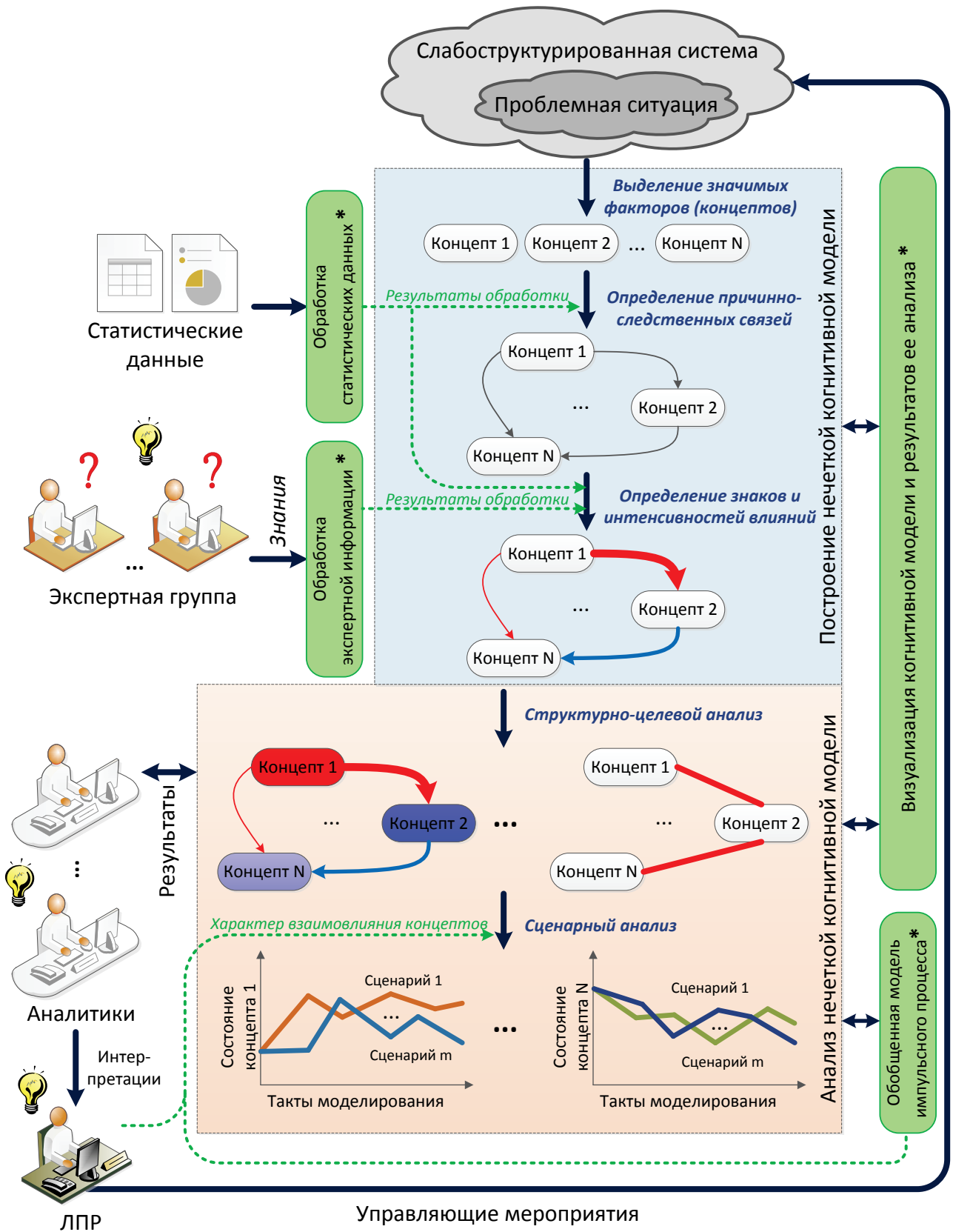


Рисунок 2 – Информационная технология поддержки управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова. Символом (*) отмечены авторские решения

$$m_{cp} = \frac{M(M-1)}{8}. \quad (4)$$

Представлено условие необходимости пересмотра суждений: $\exists j : m_j \geq m_{cp}$.

Описана методика идентификации НКК Силова на основе статистических данных и методов их обработки. В случае, когда статистические данные о концептах представлены в форме пространственной выборки, а также соблюдены известные условия применимости регрессионного анализа, для идентификации параметров НКК предлагается применять модель множественной регрессии. При этом коэффициенты регрессии не могут быть напрямую использованы для оценки силы влияния между концептами по причине своей зависимости от единиц измерения, в которых представлены статистические данные. Этим обоснована необходимость перехода от коэффициентов регрессии к безразмерным величинам, характеризующим силу влияний концептов. Показано, что в роли таких величин могут выступать коэффициенты эластичности. Для удовлетворения ограничениям на значения весов связей НКК Силова описан способ нормализации коэффициентов эластичности с использованием асимметричной функции сигмоидального типа, позволяющей проводить нормализацию положительных и отрицательных коэффициентов по разным правилам. Также описана проблема мультиколлинеарности в контексте идентификации параметров НКК и даны рекомендации по ее устранению.

В более распространенном случае, когда статистические данные о концептах представлены в форме временных рядов, предлагается решать задачу структурной идентификации путем применения теста Грэнджера на причинность. При этом обнаружение причинности по Грэнджеру между временными рядами является необходимым, но не достаточным условием наличия причинно-следственной связи между соответствующими концептами. Поэтому окончательное решение о добавлении связи в когнитивную модель остается за экспертом. Идентификацию параметров НКК предлагается проводить путем анализа частного случая модели временного ряда с распределенным лагом:

$$y_t = a_0 + a_1 x_{t-1} + u_t, \quad (5)$$

где a_0 – свободный член; a_1 – искомый коэффициент; u_t – ошибка.

В третьей части описана обобщенная модель импульсного процесса для сценарного анализа НКК Силова. Эта модель, с одной стороны, включает в себя ряд известных моделей в качестве частных случаев, а с другой стороны, создает основу для построения других реализаций модели импульсного процесса. Отличием обобщенной модели от разработанных ранее является возможность моделирования различных смысловых интерпретаций влияний между концептами и разного темпа передачи влияний, что обеспечивает более детальный учет точки зрения ЛПР на характер передачи влияний между концептами НКК.

Предложены две альтернативные реализации обобщенной модели импульсного процесса, предполагающие различные интерпретации импульса.

В одной из них импульс показывает, *на какую долю* от предыдущего состояния изменилось состояние концепта. Такая модель имеет следующий вид:

$$v_i(t+1) = \max \left(\min \left(v_i(t) \left(1 + u_i(t+1) + q_i(t+1) + \sum_{j=1}^K w_{ji} p_j(t-l_{ji}+1) \right), 1 \right), 0 \right), \quad (6)$$

где $v_i(t+1)$ и $v_i(t)$ – состояния концепта e_i в моменты времени $(t+1)$ и t ; $u_i(t+1)$ – управляющее воздействие на e_i в момент времени $(t+1)$; $q_i(t+1)$ – возмущающее воздействие на e_i в момент $(t+1)$; w_{ji} – интенсивность влияния e_j на e_i ; $p_j(t-l_{ji}+1)$ – импульс концепта e_j в момент времени $(t-l_{ji}+1)$; l_{ji} – время передачи влияния от e_j на e_i .

В другой модели импульс показывает, *во сколько раз* от предыдущего состояния изменилось состояние концепта. Эта модель имеет следующий вид:

$$v_i(t+1) = \min \left(v_i(t) u_i(t+1) q_i(t+1) \prod_{j=1}^K (p_j(t-l_{ji}+1))^{w_{ji}}, 1 \right). \quad (7)$$

В четвертой части предложен подход к визуализации НКК Силова, основанный на понятии метафоры визуализации, использовании алгоритмов укладки графов и формализованных критериев когнитивной ясности. В рамках подхода разработан метод построения оптимальной метафоры визуализации (рисунок 3). Его идея состоит в генерации большого числа укладок когнитивного графа с последующим выбором из числа сгенерированных укладок той, которая в наибольшей степени удовлетворяет критериям когнитивной ясности и, таким образом, упрощает восприятие когнитивной модели для ЛПР. Для генерации укладок когнитивного графа применяются известные алгоритмы, в частности, LinLog и ISOM. Для обеспечения возможности автоматического оценивания укладок по критериям когнитивной ясности была проведена формализация данных критериев с использованием положений теории нечетких множеств.

Третья глава состоит из двух частей. В первой части описана программная реализация предложенных подходов, методов и модели в рамках подсистем идентификации и визуализации НКК в составе СППР «ИГЛА» версии 4.0 (рисунок 4). Также расширены возможности подсистемы сценарного анализа за счет реализации в ее рамках обобщенной модели импульсного процесса.

Во второй части главы для оценки эффективности работы авторских решений была проведена их экспериментальная проверка на синтетических тестах. Так, установлено, что применение модифицированного метода парных сравнений позволяет в среднем повысить точность идентификации параметров НКК в 5-12 раз. Эксперимент проводился на большом количестве матриц парных сравнений, было сгенерировано до 1 млн. матриц размерности от 2 до 10.

В рамках другого теста проводился сценарный анализ НКК с применением реализаций обобщенной модели импульсного процесса. Показано, что применение двух описанных реализаций в дополнение к базовой позволяет рассмотреть в 3 раза больше сценариев, за счет чего могут быть выявлены новые эффективные (недоминируемые) стратегии управления моделируемой системой.

Тестирование предложенного подхода к визуализации НКК показало, что его применение позволяет снизить временные затраты на построение изображений НКК, обладающих свойством когнитивной ясности, в среднем в 4-5 раз и

уменьшить время интерпретации системных показателей НКК в ходе структурно-целевого анализа в среднем в 3-4 раза.



Рисунок 3 – Алгоритм метода построения оптимальной метафоры визуализации НКК

Результаты экспериментальной проверки позволили сделать вывод о повышении эффективности использования разработанной информационной технологии ЛПР, экспертами и аналитиками на всех этапах когнитивного моделирования.

Четвертая глава посвящена апробации расширенной СППР «ИГЛА» при построении и анализе нечетких когнитивных моделей для трех прикладных задач.

Для первой задачи была построена нечеткая когнитивная модель анализа и планирования программных проектов, в основу которой положена известная системная модель «Пирамида программного проекта». В соответствии с предложенной информационной технологией (рис. 2), была построена НКК, содержащая 8 концептов, характеризующих параметры жизненного цикла программного проекта с учетом ресурсов проекта и точки зрения правообладателей. С применением разработанного подхода к идентификации НКК были выявлены влияния между концептами и оценены их интенсивности. Первым этапом исследования НКК являлся структурно-целевой анализ. На рисунке 4

показано распределение влияний концептов на модель в целом. Толщина дуг графа пропорциональна интенсивности влияний между концептами, при этом красный цвет соответствует положительному влиянию, синий – отрицательному. Интенсивность цветов концептов пропорциональна их влиянию на модель – так, наибольшее влияние оказывает концепт «Объем требований заказчика». Результаты структурно-целевого анализа послужили исходными данными для поиска и исследования стратегий управления с помощью сценарного анализа. Концепты «Ценность ПП с точки зрения пользователей» и «Количество доработок на стадии внедрения» были выбраны в качестве целевых, а «Объем требований заказчика» и «Сложность ТЗ» – в качестве управляемых. Авторская модель импульсного процесса позволила выявить и проанализировать более 140 сценариев, каждый из которых отражает динамику состояния указанных выше целевых параметров при определенных воздействиях на управляемые. На рисунке 5 приведены результаты моделирования двух сценариев, при этом видно, что сценарий, соответствующий альтернативе 33, обеспечивает лучшее приближение к заданным целевым показателям.

В рамках второй задачи была разработана нечеткая когнитивная модель для исследования стратегий управления комплексным развитием сельских территорий. Модель содержит 11 концептов, отражающих экономические, социально-демографические, экологические и другие факторы развития села. Интенсивности влияний между концептами оценивались на основе данных Росстата, с применением авторской методики идентификации НКК. Третья задача посвящена моделированию трудноформализуемых задач организации производства, которые решаются преимущественно на основе опыта и знаний экспертов. Были построены и исследованы нечеткие когнитивные модели принятия концептуальных решений на ранних стадиях проектирования оснастки.



Рисунок 4 – Представление результатов структурно-целевого анализа НКК в СППР «ИГЛА»

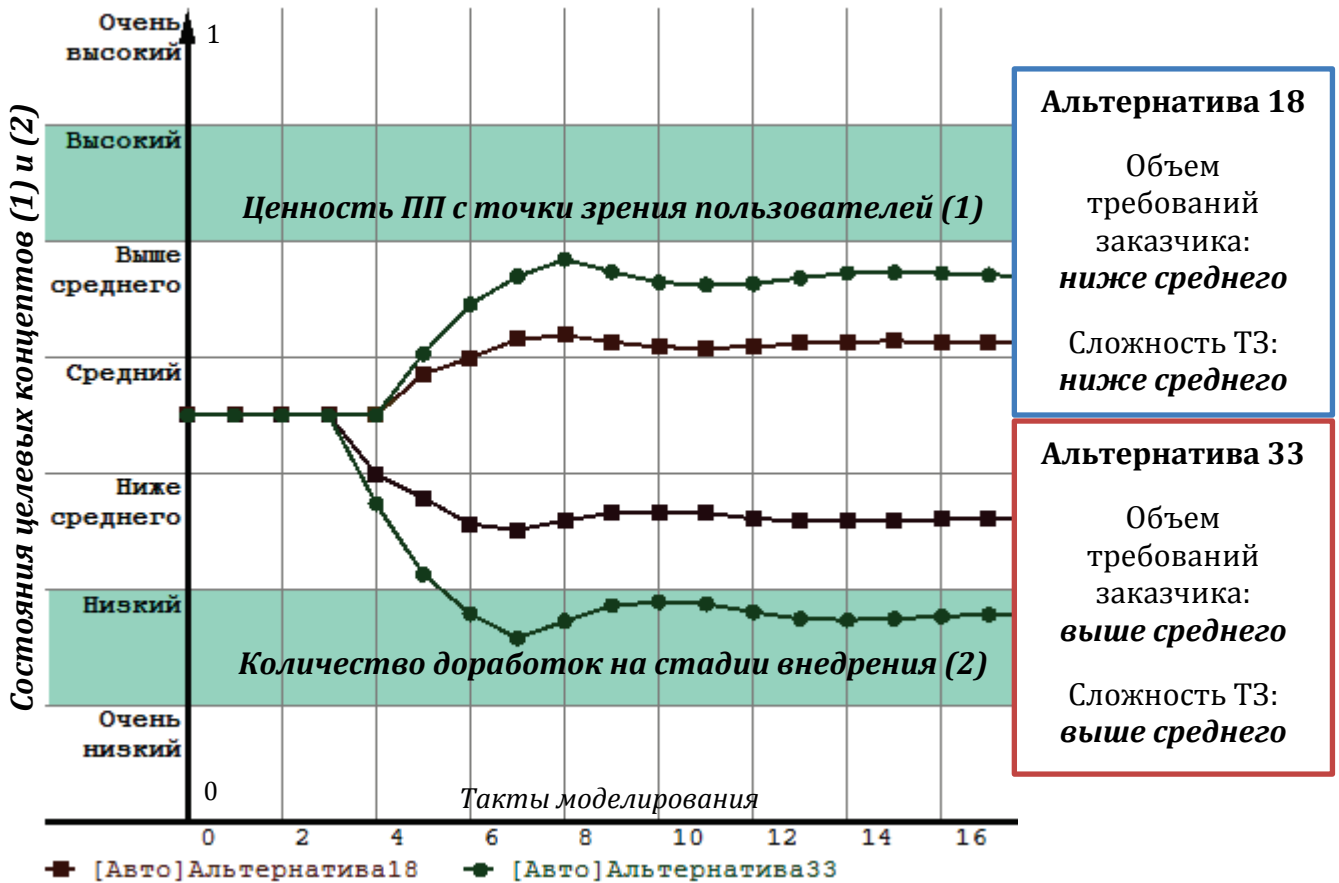


Рисунок 5 – Представление результатов сценарного анализа НКК в СППР «ИГЛА»

По результатам апробации предложенных решений в прикладных задачах установлено, что их применение позволило: повысить обоснованность нечетких когнитивных моделей; сократить время поиска и анализа получаемых на их основе решений; обеспечить возможность нахождения неочевидных для экспертов и ЛПР сценариев управления; повысить вероятность обнаружения ошибок, допущенных при построении когнитивной карты. Достоверность полученных результатов моделирования была подтверждена специалистами в соответствующих предметных областях, что отражено в имеющихся документах о внедрении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача создания новых и совершенствования существующих методов и программных средств поддержки нечетких когнитивных моделей для повышения эффективности когнитивного подхода и развития новых информационных технологий в управлении слабоструктурированными социально-экономическими системами.

Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем.

1. Предложена информационная технология поддержки управления и принятия решений в слабоструктурированных социально-экономических системах на основе НКК Силова, расширяющая возможности когнитивного подхода к управлению и принятию решений и обеспечивающая более существенный

учет человеческого фактора за счет реализации новых подходов, моделей и методов идентификации, сценарного анализа и визуализации НКК Силова.

2. Разработан подход к структурной и параметрической идентификации НКК Силова, включающий в себя:
 - а) модификации экспертных методов построения функций принадлежности дискретных нечетких множеств: метода парных сравнений Т. Саати, применение которой позволяет повысить точность результатов параметрической идентификации НКК в среднем в 5-12 раз в зависимости от числа связей, подлежащих сравнению, и метода множеств уровня Р. Ягера, применение которой позволяет повысить достоверность результатов параметрической идентификации НКК за счет снижения влияния внутренней несогласованности экспертных суждений на результаты идентификации;
 - б) методику идентификации НКК Силова на основе статистических данных, применение которой позволяет сократить время работы экспертов в ходе идентификации НКК (в среднем в 2,5 раза для НКК, содержащих от 8 до 15 концептов), а также повысить обоснованность получаемых НКК за счет учета статистических данных, в том числе, обеспечить возможность корректного установления факта наличия влияний между концептами.
3. Предложена обобщенная модель импульсного процесса для сценарного анализа НКК Силова, допускающая учет различных точек зрения ЛПР на характер передачи влияний между концептами НКК, что позволяет в ходе сценарного анализа НКК рассмотреть дополнительные сценарии (при этом общее количество анализируемых сценариев возрастает в 3 раза), за счет чего могут быть выявлены ранее не обнаруженные эффективные стратегии управления моделируемой системой.
4. Предложен новый подход к визуализации НКК с использованием разработанного метода построения оптимальной метафоры визуализации на основе формализованных критериев когнитивной ясности, позволяющий упростить для ЛПР восприятие когнитивной модели и повысить эффективность ее визуального анализа, а именно: снизить временные затраты на построение изображений НКК, обладающих свойством когнитивной ясности, в среднем в 4-5 раз; уменьшить время интерпретации системных показателей НКК в ходе структурно-целевого анализа в среднем в 3-4 раза; увеличить вероятность визуального обнаружения ошибок, допущенных при построении НКК.
5. Выполнена программная реализация полученных теоретических результатов в составе СППР «ИГЛА»: разработаны подсистема идентификации НКК и подсистема визуализации НКК, а также расширены возможности ядра СППР «ИГЛА» за счет реализации обобщенной модели импульсного процесса для сценарного анализа НКК.
6. Разработанное математическое и программное обеспечение поддержки когнитивного моделирования применялось на практике при планировании работ и оценке рисков на ранних стадиях жизненного цикла программных проектов, исследовании стратегий управления комплексным развитием

сельских территорий, моделировании трудноформализуемых задач принятия решений в управлении процессом организации производства.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК

1. **Исаев, Р.А.** Оценка согласованности суждений эксперта при построении функции принадлежности нечеткого множества методом множеств уровня / **Р.А. Исаев**, А.Г. Подвесовский // Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование». – 2017. – Т. 13. – № 3. – С. 9-15.
2. Копелиович, Д.И. Применение нечетких когнитивных моделей в автоматизации проектирования технологической оснастки / Д.И. Копелиович, А.Г. Подвесовский, А.Л. Сафонов, А.В. Вилюха, **Р.А. Исаев** // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2018. – № 3. – С. 20-35.
3. Подвесовский, А.Г. Нечеткие когнитивные модели в задачах анализа и планирования программных проектов / А.Г. Подвесовский, Д.В. Титарев, **Р.А. Исаев** // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 8. – С. 22-31.
4. Подгорская, С.В. Построение нечетких когнитивных моделей социально-экономических систем на примере модели управления комплексным развитием сельских территорий / С.В. Подгорская, А.Г. Подвесовский, **Р.А. Исаев**, Н.И. Антонова // Бизнес-информатика. – 2019. – Т. 13. – № 3. – С. 7-19.
5. Подгорская, С.В. Моделирование сценарного развития сельских территорий на основе нечеткой когнитивной модели / С.В. Подгорская, А.Г. Подвесовский, **Р.А. Исаев**, А.С. Тарасов, Г.А. Бахматова // Проблемы управления. – 2019. – № 5. – С. 49-59.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной библиографической базе Scopus

6. **Isaev, R.A.** Generalized Model of Pulse Process for Dynamic Analysis of Sylov's Fuzzy Cognitive Maps / **R.A. Isaev**, A.G. Podvesovskii // CEUR Workshop Proceedings of the Mathematical Modeling Session at the International Conference Information Technology and Nanotechnology (MM-ITNT 2017), Vol. 1904, pp. 57-63.
7. **Isaev, R.A.** Application of time series analysis for structural and parametric identification of fuzzy cognitive models / **R.A. Isaev**, A.G. Podvesovskii // CEUR Workshop Proceedings of the International Conference Information Technology and Nanotechnology. Session Data Science (DS-ITNT 2018), Vol. 2212, pp. 119-125.
8. Podvesovskii, A.G. Cognitive clarity criteria as a basis for constructing a visualization metaphor for fuzzy cognitive maps / A.G. Podvesovskii, **R.A. Isaev** // GraphiCon 2018 – 28th International Conference on Computer Graphics and Vision, Proceedings, Tomsk, Russia, 2018, pp. 158-162.
9. Podvesovskii, A.G. Visualization metaphors for fuzzy cognitive maps / A.G. Podvesovskii, **R.A. Isaev** // Scientific Visualization, 2018, Vol. 10 (4), pp. 13-29.
10. Podvesovskii, A.G. Assessing the Quality of Visualization Metaphor of Fuzzy Cognitive Maps on the Basis of Formalized Cognitive Clarity Criteria / A.G. Podvesovskii, **R.A. Isaev** // CEUR Workshop Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2019), Vol. 2485, pp. 103-107.
11. Podvesovskii, A.G. Constructing optimal visualization metaphor of fuzzy cognitive maps on the basis of formalized cognitive clarity criteria / A.G. Podvesovskii, **R.A. Isaev** // Scientific Visualization, 2019, Vol. 11 (4), pp. 115-129.

Публикации в других изданиях

12. **Исаев Р.А.** Обзор и классификация методов идентификации параметров нечетких когнитивных моделей / **Р.А. Исаев** // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке и образовании: материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. – Брянск: БГТУ, 2016. – С. 103-106. Подвесовский, А.Г. Применение множественного регрессионного анализа для параметрической идентификации нечетких когнитивных моделей / А.Г. Подвесовский, **Р.А. Исаев** // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2016): труды IV междунар. конф. – Уфа: УГАТУ, 2016. – Т. 2. – С. 28-33.
13. **Исаев, Р.А.** Модифицированный метод парных сравнений для экспертной оценки параметров нечеткой когнитивной модели / Р.А. Исаев // Международный научный журнал «Современные информационные технологии и ИТ-образование». – 2016. – Т. 12. – № 2. – С. 35-42.
14. **Исаев, Р.А.** Совершенствование механизма визуализации нечетких когнитивных моделей в системе поддержки принятия решений «ИГЛА» / **Р.А. Исаев**, А.Г. Подвесовский // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 9 т. Т.1. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2017. – С. 138-142.
15. Подвесовский, А.Г. Идентификация структуры и параметров нечетких когнитивных моделей: экспертные и статистические методы / А.Г. Подвесовский, **Р.А. Исаев** // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – № 6. – С. 35-61.
16. Захарова, А.А. Математическое и программное обеспечение поддержки когнитивного моделирования слабоструктурированных организационно-технических систем / А.А. Захарова, А.Г. Подвесовский, **Р.А. Исаев** // Междунар. конф. СРТ2019. – Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ и НИЦ ФТИ, 2019. – С. 131-141.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

17. Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей «ИГЛА» (Интеллектуальный Генератор Лучших Альтернатив), версия 4.0: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617827 Российская Федерация / А.Г. Подвесовский, Д.Г. Лагерева, Д.А. Коростелев, **Р.А. Исаев**. – № 2019616516; заявл. 29.05.2019; опублик. 20.06.2019, Бюл. № 6. – 1 с.
18. Подсистема идентификации нечеткой когнитивной модели «ИГЛА.Идентификация» для системы поддержки принятия решений «ИГЛА»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617885 Российская Федерация / А.Г. Подвесовский, **Р.А. Исаев**. – № 2019616494; заявл. 29.05.2019; опублик. 24.06.2019, Бюл. № 7. – 1 с.
19. Подсистема визуализации нечеткой когнитивной модели «ИГЛА.Визуализация» для системы поддержки принятия решений «ИГЛА»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617886 Российская Федерация / А.Г. Подвесовский, **Р.А. Исаев**. – № 2019616493; заявл. 29.05.2019; опублик. 24.06.2019, Бюл. № 7. – 1 с.

Исаев Руслан Александрович

Математическое обеспечение и информационная технология поддержки
нечетких когнитивных моделей управления слабоструктурированными
социально-экономическими системами

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать: ____ . ____ . 2021 г.

Объем: 1,16 усл.п.л.

Тираж: 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии «Артель»
Брянск, пр-т Станке Димитрова, 28, оф. 205
+7 (4832) 77-02-72 www.artel32.ru