

На правах рукописи



Черновалова Маргарита Витальевна

**НЕЧЁТКИЕ ПРЕЦЕДЕНТНЫЕ МЕТОДЫ И ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ
МОДЕЛИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре Прикладной математики и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Научный руководитель: **Дли Максим Иосифович**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры прикладной математики и искусствен-
ного интеллекта ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Официальные оппоненты: **Бурдо Георгий Борисович**
доктор технических наук, профессор, заведую-
щий кафедрой технологии и автоматизации ма-
шиностроения ФГБОУ ВО «Тверской государ-
ственный технический университет» (ТвГТУ);

Мухаметзянов Ирик Зирягович
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры информационных техноло-
гий и прикладной математики ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный нефтяной техни-
ческий университет» (УГНТУ)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследо-
вательский технологический университет»

Защита диссертации состоится «24» сентября 2021 г. в 16 час. 00 мин. на заседа-
нии диссертационного совета МЭИ.005 при ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ» по адресу:
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус М, ауд. М-704.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МЭИ.005,
кандидат технических наук, доцент

М.В. Фомина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. В настоящее время проектное управление рассматривается в качестве основного подхода к обеспечению развития систем различного уровня. При выборе методов анализа информации, а также моделей информационных процессов и структур для поддержки принятия проектных решений необходимо учитывать следующие особенности:

- трудности в формализации в виде аналитических функций зависимостей между элементами системы реализации проектов (органы управления, человеческие и материальные ресурсы и др.) и результатами проектной деятельности (характеристики продукта или технологии, временные аспекты, затраченные ресурсы и др.), а также воздействий на указанные результаты факторов внешней среды;
- отсутствие в ряде случаев ретроспективной статистической информации о реализации аналогичных проектов.

Данные обстоятельства в значительной степени затрудняют или даже делают невозможным реализацию на практике методов построения аналитических, а также вероятностно-статистических зависимостей между характеристиками моделируемой системы проектного управления и показателями ее внутренней и внешней среды. В этой связи, в качестве алгоритмического обеспечения ИСППР по управлению проектами перспективным представляется использование процедур анализа информации, основанных на знаниях об аналогичных ситуациях, наблюдавшихся в практике проектного менеджмента. С учетом существенных различий реализуемых проектов по масштабу и функциональным областям, а также отсутствия в ряде случаев необходимого объема статистической информации целесообразно представлять знания, необходимые для использования прецедентных методов, в виде иерархии концептуальных терминов рассматриваемой предметной области и множества отношений. Данным требованиям удовлетворяют онтологические модели.

Анализ современных тенденций развития экономики и социальной сферы РФ показывает, что значительная часть стратегически важных проектов непосредственно связана с разработкой и внедрением инновационных продуктов или технологий. Однако существующие прецедентные методы, в том числе предполагающие использование базы знаний в виде онтологий, не в полной мере учитывают:

- «междисциплинарный» характер проектного управления сложными системами и, как следствие, необходимость включения в состав элементов информационного процесса данных и знаний из различных функциональных и предметных областей;
- непрерывное изменение структуры и характеристик внутренней и внешней среды системы проектного управления как в процессе ее развития в соответствии с чередованием этапов жизненного цикла разрабатываемой продукции или технологии, так и вследствие научно-технического прогресса в целом;
- различный масштаб проектов с точки зрения затрачиваемых ресурсов (даже направленных на производство продукции одного класса).

Данная ситуация обуславливает противоречие между необходимостью повышения степени обоснованности решений по управлению проектами на основе применения автоматизированных процедур накопления и обработки информации и определенным несовершенством существующих методов поддержки принятия решений на основе прецедентов с точки зрения учета особенностей инновационных проектов. Указанное противоречие определяет актуальность темы научного исследования, которая связана с разработкой и практическим применением нового научно-методического и алгоритмического обеспечения информационных систем поддержки принятия решений (ИСППР) по реализации проектов.

В итоге можно констатировать, что разработка и совершенствование нечетких прецедентных методов и онтологических моделей знаний для поддержки принятия проектных решений является актуальной научной задачей, которая имеет существенное значение для развития теоретических основ информатики в части совершенствования процедур создания и исследования моделей данных и знаний, а также методов и алгоритмов работы со знаниями и анализа данных.

Степень разработанности темы. Разработке методов и алгоритмов поддержки принятия решений на основе прецедентов посвящены труды таких ведущих отечественных и зарубежных ученых, как Aamodt A., Agnar A., Leake D., Plaza, E., Spalazzi L.A., Watson I., Williams A.B., Варшавский П.Р., Еремеев А.П., Кочкин Г.А., Куриленко И.Е., Шуршев В.Ф., Фомина М.В., а также защищенные диссертационные работы таких авторов, как Зо Лин Кхайнг, Капыш А.С., Макарова Е.С., Нечипоренко О.А., Решта И.В., Сливин Р.Ю., Ужва А.Ю., Юдин В.Н. и др. В работах данных авторов предложены общие принципы и процедуры вывода решений на основе предшествующего опыта.

Вопросы формирования и использования базы знаний в виде онтологий в автоматизированных системах поддержки принятия решений нашли отражение в публикациях таких авторов, как King M., McGuinness D., Nirenburg S., Noy N., Raskin V., Smith B., Swartout B., Tempich C., Uschold M., Боргест Н.М., Бурдо Г.Б., Бутакова М.А., Гаврилова Т.А., Грибова В.В., Добров Б.В., Загорулько Г.Б., Загорулько Ю.А., Иванов В.В., Каунг М.Х., Кудрявцев Д.В., Лукашевич Н.В., Муромцев Д.И., Овдей О.М., Рыбина Г.В., Черняховская Л.Р., а также диссертационные работы таких авторов, как Гуськов Г.Ю., Евдокимов П. А., Муксимов П.В., Ситников П.В., Шкундина Р.А. и др. Приведённые в указанных трудах научные положения обосновывают целесообразность использования данного типа информационной модели представления знаний в случаях описания признаков анализируемой ситуации в лингвистической форме.

В публикациях Bernaras A., Cogera J., Laresgoiti I., Xiong N., Авдеев Т.В., Борисова В.В., Варшавского П.Р., Дворянкина А.М., Жуковой И.Г., Кульцова А.Е., Макаровой Е.С., Маторина С.И., Слободюк А.А., Шмакова Е.С. предложено использовать онтологии в рамках прецедентного метода для выбора рекомендуемых вариантов действий в рамках выделенных классов решений.

Однако, несмотря на значительное число научных работ по проблемам применения прецедентных методов на основе использования онтологических

моделей, указанные выше особенности современной проектной деятельности, связанные в общем случае с реализацией инновационных проектов, в достаточной степени отражения не нашли.

Целью исследования является разработка нечетких прецедентных методов, моделей и алгоритмов поддержки принятия решений по управлению проектами с представлением знаний в виде набора онтологий.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи диссертационного исследования:

1. Анализ современных подходов к поддержке принятия решений по управлению проектами и определение перспективных направлений развития прецедентных методов с учетом особенностей информационных процессов в проектной деятельности, связанной с инновациями.

2. Обоснование структурной модели ИСППР по управлению проектами на основе прецедентов и использования базы знаний в виде набора онтологий.

3. Разработка нечеткого метода и соответствующего ему алгоритма выработки решений по проектному управлению, обеспечивающего генерацию количественных рекомендаций на основе адаптации к текущей ситуации результатов решений по реализованным ранее и описанным в лингвистической форме проектам различного масштаба.

4. Разработка нечеткого локально-аппроксимационного метода поддержки проектных решений в условиях нечеткого соответствия лингвистического описания прецедентов концептам используемых онтологий, а также модифицированного алгоритма нечёткого логического вывода с использованием нечеткой евклидовой метрики.

5. Формирование алгоритма мониторинга и адаптации базы знаний ИСППР по проектному управлению для анализа и идентификации типовых ситуаций целесообразности ее изменения.

6. Разработка программного обеспечения элементов ИСППР по проектному управлению на основе разработанных прецедентных методов, онтологических моделей и нечетких алгоритмов, а также их практическое применение для поддержки принятия решений по разработке инновационной продукции в ООО «Русэлпром. СЭЗ» и ООО «НИИМАШ».

Объектом исследования являются информационных процессы при поддержке принятия решений по управлению инновационными проектами.

Предметом исследования являются интеллектуальные методы, модели и алгоритмы, используемые для процессов создания, накопления и обработки информации, преобразования информации в данные и знания при реализации проектного управления, а также программные средства автоматизации указанных процессов.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует пунктам паспорта специальности ВАК 05.13.17– «Теоретические основы информатики»:

п.2. «Исследование информационных структур, разработка и анализ моделей информационных процессов и структур»;

п.5. «Разработка и исследование моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечения, разработка и исследование методов и алгоритмов анализа текста, устной речи и изображений».

Методологической базой исследования являются: теоретические основы информатики; системный анализ информационных процессов и структур; методы принятия решений на основе прецедентов, методы теории нечеткой логики; модели представления знаний в интеллектуальных системах; научные положения и выводы, сформулированные в трудах отечественных и зарубежных авторов по вопросам поддержки принятия проектных решений, в т.ч. с использованием онтологий.

Научная новизна работы заключается в разработке новых нечетких методов и алгоритмов, а также мультионтологических моделей представления знаний для автоматизированной поддержки принятия проектных решений на основе прецедентного подхода с учетом наличия лингвистического описания опыта реализации проектов различного масштаба.

Наиболее существенные научные результаты, полученные лично автором и выносимые на защиту, заключаются в следующем:

1. На основе выявленных особенностей информационных процессов в проектной деятельности предложена структурная модель ИСППР по управлению проектами с использованием прецедентов, отличающаяся построением и совместным применением набора онтологий с учетом их значимости для конкретных этапов проекта. Это позволяет учитывать различные аспекты проектного управления путем формирования, применения и адаптации мультионтологической базы знаний указанной системы.

2. Разработан нечеткий метод выработки решений по проектному управлению на основе алгоритма использования близких к текущей ситуации прецедентов при представлении знаний в виде онтологий, который отличается от известных прецедентных методов, применяющих онтологические информационные структуры, возможностью генерации количественных рекомендаций на основе адаптации к текущей ситуации результатов решений по реализованным ранее и описанным в лингвистической форме проектам различного масштаба.

3. Предложен нечеткий локально-аппроксимационный метод поддержки проектных решений в условиях нечеткого соответствия лингвистического описания прецедентов концептам онтологий. Метод отличается применением онтологической модели знаний с нечеткими связями между концептами, а также модифицированного алгоритма нечёткого логического вывода с определением степени истинности предпосылок правил для характеристик текущей проектной ситуации с использованием нечеткой евклидовой метрики.

4. Разработан алгоритм мониторинга базы знаний ИСППР по проектному управлению для анализа и идентификации типовых ситуаций целесообразности ее изменения, отличающийся возможностью выработки на основе нечеткой классификации результатов поиска и использования релевантных текущим ситуациям прецедентов рекомендаций по модификации онтологий, а также структуры описания прецедентов с учетом результатов оценки показателей нечётко-

го соответствия характеристик имеющихся прецедентов характеристикам реализуемого проекта.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждаются корректным использованием методов исследования информационных процессов и структур, построения моделей и алгоритмов анализа данных, обнаружения закономерностей в данных и их извлечения; алгоритмов принятия решений на основе прецедентов; информационных моделей представления знаний в интеллектуальных системах. Полученные результаты согласуются с выводами, сформулированными в научных работах других авторов по применению подходов к принятию решений на основе прецедентов.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии научных основ применения современных информационных интеллектуальных технологий создания, накопления и обработки информации с использованием средств вычислительной техники для повышения эффективности информационных систем по управлению проектами на основе анализа прецедентов.

Практическая значимость основных положений исследования подтверждается целесообразностью применения предложенных нечетких методов, моделей и алгоритмов для поддержки принятия проектных решений в организациях различного вида экономической деятельности, а также результатами использования разработанных программных средств в ООО «Русэлпром. СЭЗ», ООО «НИИМАШ» и в учебном процессе филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске.

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались на таких научных мероприятиях как: VII, VIII, X Международные научно-технические конференции «Энергетика, информатика, инновации» (Смоленск, 2017, 2018, 2020), XXIV, XXV, XXVI, XXVII Международные научно-технические конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2018, 2019, 2020, 2021), XVII Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика» (Смоленск, 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы общим объемом 7,65 п.л., в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в Web of Science и/или Scopus, 6 статей в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Авторский вклад – 4,87 п.л. Также получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 172 наименования, и 7 приложений. Диссертация содержит 169 страниц машинописного текста, 57 рисунков и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации для области знаний специальности 05.13.17; сформулированы цель исследования и научные задачи, которые были решены для ее достижения; определены и обоснованы объект и предмет исследования; кратко изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы; сформулированы основные

положения, полученные лично автором и выносимые на защиту; приведены сведения об апробации, публикациях по теме диссертации, структуре и объеме диссертации.

В первой главе проведен анализ современных методов поддержки принятия решений по управлению проектами и определены перспективные направления развития прецедентных методов с учетом особенностей информационных процессов в проектной деятельности, связанной с инновациями.

Анализ структуры и содержания информационных процессов в проектной деятельности показал, что эффективность основных процедур управления проектами, в т.ч. составления графиков работ, в значительной степени определяется степенью обоснованности решений по заданию длительности работ, выделению ресурсов, определению целевых технико-экономических характеристик разрабатываемой продукции и этапов проекта. В тоже время трудности в формализации зависимостей между входными и выходными показателями реализуемого проекта при помощи аналитических или вероятностно-статистических моделей обосновывают перспективность применения методов поддержки принятия решений на основе прецедентов. При этом, учитывая, что значительная часть проектных ситуаций может быть представлена только в виде описаний на естественном языке, для их формализации в числовой форме целесообразно использовать базу знаний в виде онтологии.

В диссертации также показано, что указанные выше специфические особенности информационных процессов при управлении инновационными проектами определяют целесообразность развития прецедентных методов с использованием информационных структур представления знаний в виде онтологий по следующим основным направлениям:

- обеспечение возможности использования нескольких независимых онтологий по разным предметным областям, в том числе с учетом их значимости для этапов проекта;
- создание условий для учета отличий масштаба (объема требуемых ресурсов) реализованных ранее проектов (прецедентов) от масштаба текущего проекта в рамках процедуры адаптации решений, а также для представления данных решений с помощью метрических шкал;
- обеспечение возможности упрощения процедур экспертного оценивания на основе использования нечетких множеств для оценки степени соответствия описания прецедента концептам онтологий;
- формирование условий для адаптации онтологий с учетом изменений показателей внешней и внутренней среды проекта, а также характеристик ситуации, для которой принимаются решения.

Реализация указанных направлений предполагает модификацию известных и разработку новых методов, моделей, алгоритмов и программных средств поиска и использования прецедентов, в том числе в условиях изменения факторов внешней среды исследуемых систем проектного управления.

Вторая глава посвящена обоснованию структурной модели ИСППР по управлению проектами на основе прецедентов и мультионтологического под-

хода, разработке нечеткого метода выработки количественных рекомендаций по проектному управлению на основе адаптации результатов решений по реализованным ранее и описанным в лингвистической форме проектам различного масштаба к текущей ситуации, а также нечеткого локально-аппроксимационного метода поддержки проектных решений в условиях нечеткого соответствия лингвистического описания прецедентов концептам используемых онтологий.

На основе указанных выше особенностей информационных процессов в проектной деятельности предложена структурная модель ИСППР по управлению проектами на основе прецедентов, отличающейся возможностями использования и адаптации мультионтологической базы знаний. На рисунке 1 показана взаимосвязь моделей и инструментов ИСППР предложенной структуры, в соответствии с которой формируется интегрированная база знаний (БЗ), включающая ряд онтологий, а также базу прецедентов (БП).

В этом случае для каждого описания текущей ситуации или ситуации, имевшей место в прошлом (проектного прецедента), возможно преобразование вида:

$$(Y_l, R_l, a) \xrightarrow{f_1} (\{y_{li}^a\}, R_l, \alpha_l, \beta_a), \quad (1)$$

где Y_l – лингвистическое описание l -го прецедента; R_l – принятое решение (задание длительности работ, выделение ресурсов, определение целевых характеристик этапов и др.) в рамках l -го прецедента; $\{y_{li}^a\}$ – набор численных характеристик l -го прецедента, полученных путем сопоставления его описания с концептами онтологии a ; i – номер характеристики ($i = 1, \dots, I$), I – число характеристик; α_l – нормировочный коэффициент для l -й ситуации с учетом ее принадлежности к определенной группе проектов; β_a – весовой коэффициент, отражающий степень значимости онтологии a для рассматриваемого этапа проекта; f_1 – преобразование для определения степени соответствия лингвистического описания прецедента концептам онтологии.

С учетом специфики проектного управления предложено формирование предметных (описывающих разрабатываемую в ходе проекта продукцию) и функциональных (связанных с определенными функциональными областями проектной деятельности) онтологий, которые не используются непосредственно для вывода решений, а применяются для реализации преобразования вида (1). Применение интеллектуальных моделей (ИМ) обеспечивает развитие онтологий с учетом изменений в ходе реализации проекта или проектной деятельности в целом, а также позволяет дополнить и уточнить структуру описания прецедентов. Представленная структурная модель также предполагает решение задач по адаптации ИСППР, к которым относится задача определения необходимости настройки составляющих интегрированной базы знаний и блока вывода решений при возрастании числа генерируемых системой решений, признанных впоследствии ошибочными. Блок вывода решений реализует разработанный нечеткий метод выработки количественных рекомендаций на основе использования близких к текущей ситуации прецедентов.

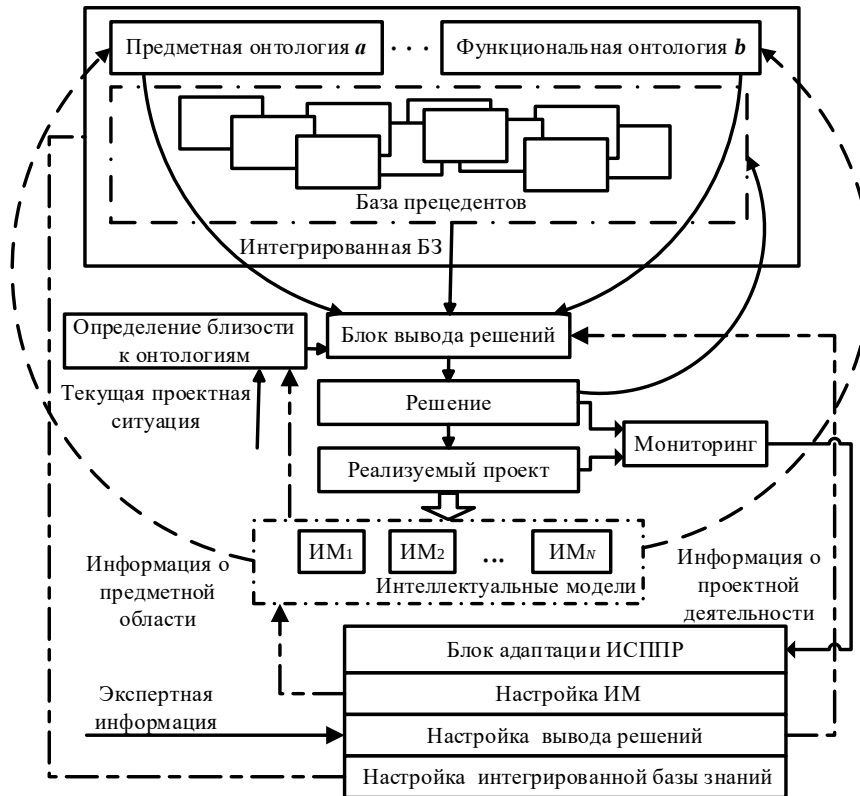


Рисунок 1 – Структурная модель мультионтологической ИСППР для проектного управления на основе прецедентного подхода

При использовании предложенного мультионтологического подхода известные алгоритмы использования близких к текущей ситуации прецедентов при представлении знаний в виде онтологий могут быть модифицированы и представлены в виде следующей процедуры.

Пусть имеется набор прецедентов в виде множества пар вида $\{Y_l, R_l\}$. Также имеется лингвистическое описание текущей ситуации X , для которой необходимо принять решение R_x^* .

На первом этапе с использованием известных подходов определяются «показатели степени соответствия» прецедентов и текущей ситуации каждой из онтологий, описывающих предметные и функциональные области проектного управления. В результате по каждой онтологии a формируются множество $\{x_i^a\}$ численных характеристик для текущей ситуации и множество $\{y_{li}^a\}$ для каждого l -го прецедента, где i – номер характеристики, $i = 1, \dots, I_a$; I_a – число терминальных (не имеющих последователей) концептов в онтологии a ; $l = 1, \dots, L$; L – число элементов в БП.

В результате в случае использования двух онтологий при реализации первого этапа рассматриваемой процедуры производятся преобразования вида:

$$\{Y_l, R_l\} \xrightarrow{f_l} \{y_{li}^a, y_{lj}^b, R_l\}, \quad \{X, R_x^*\} \xrightarrow{f_l} \{x_i^a, x_j^b, R_x^*\}, \quad (2)$$

где Y_l – лингвистическое описание l -го прецедента; R_l – решение в l -м прецеденте; y_{li}^a – i -я численная характеристика l -го прецедента, относящаяся к кон-

цептам онтологии $\mathbf{a}$; y_{ij}^b – j -я численная характеристика ($j=1, \dots, J$) l -го прецедента, относящаяся к концептам онтологии $\mathbf{b}$; X – лингвистическое описание текущей ситуации; R_x^* – решение, которое необходимо сформировать для текущей ситуации; x_i^a – i -я численная характеристика текущей ситуации, относящаяся к концептам онтологии $\mathbf{a}$; x_j^b – j -я численная характеристика текущей ситуации, относящаяся к концептам онтологии $\mathbf{b}$.

На втором этапе создаются условия для определения степени близости текущей ситуации каждому элементу из имеющейся базы прецедентов с учетом наличия нескольких независимых онтологий. Для этого предлагается использовать структуру нечетких продукционных правил (НПП), модифицированных для обеспечения возможности применения алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани с целью выработки количественных решений с учетом различного масштаба прецедентов и текущего проекта. Для этого в рамках предварительной подготовки информации производится нормировка решений, принятых ранее в рамках прецедентов, с учетом уровня (ресурсоемкости) реализованного проекта:

$$R_l \xrightarrow{f_2} (R_l'', \alpha_l), R_x \xrightarrow{f_2} (R_x'', \alpha_x),$$

где R_l'' – нормированное решение в l -м прецеденте; α_l – нормировочный коэффициент для l -го прецедента; R_x – решение для текущей ситуации; R_x'' – нормированное решение для текущей ситуации; α_x – нормировочный коэффициент для текущей ситуации, f_2 – операция нормирования. В результате $R_x'' \in [0,1]$ и все $R_l'' \in [0,1]$.

Далее все характеристики для каждого l -го прецедента $\{y_{li}^a\}$, а также принятого при его реализации решения (с учетом нормировки) R_l'' представляются в виде нечетких множеств $\{\tilde{y}_{li}^a\}$ и $\tilde{R}_l''$, соответственно. С использованием данных нечетких множеств для каждой онтологии формируется база нечетких продукционных правил (НПП), при этом на основе одного прецедента применительно к онтологии $\mathbf{a}$ можно записать правило вида:

$$\text{ЕСЛИ } x_1^a \text{ ЕСТЬ } \tilde{y}_{11}^a \text{ И } x_2^a \text{ ЕСТЬ } \tilde{y}_{12}^a \text{ И...И } x_I^a \text{ ЕСТЬ } \tilde{y}_{1I}^a \text{ ТО } R_x^a \text{ ЕСТЬ } \tilde{R}_1^{an}, \quad (3)$$

где $\tilde{y}_{li}^a$ – нечеткое множество для переменной y_{li}^a ; R_x^a – решение (объем ресурсов) для текущей ситуации с учетом онтологии $\mathbf{a}$; $\tilde{R}_1^{an}$ – нечеткое множество для переменной R_1^{an} ; I – число характеристик, определённых на основе использования онтологии $\mathbf{a}$.

На третьем этапе для текущей ситуации с использованием базы НПП, построенных для каждой онтологии, определяются рекомендуемые решения на основе применения алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Так, для ситуации, характеризующейся набором $\{x_i^a\}$ показателей соответствия с онтологией $\mathbf{a}$, можно записать:

$$\tilde{R}_{\Sigma}^{an} = \bigvee_{l=1}^L \left[\min(\min_{i=1, \dots, I} (\tilde{y}_{li}^a(x_i^a), \tilde{R}_l^{an}) \right], \quad (4)$$

где $\tilde{R}_{\Sigma}^{an}$ – результирующее нечеткое множество, полученное в результате объединения модифицированных нечетких множеств заключений правил (3); $\bigvee$ – *max*-дизъюнкция.

Далее с помощью одного из методов дефаззификации (например, центроидного) определяется «четкое» значение рекомендуемого решения для текущей ситуации R_x^{an} .

Четвертый этап – вывод интегрального решения для текущей ситуации с учетом степени значимости конкретной предметной или функциональной онтологии для определенного этапа реализации проекта с использованием выражения вида:

$$R_x^* = (R_x^{an} \cdot \beta_a + R_x^{bn} \cdot \beta_b) \alpha_x, \quad \beta_a + \beta_b = 1, \quad (5)$$

где R_x^* – рекомендуемое интегральное решение для текущей ситуации; β_a – весовой коэффициент, отражающий степень значимости онтологии **a** для рассматриваемого этапа проекта; β_b – весовой коэффициент, отражающий степень значимости онтологии **b** для рассматриваемого этапа проекта.

В диссертации предложена структура онтологической модели знаний с нечеткими связями между концептами, также обеспечивающая возможность установления степени соответствия между ее концептами и элементами описания прецедента в виде нечетких множеств (рисунок 2). Указанная модель используется для определения сематической близости между проектными прецедентами. В этом случае:

- если описание прецедента Y_l соответствует γ -му терминальному (не имеющему потомков) концепту на некоторой «ветке» (иерархии) онтологии после k -го концепта верхнего уровня онтологии **a** с нечеткой степенью соответствия $\tilde{v}_{c_{\gamma\Lambda}^k}^q$, то $\tilde{X}_i^a = \tilde{v}_{c_{\gamma\Lambda}^k}^q$;

- если описание прецедента соответствует γ -му концепту на некоторой «ветке» после k -го концепта верхнего уровня онтологии **a**, у которого имеются потомки, то:

$$\tilde{X}_i^a = \tilde{v}_{c_{\gamma\Lambda}^k}^q \bigotimes_{\lambda=1, \dots, \Lambda_a} \tilde{\Phi}_{\lambda\gamma}^k,$$

где $\tilde{\Phi}_{\lambda\gamma}^k$ – нечеткий вес связи между концептом γ на уровне иерархии λ на некоторой «ветке» после k -го концепта верхнего уровня и его потомком уровня $\lambda - 1$; Λ_a – количество уровней иерархии онтологии **a**, следующих за связанным концептом γ на «ветке» после k -го концепта верхнего уровня; $\bigotimes$ – операция умножения нечетких чисел.

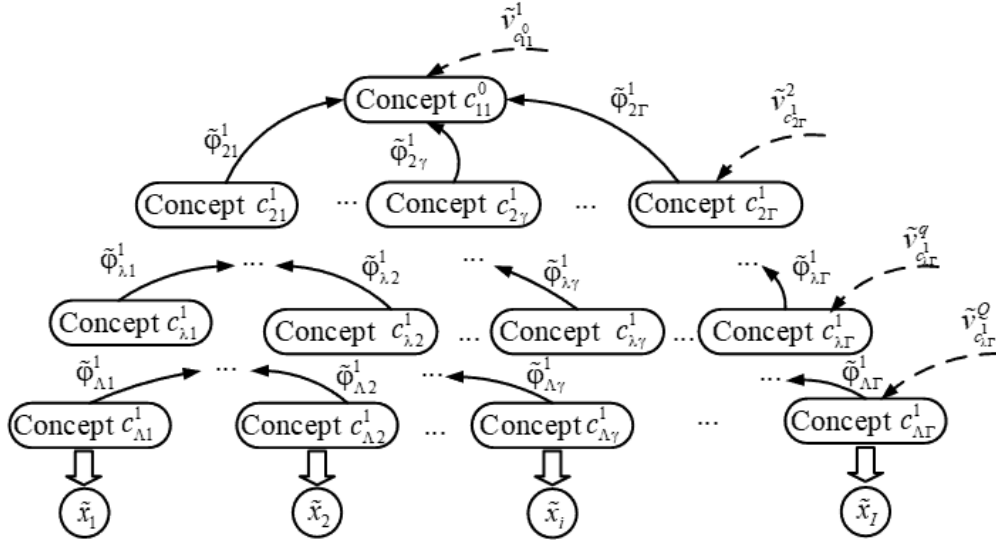


Рисунок 2 – Обобщённая структура нечеткой онтологической модели

В результате для текущей ситуации и каждого l -го прецедента по онтологии $\mathbf{a}$ формируются наборы нечетких множеств $\{\tilde{x}_i^a\}$ и $\{\tilde{y}_{li}^a\}$ соответственно.

Далее путем разбиения носителей нечетких множеств (т.е. интервала $[0,1]$) из наборов $\{\tilde{x}_i^a\}$ и $\{\tilde{y}_{li}^a\}$ на M дискрет можно типизировать процесс определения релевантности между текущими ситуациями и проектными прецедентами с помощью известного показателя нечёткого соответствия вида:

$$s_1(\tilde{x}_i^a, \tilde{y}_{li}^a) = 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \sqrt{\sum_{m=1}^M \left(\mu_{\tilde{x}_i^a}(g_m^{(i)}) - \mu_{\tilde{y}_{li}^a}(g_m^{(i)}) \right)^2}, \quad g_m^{(i)} \in G_i, \quad (6)$$

где $\mu_{\tilde{x}_i^a}(g_m^{(i)})$, $\mu_{\tilde{y}_{li}^a}(g_m^{(i)})$ – функции принадлежности нечётких множеств $\{\tilde{x}_i^a\}$ и $\{\tilde{y}_{li}^a\}$, соответственно; G_i – область значений i -й характеристики, приведенная к диапазону $[0, 1]$.

Дополнительно предлагается вычислять показатели $s_{0,5}(\tilde{x}_i^a, \tilde{y}_{li}^a)$ – неопределенности установления нечёткого соответствия и $s_0(\tilde{x}_i^a, \tilde{y}_{li}^a)$ – нечёткого несоответствия между $\{\tilde{x}_i^a\}$ и $\{\tilde{y}_{li}^a\}$. Использование этих показателей расширяет возможности по формированию и использованию гибких правил определения релевантности между текущими проектными ситуациями и проектными прецедентами, причем, не только по их соответствию между собой, но и по неопределенности установления соответствия, и по их несоответствию, а также при комбинации этих оценок вида:

$$S_1(X, Y_l) = Agg_1 \left(\left\{ s_1(\tilde{x}_i^a, \tilde{y}_{li}^a) \mid i = 1, \dots, I \right\} \right),$$

где $S_1(X, Y_l)$ – оценка рассмотрения между текущей ситуацией и l -м прецедентом, обобщенная с использованием соответствующей операции агрегирования Agg_1 , в качестве которых могут быть использованы, в том числе, так называемые нечёткие квантификаторы задания промежуточных стратегий: по соответствию большинства характеристик; по несоответствию хотя бы в одной

характеристике; по неопределенности установления соответствия в половине из всех характеристик и т.д.

Например, наиболее релевантным текущей проектной ситуации Y_l в онтологии a может являться проектный прецедент Y_l^* , для которого выполняется следующее правило:

$$Y_l^* : \min_{l=1, \dots, L} \left(\max_{i=1, \dots, I} (s_i(\tilde{x}_i^a, \tilde{y}_{li}^a)) \right).$$

Указанный подход к определению близости между прецедентами и текущей ситуацией используется в рамках предложенного нечеткого локально-аппроксимационного метода выработки проектных решений для случаев установления нечеткой степени соответствия между элементами описания текущей ситуации и прецедентов с концептами используемых онтологий. Данный метод предполагает выделение из базы прецедентов L_{near} – ближайших соседей, наиболее близких к текущей ситуации в смысле метрики (6). На основе выделенных прецедентов формируется система НПП вида (3).

С использованием полученной системы и набора нечетких показателей текущей ситуации $\{\tilde{x}_i^a\}$ реализуется алгоритм нечеткого вывода Мамдани, отличающийся от базового вариантом использованием для определения степени соответствия предпосылок правил нечетким значениям характеристик текущей ситуации нечеткой евклидовой метрики вида (6). В этом случае выражение (4) будет иметь вид:

$$\tilde{R}_{\Sigma}^{an} = \bigvee_{l=1}^{L_{near}} \left[\min(\min_{i=1, \dots, I} (S_i(\tilde{y}_{li}^a, \tilde{x}_i^a), \tilde{R}_l^{an})) \right].$$

В третьей главе описывается разработанный алгоритм мониторинга базы знаний ИСППР по проектному управлению для анализа и идентификации типовых ситуаций целесообразности ее изменения, а также алгоритмы для поддержки принятия проектных решений на основе прецедентов и мультионтологического подхода.

Предложенный алгоритм мониторинга и адаптации базы знаний ИСППР по проектному управлению позволяет вырабатывать рекомендации по развитию онтологий и изменению структуры описания прецедентов с учетом результатов оценки показателей нечеткого соответствия характеристик имеющихся прецедентов друг другу, а также новой проектной ситуации. Схема данного алгоритма приведена на рисунке 3.

Алгоритм предполагает анализ результатов использования сформированных онтологий и базы прецедентов для генерации решений по H подряд следующим ситуациям с последующей реализацией двух основных (укрупненных) этапов – выработки базового варианта адаптации базы знаний ИСППР и его конкретизации. В рамках первого этапа используется система (база) НПП вида:

$$\text{ЕСЛИ } H_{S_L} \text{ ЕСТЬ } \tilde{H}_{S_L}^L \text{ И } R_p \text{ ЕСТЬ } \tilde{R}_p^L \text{ ТО } d \text{ ЕСТЬ } D_1,$$

где H_{S_L} – количество подряд следующих ситуаций, для которых были найдены близкие прецеденты; $\tilde{H}_{S_L}^L$ – нечеткое множество, соответствующее понятию

«большое число ситуаций, для которых были найдены близкие прецеденты»; R_p – количество решений для H ситуаций, которые привели к положительному результату; $\tilde{R}_p^L$ – нечеткое множество, соответствующее «большому числу положительных результатов»; d – предполагаемое решение по адаптации базы знаний ИСППР; D_1 – класс решений по изменению БЗ ИСППР.

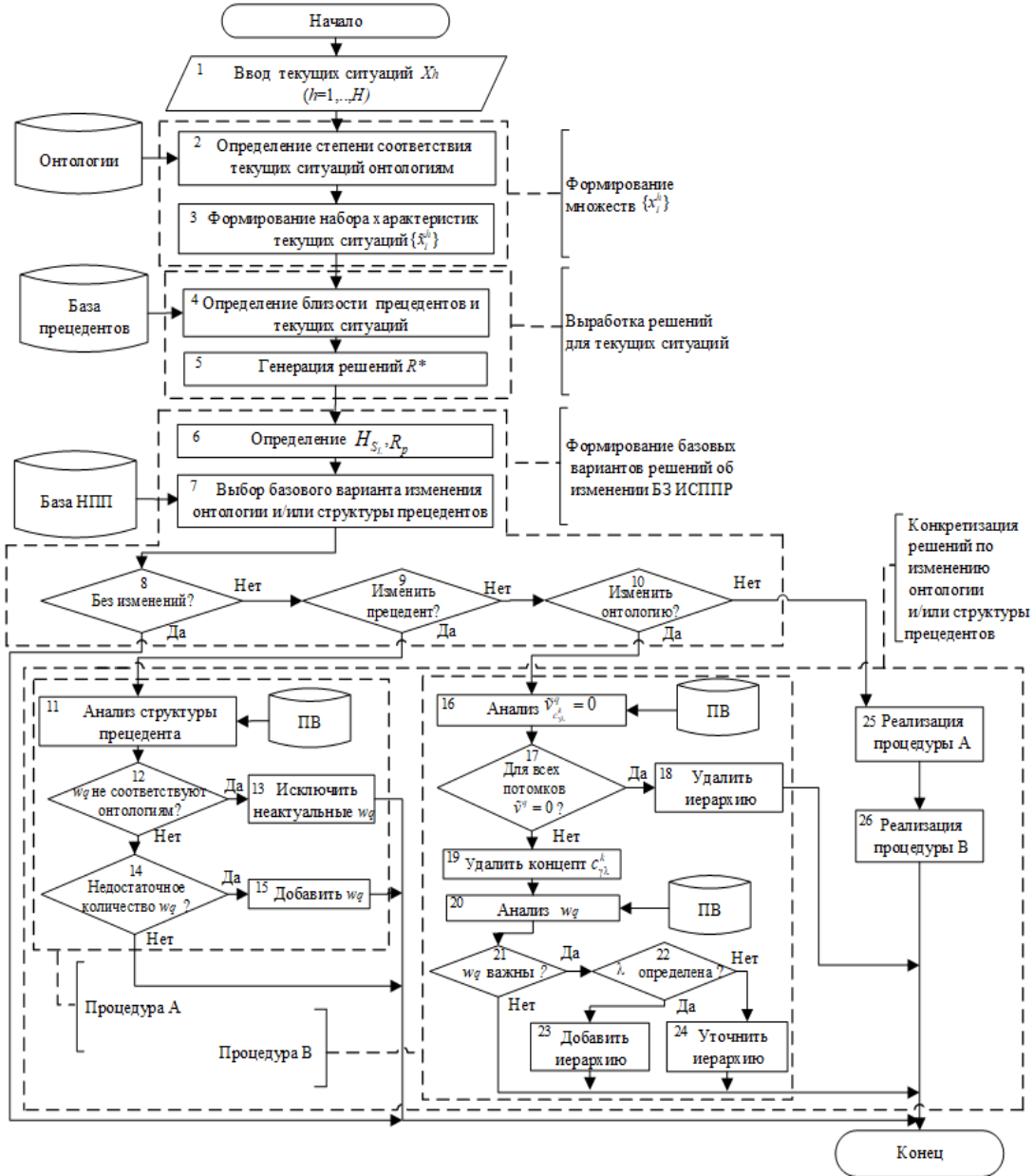


Рисунок 3 – Схема алгоритма мониторинга базы знаний ИСППР

При реализации второго укрупненного этапа алгоритма решения о внесении тех или иных изменений в прецедент или онтологию принимаются с помощью разработанного набора правил выбора (ПВ). Так, исключение неактуальной иерархии концептов из онтологии предполагает выполнение для H идущих подряд ситуаций следующего ПВ:

$$\text{Если } \forall (m = 1, \dots, M; \lambda = \lambda, \dots, \Lambda; \gamma = \gamma, \dots, \Gamma) : v_{c_{\lambda\gamma}^k}^{q_m} = 0 \Rightarrow C \setminus \{c_{\lambda\gamma}^k\},$$

где $C = \{c_{\lambda\gamma}^k\}$ – множество всех концептов онтологии ($\lambda=1, \dots, \Lambda$; $\gamma=1, \dots, \Gamma$; $k=1, \dots, K$), λ – номер уровня, γ – номер концепта на уровне λ ; k – номер концепта на верхнем уровне, $c_{\lambda\gamma}^k$ – концепт γ на уровне λ «ветки» после k -го концепта верхнего уровня; $v_{c_{\lambda\gamma}^k}^{q_h}$ – степень соответствия q -го значимого слова и концепта γ на уровне λ «ветки» после k -го концепта верхнего уровня; $\Rightarrow$ – импликация.

В диссертации разработаны алгоритмы, реализующие использование близких к текущей ситуации возможных прецедентов при представлении знаний в виде онтологий, а также предложенный нечеткий локально-аппроксимационный метод поддержки проектных решений в условиях нечеткого соответствия лингвистического описания прецедентов концептам используемых онтологий, в том числе с учетом места предложенных методов и моделей в составе обобщенных алгоритмов диспетчеризации работ по проекту.

В четвертой главе описаны результаты программной реализации разработанных методов и алгоритмов, а также их практического применения.

Для практической реализации нечетких прецедентных методов и онтологических моделей предложена архитектура информационной ИСППР по проектному управлению. Данная система разработана в виде программного приложения, интегрированная база знаний которого выполнена с помощью инструмента *Protégé* версии 5.5.0 – онтологического редактора, основанного на применении языка *OWL (Ontology Web Language)*. Для разработки алгоритмической части приложения, связанной с поиском близких к текущей ситуации прецедентов и выработкой «вспомогательных» решений, использована платформа *Java Standard Edition 15*. Организация взаимодействия алгоритмической части и базы знаний осуществляется с помощью библиотеки *OWL API (Application Programming Interface)*. Программная реализация модуля нечеткого логического вывода выполнена на языке *Python 3.8.7*.

Для проверки точности предложенных алгоритмов на основе исследования опыта проектной деятельности предприятий Смоленской области была сформирована выборка из 48 прецедентов, характеризующих реализацию этапа НИР для проектов по разработке радиоэлектронной продукции. Даная выборка была разделена на две части: 24 элемента использовались для заполнения БП и 24 – в качестве тестовой выборки для оценки погрешности. На рисунке 4 представлены значения средней квадратической погрешности применения предложенных нечеткого метода использования близких к текущей ситуации прецедентов при представлении знаний в виде онтологий (на рисунке 4 – «метод 1»), нечеткого локально-аппроксимационного метода поддержки проектных решений (на рисунке 4 – «метод 2»), а также используемого в настоящее время на предприятиях расчетного метода планирования затрат исходя из принятых нормативов. Решалась задача определения совокупных затрат на этапе НИР. На рисунке 4 в качестве оси абсцисс используется ось, отражающая изменение числа элементов l в БП, т.е. числа элементов обучающей выборки. Из рисунка видно, что при увеличении БП погрешность предложенных методов снижается и их применение становится предпочтительным по сравнению с расчетным методом.

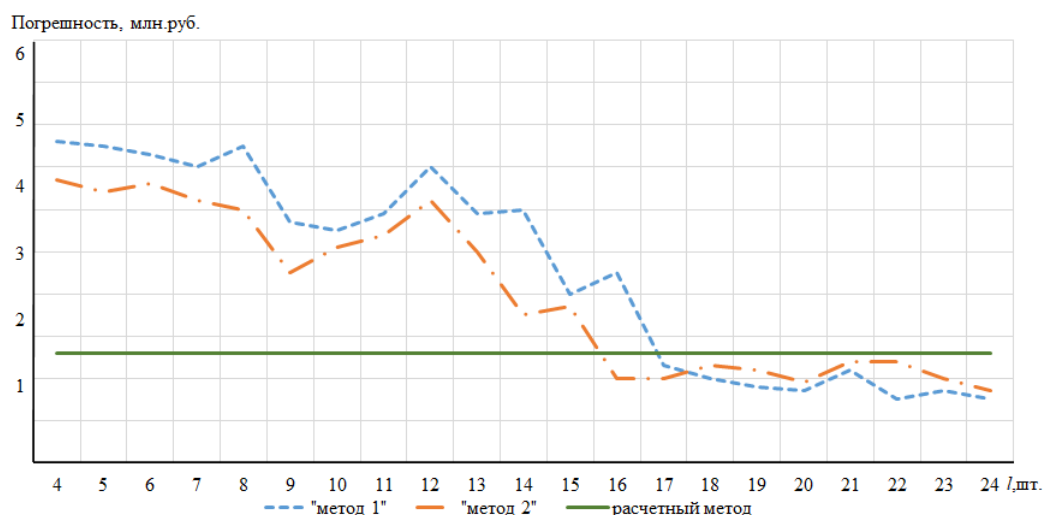


Рисунок 4 – Погрешность применения разработанных методов

Разработанные методы и модели были практически использованы в ООО «Русэлпром. СЭЗ» для поддержки принятия решений при реализации проекта по разработке модернизированного асинхронного электродвигателя мощностью 315 кВт. В таблице 1 приведены значения относительной погрешности решений по определению совокупных затрат на трех основных этапах проекта, принимавшихся на основе предложенных нечетких методов, и для сравнения погрешности используемого в настоящее время на предприятии расчетного метода планирования затрат исходя из принятых нормативов.

Таблица 1 – Погрешность применения методов, % -

Метод \ Этап проекта	НИР	ОКР	Постановка на производство
Нечеткий метод на основе близких прецедентов	12	13	11
Нечеткий локально-аппроксимационный метод	14	11	8
Расчетный метод	17	15	12

При формировании БП использовались описания прецедентов, которые были получены на основе опыта реализации аналогичных проектов на предприятиях Концерна «Русэлпром». Исходя из анализа данных таблицы 1 можно сделать вывод о работоспособности предложенных методов.

Результаты диссертации также применялись в ООО «НИИМАШ» для поддержки принятия решений при реализации проекта по разработке новой технологии управления руднотермической печью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена научная задача, заключающаяся в разработке нечетких прецедентных методов и онтологических моделей знаний для поддержки принятия проектных решений, которая имеет существенное значение для развития теоретических основ информатики.

При работе над диссертацией получены следующие основные результаты.

1. Выполнен анализ современных подходов к поддержке принятия решений по управлению проектами, а также основных особенностей информацион-

ных процессов при осуществлении проектной деятельности в области инноваций, результаты которого позволили описать модель информационного процесса для управления проектам.

2. Предложена структурная модель ИСППР по управлению проектами с использованием прецедентов, отличающаяся построением и совместным применением набора онтологий с учетом их значимости для конкретных этапов проекта.

3. Разработан нечеткий метод выработки решений по проектному управлению на основе алгоритма использования близких к текущей ситуации прецедентов при представлении знаний в виде мультионтологических моделей. Данный метод позволяет формировать количественные рекомендации на основе адаптации результатов решений по реализованным ранее и описанным в лингвистической форме инновационным проектам различного масштаба к текущей ситуации.

4. Предложен нечеткий локально-аппроксимационный метод поддержки проектных решений в условиях нечеткого соответствия лингвистического описания прецедентов концептам применяемых онтологий на основе модифицированных алгоритмов нечёткого логического вывода (в случаях связи составляющих предпосылок НПП с помощью логических операций «И», «ИЛИ», «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»). Метод предполагает использование нечеткой евклидовой метрики для определения степени близости (релевантности) между прецедентами и текущей ситуацией.

5. Разработаны алгоритм мониторинга базы знаний ИСППР по проектному управлению для анализа и идентификации типовых ситуаций целесообразности ее изменения, а также комплекс алгоритмов, реализующих предлагаемые нечеткие прецедентные методы и онтологические модели.

6. Предложен алгоритм актуализации базы прецедентов, основанный на анализе и идентификации типовых ситуаций её адаптации. Алгоритм включает проверку условий возникновения данных ситуаций с помощью расчета совместной оценки степени соответствия, степени неопределённости установления соответствия, степени несоответствия между проектными прецедентами из БП.

7. Предложены архитектура и режимы функционирования ИСППР для управления проектами с использованием нечетких прецедентных методов, а также программная реализация её модулей. Проведены вычислительные эксперименты с использованием выборки, сформированной на основе исследования опыта проектной деятельности предприятий Смоленской области по реализации этапа НИР при разработке радиоэлектронной продукции, результаты которых подтвердили работоспособность разработанных методов, моделей, алгоритмов и программных средств.

8. Представлены результаты практического использования предложенных алгоритмов и программных средств для управления проектами по разработке модернизированного асинхронного электродвигателя мощностью 315 кВт и новой технологии управления руднотермической печью, которые показали при-

емлемую для проектов данного вида точность рекомендаций, а также повышение степени автоматизации и оперативности выработки решения.

Список основных публикаций по теме диссертации:

Научные статьи в изданиях, входящих в Web of Scienc и/или Scopus:

1. Panchenko S.V., Dli M.I., Panchenko D.S., Chernovalova M.V. Thermal-physic processes in a reaction zone of electrothermal ore-smelting reactor//Non-ferrous Metals. 2018. No. 1. pp. 37-42.
2. Kurilin S.P., Dli M.I., Rubin Y.B., Chernovalova M.V. Methods and means of increasing operation efficiency of the fleet of electric motors in non-ferrous metallurgy // Non-ferrous Metals. 2020. No. 2 (49). pp. 73-78
3. Borisov V.V., Denisov V.N., Kurilin S.P., Chernovalova M.V. Intellectual analysis of the health operational effectiveness of electromechanical systems // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2315, 040010
4. Dli M. I., Puchkov A. Yu., Lobaneva E. I., Chernovalova M. V. Evaluating the state of a phosphorus production system in the service life prediction problem // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2315. 040013.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

5. Черновалова М. В. Управление проектами по разработке гидромеханических систем с использованием нейросетевых и нейро-нечетких моделей // Системы управления, связи и безопасности. 2018. №2. С. 108-120.
6. Черновалова М.В. Алгоритмическое обеспечение информационной системы управления инновационными проектами в промышленности // Программные продукты и системы. 2018. Т.31. №2. С. 561-566.
7. Халин В.Г., Черновалова М.В., Шманев С.В. Алгоритмическое и информационное обеспечение управления инновационными проектами в условиях неопределенности // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 3 (75). С.5-15.
8. Борисов В.В., Черновалова М.В., Курилин С.П. Мониторинг и адаптация базы проектных прецедентов при управлении инновационными проектами на основе нечеткого онтологического подхода // Онтология проектирования. 2020. Т.10. №4(38). С. 516-526.
9. Borisov V., Kurilin S., Prokimnov N., Chernovalova M. Fuzzy cognitive modeling of heterogeneous electromechanical systems. Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics, 2021, vol.16, no.1, pp.32-39.
10. Черновалова М.В. Нечеткие прецедентные модели для управления проектами с использованием мультионтологического подхода// Прикладная информатика. 2021. Т.16. №2. С.4-16.

Статьи и научные труды, опубликованные в других изданиях:

11. Дли М.И., Черновалова М.В., Офицеров А.В. Архитектурные решения построения экспертной системы поддержки принятия решений по управлению проектами в условиях неопределенности // Программные продукты, системы и алгоритмы, 2017. № 4. С.1-10.
12. Черновалова М.В., Офицеров А.В., Ахметова В.Н. Разработка инструментов поддержки принятия решений при управлении сложными инновацион-

ными проектами на основе нечеткой логики // Энергетика, информатика, инновации – 2017 / сб. трудов VII Межд. науч.-техн. конф. Смоленск: Универсум. 2017. Т 1. С.373-377.

13. Черновалова М.В. Управление инновациями с использованием нечетко-логических алгоритмов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика / тез. докл. XXIV Межд. науч.-техн. конф. М.: ООО «Радуга», 2018.С. 230.

14. Черновалова М.В. Применение нейро-нечетких моделей для управления инновационными проектами на промышленных предприятиях // Энергетика, информатика, инновации – 2018 / сб. трудов VIII Межд. науч.-техн. конф. Смоленск: Универсум, 2018, Т.3. С. 39-43

15. Черновалова М.В. Нейросетевые и нейро-нечеткие модели управления инновационными проектами на промышленных предприятиях // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика / тез. докл. XXV Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: ООО «Радуга», 2019. С.186.

16. Черновалова М.В. Нечеткие модели информационных процессов поддержки принятия решений по управлению сложными проектами // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика / тез. докл. XXVI Межд. науч.-техн. конф. М.: ООО «Радуга», 2020. С. 207.

17. Черновалова М.В. Особенности информационной поддержки принятия решений по управлению инновационными проектами // Интеллектуальные информационные технологии, энергетика и экономика / сб. трудов XVII Межд. науч.-техн. конф. Смоленск: Универсум. 2020.Т1. С.341-345.

18. Черновалова М.В. Нечетко-логические модели выбора групп инструментов проектного управления // Энергетика, информатика, инновации – 2020 / сб. трудов X Нац. науч.-техн. конф. с межд. уч. Смоленск: Универсум, 2020. Т.3., С. 180-184.

19. Борисов В.В., Черновалова М.В., Курилин С.П. Представление проектных прецедентов на основе нечеткого онтологического подхода // Энергетика, информатика, инновации – 2020 / сб. трудов X нац. науч.-техн. конф. с межд. уч. Смоленск: Универсум, 2020. Т.2., С. 373-377.

20. Черновалова М.В. Нечетко-аппроксимационный алгоритм поддержки принятия решений по управлению инновационными проектами// Радиоэлектроника, электротехника и энергетика / тез. докл. XXVII Межд. науч.-техн. конф.. М.: ООО «Радуга», 2021. С. 206.

21. Черновалова М.В., Соколов А.М. Модель информационных процессов управления проектами в кибер-физических системах // Экономика и социум. 2020. №7(74). С.546-551.

22. Черновалова М.В., Соколов А.М. Особенности информационного сопровождения инновационных проектов в кибер-физических системах // Мировая наука. 2020. № 7 (40). С. 265-269.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

23. Дли М.И., Черновалова М.В. Программное обеспечение для мониторинга эффективности реализации проектов в ТЭК // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613490 выдано Федераль-

ной службой по интеллектуальной собственности 15.03.2018.

24. Дли М.И., Черновалова М.В. Программное обеспечение для управления производственными проектами в ТЭК с учетом рисков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613582 выдано Федеральной службой по интеллектуальной собственности 19.03.2018.

25. Черновалова М.В., Соколов А.М. Программа для поддержки принятия решений по управлению рисками инновационного проекта на предприятиях ТЭК // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664645 выдано Федеральной службой по интеллектуальной собственности 20.11.2018.

27. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Черновалова М.В. Программа адаптации выпуска металлопродукции в рамках мультипроекта на основе имитационного моделирования и нечеткой логики Adaptive Multiproject // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661373 выдано Федеральной службой по интеллектуальной собственности 22.09.2020.