

На правах рукописи

Мозгачев Алексей Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
МОДЕЛЕЙ, МЕТОДОВ И ПРОГРАММНЫХ
СРЕДСТВ ТЕМПОРАЛЬНОГО ВЫВОДА В
ДИНАМИЧЕСКИХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ
ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.13.11 – математическое и программное
обеспечение вычислительных машин, комплексов и
компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рыбина Галина Валентиновна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Прикладной математики»
Национального исследовательского
университета «МЭИ»
Еремеев Александр Павлович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН»
Кулинич Александр Алексеевич

Ведущая организация: Государственный научный центр РФ
Федеральное государственное унитарное
предприятие «Государственный
научно-исследовательский институт
авиационных систем»

Защита состоится «25» декабря 2013 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.03 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: Каширское ш., 31, Ученый Совет НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «25» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Леонова Н.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Методы искусственного интеллекта лежат в основе ключевых технологий XXI века, а интеллектуальные системы и технологии применяются сегодня практически во всех производственных и социально значимых областях человеческой деятельности. Качественно новые возможности прикладных интеллектуальных систем (в частности, динамических интеллектуальных систем) позволяют значительно повысить эффективность использования вычислительной техники в традиционных областях ее применения, а также расширить эти области за счет решения в них новых классов задач, не решаемых традиционными методами и средствами.

В настоящее время результаты исследований в области динамических интеллектуальных систем востребованы в сфере коммерческих и промышленных приложений и технологии разработки программного обеспечения в целом, о чем свидетельствует широкий спектр приложений динамических интеллектуальных систем в самых различных областях науки и техники. Это подтверждают разработки как отечественных (Г.С. Осипов, Э.В. Попов, Г.В. Рыбина, А.П. Еремеев, Б.Е. Федун, В.И. Городецкий, И.Б. Фоминых, В.Б. Тарасов, Г.С. Плесневич, В.М. Лохин, М.П. Романов, Н.Г. Ярушкина, В.Н. Вагин, В.Л. Стефанюк, и др.), так и зарубежных ученых (J. Allen, V. Moore, S. Spranger, K. Mohamad, P. Ladkin, P. Jarvis и др.).

Величина эффекта от создания и применения интеллектуальных систем во многом зависит от наличия базовых инструментальных средств и массовости их применения в стратегически значимых областях. Все это приводит к динамике роста исследований и разработок в таких областях, как динамические интегрированные экспертные системы, интеллектуальные агенты, многоагентные системы и др., а также определяет особую актуальность и важность создания инструментальной базы для поддержки разработки динамических интеллектуальных систем.

Несмотря на отсутствие семантической унификации терминологической базы, единой классификации динамических интеллектуальных систем и отдельных классов динамических интеллектуальных систем, тем не менее, к настоящему времени уже сформировался круг общих научных и технологических проблем, препятствующих широкому распространению приложений динамических интеллектуальных систем в стратегически важных проблемных областях, где

возможен наиболее высокий эффект от применения современных архитектур динамических интеллектуальных систем.

1. Трудности получения темпоральных знаний (т.е. знаний, рассматривающих *время* в качестве сущности предметной области) из различных источников знаний (эксперты, тексты, базы данных и др.) для динамического представления предметной области.

2. Сложность разработки формализмов для динамического представления предметной области, что определяется переменным составом сущностей предметной области, изменением во времени входных данных, поступающих от внешних источников (модели внешнего мира), и необходимостью структурирования, хранения и анализа изменяющихся во времени данных.

3. Сложность процессов решения динамических задач, что связано с выполнением одновременных временных (темпоральных) рассуждений о нескольких различных асинхронных процессах (задачах), наличием ограниченных ресурсов (время, память), изменением состава знаний и данных в процессах решения задач.

4. Проблемы моделирования внешнего мира (внешнего окружения) и различных его состояний в реальном времени на всех этапах проектирования и разработки системы до внедрения.

5. Высокая стоимость зарубежных инструментальных программных средств поддержки разработки и сопровождения динамических интеллектуальных систем различных классов и практическое отсутствие отечественного инструментария для этих целей.

6. Необходимость наличия специальных программно-аппаратных средств сопряжения с внешним миром (наличие датчиков, контроллеров и др.).

Приведенные выше проблемы в значительной степени определяют большую сложность разработки динамических интеллектуальных систем, в частности, *динамических интегрированных экспертных систем*, являющихся наиболее распространенным и востребованным классом динамических интеллектуальных систем.

Кроме того, в настоящее время не предложено универсального подхода, позволяющего решить описанные проблемы (или часть из них) в комплексе, что подразумевает разработку целостной методологии и технологии создания систем подобного уровня сложности на всех этапах

жизненного цикла. Современные коммерческие инструментальные средства поддержки построения динамических интегрированных экспертных систем (Gensym G2, RTworks, RTXPS и др.) при всей своей мощности и универсальности не способны комплексно решать вышеперечисленные задачи.

Значительным шагом к построению необходимой методологии может стать новый этап в развитии теории и технологии построения интегрированных экспертных систем на основе *задачно-ориентированной методологии*, основные положения которой были предложены и экспериментально исследованы Г.В. Рыбиной в 90-х годах прошлого века. В настоящее время на базе задачно-ориентированной методологии созданы интеллектуальная программная технология и автоматизированное рабочее место инженера по знаниям – комплекс АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, на основе которых разработано несколько десятков прикладных интегрированных экспертных систем, где в рамках единой масштабируемой архитектуры интегрированной экспертной системы совместно используется широкий спектр моделей и методов решения различных неформализованных и формализованных задач.

Анализ приведенных выше проблем построения динамических интегрированных экспертных систем, находящихся в центре внимания диссертации, показывает, что наименее исследованными из них с точки зрения системного подхода и создания целостной методологии являются тесно взаимосвязанные подходы к получению, представлению и обработке темпоральных знаний. Способность представлять *временные* зависимости между происходящими в системе событиями и их использование в процессе поиска решения задачи позволяют значительно сократить пространство поиска, что существенно образом сказывается на скорости функционирования динамической интегрированной экспертной системы в целом. В современных коммерческих инструментальных средствах для поддержки построения динамических интегрированных экспертных систем (Gensym G2, RTworks, RTXPS и др.) подходы к отображению времени, а тем более темпоральных знаний, достаточно просты и, фактически, не используются в процессе решения динамических задач.

Таким образом, возникает необходимость создания моделей, методов и инструментальных программных средств, выполняющих процедуры темпорального вывода в динамических интегрированных экспертных

системах. Данные модели, методы и программные средства должны быть объединены в рамках единых методологии и технологии, в качестве которой выступает задачно-ориентированная методология построения интегрированных экспертных систем и поддерживающий ее инструментальный комплекс АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

Объектом исследований являются динамические интегрированные экспертные системы и инструментальные средства поддержки их построения.

Предметом исследований являются модели и методы представления и обработки темпоральных знаний и их программная реализация в виде инструментальных средств, предназначенных для функционирования в составе динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

Цель работы. Целью данной диссертационной работы является разработка моделей, методов и программных средств темпорального вывода в динамических интегрированных экспертных системах.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Для динамических интегрированных экспертных систем, способных функционировать в динамических проблемных областях при возможной корректировке стратегий поиска и пополнения базы знаний непосредственно в процессе поиска решений, разработана модель темпорального вывода на продукционных правилах, предусматривающая обработку знаний, содержащих временные (темпоральные) зависимости.

2. На основе анализа современных отечественных и зарубежных подходов для представления временных (темпоральных) зависимостей разработан и экспериментально исследован формализм для динамического представления предметной области, основанный на модифицированной логике Аллена и логике управления во времени.

3. Осуществлена модификация языка представления знаний, использующегося в рамках задачно-ориентированной методологии, обеспечивающая возможность совместного описания темпоральных знаний и базовых знаний о проблемной области, в том числе знаний с неопределенностью, неточностью и нечеткостью.

4. Разработаны методы и алгоритмы реализации темпорального вывода, поддерживающие модель темпорального вывода на продукционных правилах.

5. Выполнен анализ системных требований, проектирование и программная реализация инструментальных средств темпорального вывода в соответствии с задачей-ориентированной методологией и интеллектуальной технологией разработки новых компонентов комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

6. Разработаны, программно реализованы и экспериментально исследованы алгоритмы асинхронного взаимодействия темпорального решателя, универсального АТ-РЕШАТЕЛЯ и подсистемы имитационного моделирования внешнего мира, функционирующих в составе динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

7. Проведена экспериментальная апробация разработанных инструментальных программных средств и их компонентов при создании нескольких прототипов динамических интегрированных экспертных систем.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертации использованы методы искусственного интеллекта, в том числе такие, как модели и методы представления и обработки знаний, методы инженерии знаний, модели и методы представления времени (темпоральные логики, исчисления), а также теория автоматов, технология разработки программного обеспечения.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная модель темпорального вывода на продукционных правилах для динамических интегрированных экспертных систем, предусматривающая обработку знаний, содержащих темпоральные зависимости, совместно с базовыми знаниями о проблемной области на основе универсальных средств вывода, реализованных в задачей-ориентированной методологии.

2. Предложены расширенная модель представления знаний и язык представления знаний для динамических интегрированных экспертных систем, позволяющие представлять темпоральные знания, основанные на модифицированной интервальной логике Аллена и логике управления во времени, совместно с базовыми знаниями, в том числе содержащими знания с неопределенностью, неточностью и нечеткостью.

3. Разработан оригинальный метод обработки темпоральных знаний, позволяющий производить вывод на основе знаний, содержащих временные (темпоральные) зависимости, путем проверки соответствия локальных моделей развития событий интерпретации глобальной модели развития событий в проблемной области.

4. Разработаны и исследованы программные средства темпорального вывода, обеспечивающие глубинную интеграцию с универсальным АТ-РЕШАТЕЛЕМ, что позволяет осуществлять поддержку решения задач на основе динамических интегрированных экспертных систем, как в статических, так и в динамических проблемных областях.

5. Для динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ впервые разработаны и исследованы новые программные средства, обеспечивающие глубинную интеграцию методов и средств экспертных систем и имитационного моделирования в рамках единой архитектуры динамических интегрированных экспертных систем.

Практическая значимость проведенных исследований и полученных результатов заключается в создании эффективных моделей, методов и программных средств темпорального вывода для динамических интегрированных экспертных систем. Важность решения поставленных задач определяется наличием новых возможностей описания динамического представления предметной области и уменьшении пространства поиска решений в динамических интегрированных экспертных системах, а также сокращением сроков создания динамических интегрированных экспертных систем.

Практическая значимость работы подтверждается использованием разработанного программного обеспечения в составе инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ (динамическая версия), а также разработанных на основе средств комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ отдельных компонентов прототипов динамических интегрированных экспертных систем: для целераспределения в группе самолетов-истребителей при отражении налета средств воздушного нападения противника, диагностики качества технологических процессов наноэлектроники, управления транспортными потоками.

Достоверность научных результатов. Достоверность разработанных методов и алгоритмов представления и обработки темпоральных знаний в интегрированных экспертных системах подтверждается соответствием теоретических и экспериментально полученных данных о качественных и количественных характеристиках работы созданных средств темпорального вывода, результатами сравнения с существующими средствами вывода в динамических интегрированных экспертных системах, а также актами о практическом внедрении и использовании.

Реализация результатов диссертации. Результаты диссертации использовались в НИР, выполненных при поддержке РФФИ (проекты №09-01-00638 и №12-01-00467) в учебно-научной лаборатории «Интеллектуальные системы и технологии» кафедры «Кибернетика» НИЯУ МИФИ, а также в программе У.М.Н.И.К. по проекту «Разработка и экспериментальное программное исследование методов построения темпоральных решателей для инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ».

Разработанные программные средства вывода используются:

- в составе отдельных компонентов прототипа динамической интегрированной экспертной системы для целераспределения в группе самолетов-истребителей при отражении налета средств воздушного нападения противника (в ОАО «Концерн радиостроения «Вега», акт об использовании);

- в составе компонента для распределения динамической нагрузки на облачную платформу потокового обработчика аудио сигнала, содержащего средства темпорального вывода, обеспечивающие принятие решений по перераспределению потока задач между узлами платформы и изменению состава узлов платформы (в ООО «Интервокс», акт об использовании);

- в составе исследовательского прототипа динамической интегрированной экспертной системы для диагностики качества технологических процессов нанoeлектроники по топологическим параметрам формируемой заготовки (в Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова, акт об использовании).

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 13-й национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (Белгород 2012), 6-ой и 7-ой международных научно-технических конференциях «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (Коломна 2011, 2013), First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010) (Владивосток 2010), 9-th international conference “Interactive Systems and Technologies: the Problems of Human-Computer Interaction” (Ульяновск 2011), 1-ом международном симпозиуме «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: теория и практика» (Калининград 2012), 19-ом, 20-ом и 21-ом международных научно-технических семинарах (Алушта 2010, 2011, 2012),

13-ой, 14-ой, 15-ой и 16-ой международных телекоммуникационных конференциях студентов и молодых ученых «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА», ежегодных «Научных сессиях МИФИ» с 2010 по 2013 гг. Получена медаль «Лауреат ВВЦ» за проект «Разработка прототипа темпорального решателя для комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ» в рамках выставки НТТМ-2010.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в двадцати четырех печатных трудах (в том числе в двух на английском языке), в том числе в пяти статьях в журналах, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (99 наименований) и приложений. Основная часть диссертации содержит 137 страниц машинописного текста, включая 45 рисунков, 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, её научная новизна и практическая значимость, сформулирована цель работы.

В первом разделе рассматриваются текущее состояние исследований и разработок в области динамических интеллектуальных систем и инструментальных средств поддержки их разработки, на основе чего делается вывод о высокой востребованности класса динамических интегрированных экспертных систем (ИЭС), обладающих масштабируемой архитектурой и расширяемой функциональностью. Кратко характеризуются функциональные особенности наиболее распространенных инструментальных средств поддержки разработки динамических интеллектуальных систем. Делается вывод о том, что по охвату рынка и предоставляемому функционалу у системы Gensum G2 нет конкурентов. Также отмечается, что отечественных инструментальных средств для разработки динамических ИЭС на рынке до сих пор не представлено.

При разработке динамических ИЭС (и инструментария для поддержки их разработки) возникает большое количество научных и технологических проблем, связанных с особенностями, как создания отдельных компонентов, так и взаимодействия этих компонентов между собой. Выделяются шесть классов подобных проблем. На основании анализа данных научных и технологических проблем и подходов к их решению делаются следующие выводы:

- данные проблемы возникают в процессе разработки большинства динамических ИЭС и связаны как с процессом создания, так и с процессом их функционирования;
- представленные проблемы достаточно сложны, что объясняет высокую трудоемкость и итоговую стоимость разработки прикладных ИЭС и инструментальных средств для поддержки их разработки;
- в настоящее время не существует единого подхода, позволяющего решить все приведенные проблемы в комплексе.

Наиболее перспективной базой для создания единого подхода к разработке динамических ИЭС по целому ряду причин является задачно-ориентированная методология (ЗОМ) построения ИЭС и предназначенный для ее поддержки инструментальный комплекс АТ-ТЕХНОЛОГИЯ. ЗОМ построения интегрированных экспертных систем была разработана профессором Рыбиной Г.В. в лаборатории «Интеллектуальные системы и технологии» кафедры «Кибернетика» МИФИ в середине 90-х годов двадцатого века. В основе ЗОМ лежит многоуровневая модель процессов интеграции в ИЭС, моделирование конкретных типов задач, релевантных технологии традиционных экспертных систем (подход «от задачи»), методы и способы построения программной архитектуры ИЭС и ее компонентов на каждом уровне интеграции и т.п. Инструментальный комплекс АТ-ТЕХНОЛОГИЯ предназначен для компьютерного построения прикладных ИЭС в статических проблемных областях (Про). Комплекс поддерживает ЗОМ и представляет собой взаимосвязанную совокупность средств автоматизации проектирования ИЭС на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) с единым управлением проектом по созданию ИЭС в соответствии с поставленными задачами, набором имеющихся подсистем, конкретной моделью ЖЦ создания программного обеспечения ИЭС.

Анализ особенностей ЗОМ показывает, что данная методология обладает достаточным набором свойств, необходимых для выбора ее в качестве базовой методологии, обеспечивающей решение значительного числа научных и технологических проблем, возникающих при разработке динамических ИЭС, в том числе возможность создания динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, включающей расширение функциональных возможностей универсального АТ-РЕШАТЕЛЯ с помощью средств темпорального вывода.

Для использования в инструментальных средствах для построения динамических ИЭС проводится анализ подходов к представлению временных

зависимостей (как оперирующих изменениями в ПрО, так и рассматривающих время как сущность ПрО). На основе анализа и экспериментального исследования моделей и методов представления времени делается вывод об оправданности использования интервальной логики Аллена и логики управления во времени в динамической версии инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

Во втором разделе рассматриваются теоретические аспекты темпорального вывода в динамических ИЭС. В диссертации представлена оригинальная модель темпорального вывода на продукционных правилах для динамических ИЭС (Рисунок 1), предусматривающая обработку знаний, содержащих темпоральные зависимости, совместно с базовыми знаниями о ПрО на основе универсальных средств вывода, реализованных в ЗОМ.

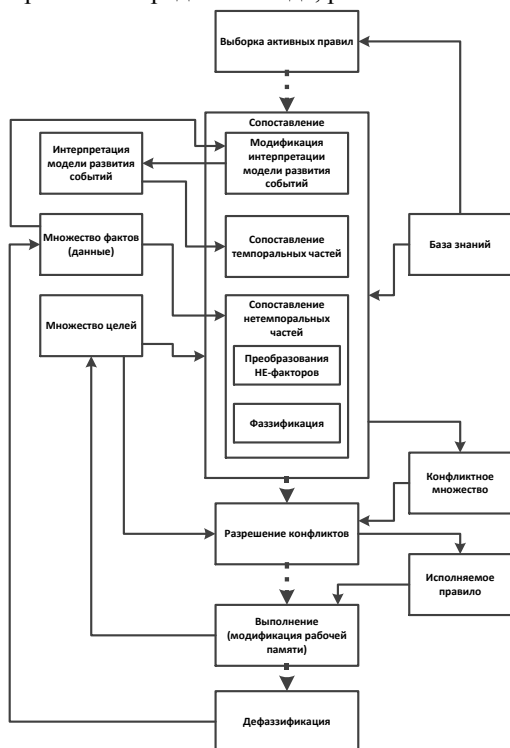


Рисунок 1 - Схема темпорального вывода на продукционных правилах

Темпоральный вывод – процесс рассуждений, учитывающий временные и причинно-следственные соотношения между объектами

предметной области, а также возможность изменения в процессе работы состава знаний и данных. Особенностью темпорального вывода на продукционных правилах в динамических ИЭС являются работа по тактам, что означает получение новых данных на каждом такте работы и необходимость выполнения вывода также на каждом такте.

Модель, соответствующая представленной на Рисунке 1 схеме вывода, является обобщением базовой модели для случая темпорального вывода, т.е. формально данная модель темпорального вывода может быть представлена следующим образом: $I' = \langle A, S'', K, W', D \rangle$, где

A – процесс выбора активных правил базы знаний (БЗ), необходимых для решения задачи в очередном цикле работы интерпретатора;

S'' – процесс сопоставления посылок активных правил с состоянием рабочей памяти, включающий построение интерпретации модели развития событий, сопоставление темпоральных и нетемпоральных частей правил, а также различные преобразования НЕ-факторов знаний (неопределенность, неточность, нечеткость), в том числе фаззификацию;

K – процесс разрешения конфликтов, определяющий выбор применяемого на текущем шаге вывода правила из списка успешно прошедших сопоставление;

W' – процесс выполнения следствия выбранного при сопоставлении правила с вычислением истинности следствия, учитывая НЕ-факторы;

D – процесс дефаззификации фаззифицированных в ходе вывода значений параметров.

В отличие от классической модели вывода и ее развития в контексте вывода на недостоверных знаниях этап сопоставления дополняется процессами, обеспечивающими модификацию интерпретации модели развития событий и сопоставление темпоральных частей посылок активных правил. Кроме того следует отметить, что в случае динамической ИЭС вывод осуществляется независимо на каждом такте работы. Общей частью является интерпретация модели развития событий, сохраняющаяся от такта к такту и модифицирующаяся в рамках каждого такта. Поскольку основным подходом к представлению знаний, используемым в ЗОМ построения ИЭС, являются продукционные правила, то задача темпорального вывода для динамических ИЭС описывается с точки зрения продукционного подхода.

Рассматривается формальная постановка задачи темпорального вывода на продукционных правилах. База знаний $KB = \{R_i\}$, $i = 1, \dots, n$ – представляет собой множество правил. Правило – это двойка $R_i = \langle C_i, E_i \rangle$, где C_i – посылка правила, а E_i – следствие правила. Посылка $C_i = \langle C_{iS}, C_{iT} \rangle$, где C_{iS} –

статические условия, а C_{iT} – темпоральные условия (локальная модель развития событий). Следствие $E_i = \langle E_{i0}, E_{i+} \rangle$, где E_{i0} – срочные действия, а E_{i+} – несрочные действия. $E(t) = \{E_j\}$, $j = 1, \dots, m$ – множество применяемых действий (модификаций рабочей памяти) на такте t . M^t , $t = 1, \dots, k$ – интерпретация текущей модели развития событий в ПрО на такте t (множество текущих состояний темпоральных примитивов). D^t – данные, полученные от внешнего окружения на такте t . Изменение интерпретации задается следующим образом: $M^{t+1} = F(M^t, D^{t+1})$, где F – функция модификации интерпретации модели развития событий. Правило R_i может быть добавлено в конфликтный набор на такте t только в том случае, когда C_i^T соответствует M^t , а C_i^S соответствует D^t . Задача темпорального вывода на такте t ставится следующим образом: $\langle E(t), M^t \rangle = \text{Solve}(KB, M^{t-1}, D^t)$, т.е. на каждом такте работы t необходимо выполнить модификацию модели развития событий и составить список применяемых действий.

Для динамического представления ПрО были выбраны модифицированная логика Аллена, основанная на классической логике Аллена, и логика управления во времени. Классическая логика Аллена обладает ограниченной выразительной способностью, что осложняет ее применимость в динамических ИЭС. С целью расширения выразительной способности логики Аллена в диссертации была проведена ее модификация:

- в состав основных темпоральных объектов логики Аллена включены события и операций над ними, что позволило сделать описания с помощью данной логики более естественными (это упрощает впоследствии реализацию средств автоматизированного приобретения знаний);
- в состав логики Аллена включены классические логические связки, обеспечивающих возможность описания моделей развития событий, содержащих несколько темпоральных ограничений;
- в состав формул логики Аллена включены непосредственно темпоральных объектов (событий и интервалов), что позволяет оперировать в модели развития событий фактами их наблюдения в текущий момент;
- в состав операций над темпоральными объектами логики Аллена включены операции, связанные с измерением качественных характеристик объектов (продолжительность, количество возникновений), что обеспечивает возможность оперировать не только качественными характеристиками темпоральных объектов, но и количественными.

Объектами модифицированной интервальной логики Аллена являются события, возникающие в ПрО, и темпоральные интервалы, отражающие

протекание какого-либо процесса (отличие события от интервала заключается в том, что событие моментально, а интервал имеет ненулевую продолжительность). Исходными символами модифицированной логики Аллена являются: переменные, обозначающие события и интервалы; характеристики переменных: c – количество возникновений (события или интервала), l – продолжительность (интервала); логические связки: \sim (отрицание), $\&$ (конъюнкция), \vee (дизъюнкция); связки Аллена: b (*before* – раньше), a (*after* – позднее), m (*meets* – встречается), o (*overlaps* – перекрывает), s (*starts* – начинает), d (*during* – во время), e (*is equal* – равно, точнее, синхронно с), f (*finishes* – заканчивает); связки сравнения: $>$ (больше), $<$ (меньше), $=$ (равно); целые числа; левая и правая скобки: (и). Элементарными формулами модифицированной логики Аллена являются: выражения $X r Y$, где X, Y – интервалы и r – любая связка Аллена; выражения $X r Y$, где X, Y – события и r – связка Аллена из множества $\{b, a, e\}$; выражения $X r Y$, где X – событие, Y – интервал и r – связка Аллена из множества $\{b, a, s, d, f\}$; выражения $XN r N$, где X – переменная, N – характеристика, r – связка сравнения, N – целое число. В качестве формул модифицированной логики Аллена выступают: переменные; элементарные формулы; если f и g – формулы, то формулами также являются: $\sim f$, $(f \& g)$, $(f \vee g)$.

Таким образом, модель развития событий в системе задается совокупностью темпоральных объектов (событий и интервалов), а локальная модель развития событий в правиле – формулами модифицированной логики Аллена. Интерпретация модели развития событий в системе задается временами возникновения событий, начал и окончаний интервалов.

Для представления темпоральных знаний в диссертации предложен обобщенный ЯПЗ для динамических ИЭС, позволяющий представлять темпоральные знания, основанные на модифицированной интервальной логике Аллена и логике управления во времени, совместно с базовыми знаниями, в том числе содержащими знания с неопределенностью, неточностью и нечеткостью. Основными элементами ЯПЗ являются объекты и правила. Объекты соответствуют сущностям ПрО и описываются в виде $\langle IO, NameO, L \rangle$, где IO – порядковый номер объекта; $NameO$ – имя объекта; L – список атрибутов, причем атрибут объекта имеет вид $\langle IA, NameA, Type \rangle$, где IA – порядковый номер атрибута; $NameA$ – имя атрибута; $Type$ – тип атрибута. Событие в данном случае представляется в виде объекта с атрибутом «условие возникновения» типа «логическое выражение» (обычное логическое выражение, связывающее атрибуты

объектов ПрО, не являющихся темпоральными). Истинность значения данного атрибута в момент времени T показывает то, что рассматриваемое событие произошло в момент времени T . Темпоральный интервал аналогичным образом представляется в виде объекта с двумя основными атрибутами: «условие начала» и «условие окончания» типа «логическое выражение». Истинность значения атрибута *условие начала* в момент времени T_1 и истинность значения атрибута *условие окончания* в момент времени T_2 показывают то, что интерпретацией данного интервала на временную ось является отрезок $[T_1, T_2]$. Кроме этого событие и интервал имеют также атрибут «количество возникновений» описывающий количество раз, которое объект наблюдался в ПрО. Также интервал имеет атрибут *продолжительность* (длительность наблюдения).

Правило в ЯПЗ представляется, как $(IR, Ins, Cons)$, где IR – порядковый номер правила; Ins – посылка правила, которая содержит список пар типа «атрибут-значение», связанных между собой логическими отношениями конъюнкции и дизъюнкции, $Cons$ – действие правила, которое содержит список атрибутов с присваиваемыми им значениями. Посылка темпорального продукционного правила при таком подходе содержит (кроме обычных составляющих) некоторую локальную модель развития событий, описанную с помощью формул модифицированной логики Аллена. Применение правой части (означивание) правила в таком случае может быть выполнено только при соответствии этой локальной модели текущему развитию событий в ПрО. Таким образом, применение модифицированной логики Аллена позволяет описывать темпоральные зависимости между объектами ПрО непосредственно внутри правил, причем отслеживание проявлений этих зависимостей обеспечивает принятие решений с учетом текущего развития событий в ПрО. Использование управления во времени требует введение в ЯПЗ новых типов правил: для быстрого реагирования на определенные (обычно экстренные) события ПрО («правила-реакции») и для отслеживания определенных циклов в работе («периодические правила»). «Правила-реакции» в целом соответствуют модифицированной логике Аллена и представляют собой правила, содержащие в посылке условия из элементарных формул, являющихся одиночным темпоральным объектом (событием или интервалом). Для представления «периодических правил» у правила ЯПЗ вводится новый атрибут ТИП, способный принимать значения:

“Обычное” и “Периодическое”. Посылки *Ins* периодических правил несут в себе дополнительное условие – период выполнения.

В диссертации предлагается оригинальный метод обработки темпоральных знаний, позволяющий производить вывод на основе знаний, содержащих *временные* (темпоральные) зависимости, путем проверки соответствия локальных моделей развития событий интерпретации глобальной модели развития событий в ПрО. Особенности используемой модели темпорального вывода выступают необходимостью на этапе сопоставления выполнять формирование интерпретации развития событий и обработку темпоральной части посылок продукционных правил. При формировании интерпретации развития событий происходит привязка событий и интервалов, определенных в ПрО, к временной оси путем идентификации фактов их возникновения на основании имеющихся в рабочей памяти данных и рассмотрения истории возникновения в прошлом. При этом отдельно рассматриваются случаи повторных возникновений и нестандартного расположения событий на временной оси (например, наблюдения признаков окончания интервала до его начала). Обработка темпоральной части посылок продукционных правил опирается на результат формирования интерпретации развития событий в ПрО. Для активных правил осуществляется решение задачи проверки соответствия локальных моделей развития событий, описанных с помощью модифицированной логики Аллена и логики управления во времени, с построенной интерпретацией.

Третий раздел диссертации посвящен вопросам реализации в комплексе АТ-ТЕХНОЛОГИЯ средств темпорального вывода, а также вопросам разработки средств, обеспечивающих взаимодействие темпорального решателя с другими компонентами комплекса (универсальный АТ-РЕШАТЕЛЬ, подсистема имитационного моделирования) и реализации типовой проектной процедуры «Построение динамической ИЭС», что определяется требованиями интеллектуальной технологии построения динамических ИЭС.

Темпоральный решатель в процессе функционирования в соответствии с постановкой задачи темпорального вывода на правилах и функциональными требованиями выполняет решение двух задач: построение интерпретации модели развития событий в ПрО и означивание темпоральной части продукционных правил. Архитектура темпорального решателя приведена на Рисунке 2.

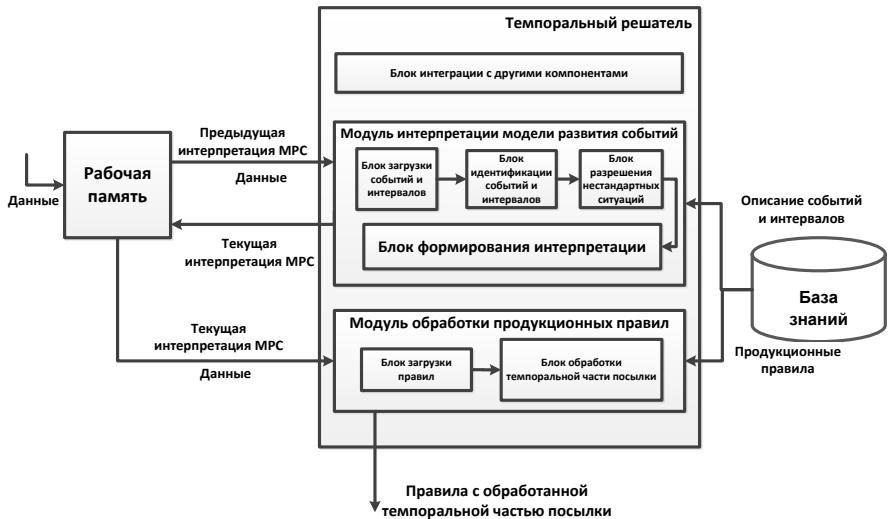


Рисунок 2 - Архитектура темпорального решателя

Модуль интерпретации модели развития событий обеспечивает построение начальной интерпретации и ее модификацию на каждом шаге. Он состоит из нескольких блоков: *блок загрузки событий и интервалов* обеспечивает загрузку во внутреннее представление описаний событий и интервалов ПрО, *блок идентификации событий и интервалов* проверяет соответствие поступающих на каждом такте работы данных условиям возникновения событий и интервалов, *блок разрешения нестандартных ситуаций* обеспечивает разрешение конфликтов между поступающими данными и текущей интерпретацией (например, наблюдение окончания интервала до наблюдения его начала). *Модуль обработки продукционных правил* предназначен для загрузки и означивания темпоральных частей правил в соответствии с текущей интерпретацией модели развития событий. *Блок интеграции с другими компонентами* предоставляет программный интерфейс для взаимодействия с остальными компонентами комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ (например, подсистемой имитационного моделирования). В процессе функционирования темпоральный решатель осуществляет загрузку из внутренней памяти и сохранение в ней интерпретации модели развития событий и БЗ, в связи с чем, в диссертации проведена детальная проработка внутреннего представления данных объектов, позволившего максимально уменьшить нагрузку при конвертациях.

Важной особенностью темпорального решателя является тесное взаимодействие с универсальным АТ-РЕШАТЕЛЕМ и подсистемой моделирования внешнего окружения. Темпоральный решатель, как и подсистема имитационного моделирования, работает по тактам. На Рисунке 3 представлена схема взаимодействия темпорального решателя, универсального АТ-РЕШАТЕЛЯ и подсистемы имитационного моделирования.

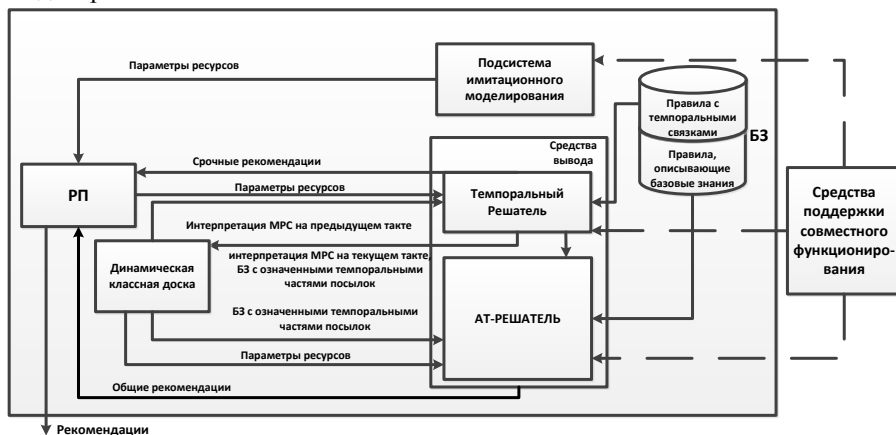


Рисунок 3 - Схема взаимодействия компонентов

Взаимодействие темпорального решателя с универсальным АТ-РЕШАТЕЛЕМ и подсистемой имитационного моделирования обеспечивают средства поддержки совместного функционирования. Также компоненты взаимодействуют посредством общей рабочей памяти. Средства поддержки совместного функционирования обеспечивают синхронизацию работы компонентов путем отправки им сообщений с командами. В рабочей памяти представлены выделенные объекты ПрО, совокупность атрибутов которых описывает состояние системы. БЗ содержит темпоральные правила, необходимые для решения поставленной задачи, а также описание событий и интервалов. В результате темпорального вывода на правилах происходит изменение состояния системы, т.е., в общем случае, изменяются атрибуты объектов рабочей памяти в соответствии с решаемой задачей. Взаимодействие темпорального решателя и подсистемы имитационного моделирования является асинхронным, что позволяет получить более высокую производительность системы за счет использования времени на

обработку общих ситуаций темпоральным решателем для выполнения следующего такта моделирования, кроме того, данный подход соответствует реальной практике, когда невозможно мгновенно отреагировать на какое-либо событие. Функционирование темпорального решателя и универсального АТ-РЕШАТЕЛЯ – синхронные процессы, выполняющиеся последовательно.

Одной из основных особенностей ЗОМ является наличие интеллектуальной поддержки разработки прототипов ИЭС. Данная поддержка включает в себя: построение плана разработки прототипа ИЭС на всех этапах ЖЦ на основе знаний о моделях и методах решения типовых задач; динамическое ассистирование инженеру по знаниям при построении прототипа ИЭС на основе знаний о типовых проектных процедурах (ТПП) и повторно используемых компонентах комплекса. В диссертации представлена новая ТПП «Построение динамической ИЭС».

ТПП «Построение динамической ИЭС» можно представить в виде: $ТПП_{dinam} = \langle C_{dinam}, L_{dinam}, T_{dinam} \rangle$. В качестве входных данных рассматриваемая ТПП использует иерархию расширенных диаграмм потоков данных (РДПД), а в качестве условий C_{dinam} выступают наличие на РДПД верхнего уровня внешней сущности, соответствующей имитационной модели, и наличие на этой РДПД элемента «трапеция» (неформализованная операция). В качестве выходных данных T_{dinam} , как множество параметров проекта, $ТПП_{dinam}$ содержит: иерархию РДПД, поле знаний, БЗ, имитационную модель, конфигурацию средств вывода, сценарий диалога, модель объяснения, скрипты интеграции и др. На основании C_{dinam} и T_{dinam} составляется сценарий L_{dinam} . Общая схема выполнения данной ТПП приведена на Рисунке 4.

Четвертый раздел диссертации посвящен экспериментальной проверке и использованию разработанных инструментальных программных средств для автоматизированной поддержки процессов разработки прикладных динамических ИЭС.

Экспериментальное исследование темпорального решателя и средств поддержки совместного функционирования (темпорального решателя, универсального АТ-РЕШАТЕЛЯ и подсистемы имитационного моделирования) проводилось путем разработки совокупности компонентов, минимально необходимых для функционирования прикладной динамической ИЭС, что включает: БЗ, средства вывода (универсальный АТ-РЕШАТЕЛЬ и темпоральный решатель), рабочую память, имитационную модель (в качестве источника данных) и средства поддержки совместного функционирования. Для проведения исследования, ориентируясь на модельную задачу из класса

типовых задач ЗОМ, была выбрана простейшая динамическая Про, связанная с управлением дорожным движением на автомобильном перекрестке (рассмотрено 5 задач различной сложности). Анализ функционирования описанных выше минимально необходимых наборов компонентов показал работоспособность созданных программных средств и возможность их применения для разработки динамических ИЭС.

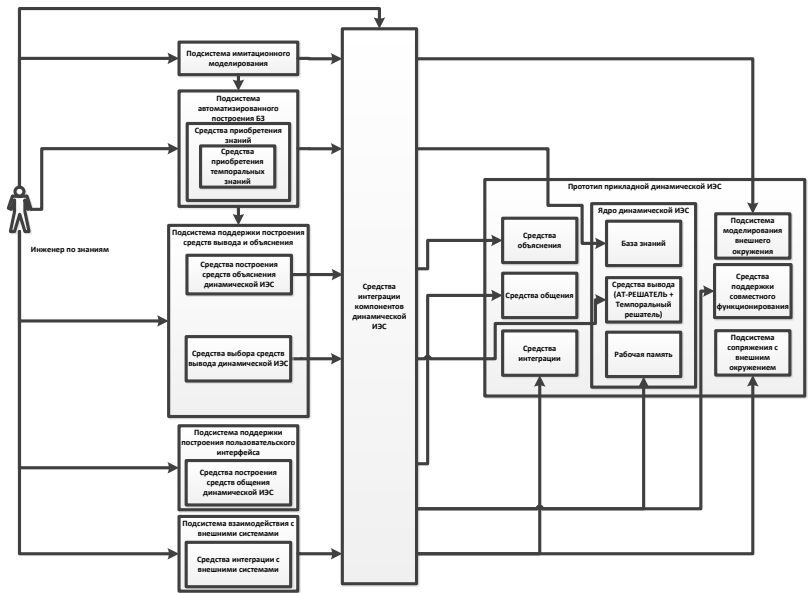


Рисунок 4 – Схема выполнения ТПП «Построение динамической ИЭС»

Наиболее показательным является сравнение разработанных программных средств со средствами системы Gensym G2, как наиболее широко используемым инструментарием для разработки как динамических ИЭС, так и ДИС в целом. Для проведения сравнения с помощью системы Gensym G2 были созданы аналогичные компоненты динамических ИЭС для управления дорожным движением на перекрестке. В качестве основных критериев для сравнения выступили: размер БЗ, средняя длина *посылки* правил БЗ, средняя глубина вывода, скорость работы средств вывода.

По результатам сравнения обобщенного ЯПЗ и ЯПЗ системы Gensym G2 сделан вывод о том, что обобщенный ЯПЗ более выразителен и более прост для использования при создании динамических ИЭС, благодаря следующим преимуществам: возможность описывать модель развития

событий в ПрО, т.е. изменение состояния системы во времени; возможность оперировать качественными понятиями времени («раньше», «во время» и т.п.) вместо количественных (четкой привязки к временам возникновения событий); приближенность к естественному русскому языку. Данные особенности обеспечивают сокращение времени построения модели ПрО, уменьшение числа правил в БЗ и упрощение самих правил. Кроме того, низкая средняя длина посылки правил положительно сказывается на скорости работы (требуется меньше сравнений).

По результатам экспериментального сравнения средств вывода, включающих АТ-РЕШАТЕЛЬ и темпоральный решатель, со средствами вывода системы Gensym G2 сделаны выводы о том, что: для решения задач средствам вывода, включающим универсальный АТ-РЕШАТЕЛЬ и темпоральный решатель, требуется меньшая глубина вывода, что упрощает рассуждения и увеличивает скорость работы; общее время работы средств вывода, включающих универсальный АТ-РЕШАТЕЛЬ и темпоральный решатель, сравнимо с мировыми аналогами.

В четвертом разделе также приводится описание технологии использования разработанных инструментальных программных средств для построения отдельных компонентов прикладных динамических ИЭС (БЗ, имитационной модели, средств вывода и др.) на примере задачи целераспределения в группе самолетов-истребителей при отражении налета средств воздушного нападения противника. Технология охватывает все этапы разработки, начиная с системного анализа на применимость технологии и заканчивая разработкой пользовательского интерфейса.

В **Приложение** вынесены акты об использовании результатов диссертационного исследования; полная версия описания обобщенного ЯПЗ; полные требования к разработанным программным средствам; примеры функционирования средств отладки темпорального решателя; результаты тестирования средств поддержки совместного функционирования; полная версия технологической БЗ для ТПП «Построение динамической ИЭС» и примеры функционирования комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ в процессе применения ТПП «Построение динамической ИЭС».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана оригинальная модель темпорального вывода на продукционных правилах для динамических ИЭС, предусматривающая обработку знаний, содержащих темпоральные зависимости, совместно с

базовыми знаниями о ПрО на основе универсальных средств вывода, реализованных в ЗОМ.

2. Предложен обобщенный ЯПЗ для динамических интегрированных экспертных систем, позволяющий представлять темпоральные знания, основанные на модифицированной интервальной логике Аллена и логике управления во времени, совместно с базовыми знаниями, в том числе содержащими знания с неопределенностью, неточностью и нечеткостью.

3. Разработан оригинальный метод обработки темпоральных знаний, позволяющий производить вывод на основе знаний, содержащих временные (темпоральные) зависимости, путем проверки соответствия локальных моделей развития событий интерпретации глобальной модели развития событий в ПрО.

4. Разработаны и исследованы программные средства темпорального вывода, обеспечивающие глубинную интеграцию с АТ-РЕШАТЕЛЕМ, что обеспечивает поддержку решения задач на основе динамических ИЭС, как в статических, так и в динамических ПрО.

5. Для динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ впервые разработаны и исследованы новые программные средства, обеспечивающие глубинную интеграцию методов и средств экспертных систем и имитационного моделирования в рамках единой архитектуры динамических ИЭС.

6. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали преимущества разработанных инструментальных программных средств над аналогами по ряду критериев: мощность ЯПЗ, скорость работы, сокращение сроков разработки динамических ИЭС.

7. Созданные программные средства использованы при экспериментальном программном моделировании отдельных компонентов прототипа динамической ИЭС для целераспределения в группе самолетов-истребителей при отражении налета средств воздушного нападения противника в ОАО «Концерн радиостроения «Вега» (акт об использовании), в составе компонента для распределения динамической нагрузки на облачную платформу потокового обработчика аудио сигнала, содержащего средства темпорального вывода, в ООО «Интервокс» (акт об использовании), а также при создании исследовательского прототипа динамической ИЭС для диагностики качества технологических процессов нанозлектроники по

топологическим параметрам формируемой заготовки в Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова (акт об использовании).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Рыбина Г.В., Паронджанов С.С., Шанцер Д.И., Мозгачев А.В. Тенденции развития и применения современного программного инструментария для поддержки построения динамических интеллектуальных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. №11. С. 2-11.

2. Рыбина Г.В., Демидов Д.В., Шанцер Д.И., Мозгачев А.В. Динамические интегрированные экспертные системы: новые возможности инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. №6. С. 7-15.

3. Рыбина Г.В., Шанцер Д.И., Мозгачев А.В., Блохин Ю.М. Динамические интеллектуальные системы на основе интегрированных экспертных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. №5. С. 13-19.

4. Рыбина Г.В., Мозгачев А.В., Со Тиха Аунг Построение динамических интегрированных экспертных систем на основе задачно-ориентированной методологии // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. №8. Т.10. С. 4-12.

5. Рыбина Г.В., Мозгачев А.В., Паронджанов С.С., Со Тиха Аунг Динамические интегрированные экспертные системы: представление и обработка темпоральных знаний // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. №6. С. 23-33.

Публикации, представленные в базе цитирования Scopus

6. Rybina G.V., Shantzer D.I., Mozgachev A.V. Some aspects of evolution of tools for support dynamic integrated expert systems development // Proceedings of First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2010), 6-9 September 2010, Vladivostok (Russia). – Vladivostok: IACP FEB RAS. 2010. P. 136-139.

Основные публикации в прочих изданиях

7. Рыбина Г.В., Мозгачев А.В., Блохин Ю.М., Чеченин Е.С. Некоторые вопросы разработки прототипа темпорального решателя для инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Труды XIX Международного научно-технического семинара. Сентябрь 2010г. Алушта. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 26-27.

8. Мозгачев А.В., Каунов С.А., Чеченин Е.С. О разработке прототипа темпорального решателя для инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. XIII Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. В 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. Ч. 2. С. 93-94.

9. Rybina G.V., Mozgachev A.V. Construction of temporal knowledge bases in integrated expert systems: evolution of the combined knowledge acquisition method // Interactive Systems and Technologies: the Problems of Human- Computer Interaction. Collection of scientific papers. – Ulyanovsk: UISTU, 2011. P. 369-374.

10. Рыбина Г.В., Шанцер Д.И., Мозгачев А.В. Об одном подходе к приобретению, представлению и обработке темпоральных знаний // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов VI-ой Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. – М.: Физматлит, 2011. Т.1. С. 272-276.

11. Мозгачев А.В., Шанцер Д.И., Гвоздков П.И., Матинян С.А. Приобретение, представление и обработка темпоральных знаний в динамической версии инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Тезисы докладов XX Международного научно-технического семинара. г. Алушта, 18-24 сентября 2011. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. С.61.

12. Мозгачев А.В. Особенности разработки прототипа темпорального решателя для комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. XIV Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. Ч. 3. С. 27-28.

13. Рыбина Г.В., Шанцер Д.И., Мозгачев А.В., Блохин Ю.М. Развитие инструментальной базы комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ для построения

динамических интегрированных экспертных систем // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: теория и практика. Материалы 1-го международного симпозиума. Часть 1. - К.: Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, 2012. С.154-163.

14. Мозгачев А.В. Некоторые вопросы приобретения, представления и обработки темпоральных знаний в динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации. Сборник трудов XXI Международного научно-технического семинара, 18-25 сентября 2012 г., Алушта. – М.: Изд-во ГУП Академиздат центр «Наука» РАН. 2012. С.36-37.

15. Рыбина Г.В., Мозгачев А.В. Приобретение, представление и обработка темпоральных знаний в динамических интегрированных экспертных системах // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012: Труды конференции. – Белгород: изд-во БГТУ, 2012. Т.2. С. 170-176.

16. Мозгачев А.В. Приобретение и представление темпоральных знаний в средствах комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // XV Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. В 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. Ч.3. С. 178-179.

17. Рыбина Г.В., Мозгачев А.В., Со Тиха Аунг Моделирование процессов функционирования сложных технических систем в динамических интегрированных экспертных системах // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов VII-ой Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. – М.: Физматлит, 2013. Т.3. С. 1131-1136.

18. Мозгачев А.В. О приобретении, представлении и обработке темпоральных знаний в динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // XVI Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. В 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. Ч.3. С. 205.

19. Мозгачев А.В., Со Тиха Аунг Опыт представления и обработки темпоральных знаний средствами динамической версии комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // XVI Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. В 3-х частях. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. Ч.3. С. 207.