

Блохин Юрий Михайлович

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОГРАММНОЙ
СРЕДЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ
ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Автор:



Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: **Рыбина Галина Валентиновна**
доктор технических наук, профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Официальные оппоненты: **Калянов Георгий Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
Институт проблем управления РАН,
зав. лабораторией «Методы автоматизации организационных систем»

Еремеев Александр Павлович,
доктор технических наук, профессор,
Московский энергетический институт (технический университет),
зав. кафедрой прикладной математики

Ведущая организация: **Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук**

Защита состоится 14 февраля 2018 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.03 на базе Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 8(499)324-87-66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте: <http://ods.mephi.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, тел. 8(499)324-87-66, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.130.03.

Автореферат разослан _____ декабря 2017 года.

Ученый секретарь, д.т.н.



Леонова Н.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время интеллектуальные системы и технологии, являясь основой ключевых технологий XXI века, применяются практически во всех производственных и социально значимых областях человеческой деятельности, поскольку их качественно новые возможности позволяют значительно повысить эффективность использования вычислительной техники в традиционных сферах ее применения за счет решения новых классов задач с использованием методов и средств искусственного интеллекта.

Большой вклад в создание теории, системной и программной технологии построения интеллектуальных систем различной архитектурной типологии, а также в развитие методов интеллектуального планирования внесли отечественные ученые Г.С. Осипов, Э.В. Попов, А.П. Еремеев, Г.В. Рыбина, Б.Е. Федун, И.Б. Фоминых, В.Н. Вагин, Г.Н. Калянов, Б.А. Позин, Н.Г. Ярушкина, В.Н. Бурков, В.Ф. Хорошевский, В.Н. Грибова, В.В. Голенков, Е.М. Лаврищева, В.Л. Стефанюк, В.Б. Тарасов и зарубежные ученые D.S. Nau, M. Ghallab, P. Traverso, A. Coles, R.E. Korf, E.C. Payne, R.C. McArthur и др.

Среди отдельных классов интеллектуальных систем наиболее востребованными в настоящее время являются интегрированные экспертные системы (ИЭС), в которых в рамках единой масштабируемой архитектуры совместно используется широкий спектр моделей и методов решения различных неформализованных и формализованных задач как в статических, так и в динамических проблемных областях. Анализ опыта разработки зарубежных и отечественных ИЭС, в том числе созданных на основе задачно-ориентированной методологии построения ИЭС (автор профессор Г.В. Рыбина) и поддерживающего эту методологию инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, позволил выделить целый ряд общих научных и технологических проблем, основные из которых перечислены ниже.

1. Наличие значительных объемов информации, содержащихся в базах знаний (БЗ) ИЭС, что приводит к существенным вычислительным затратам, трудоемкости привлечения экспертов к процессам получения, структурирования и верификации информации, извлеченной из различных источников знаний.

2. Усложнение средств вывода решений в прикладных ИЭС, что связано с многообразием и масштабируемостью архитектур ИЭС, возрастанием числа стадий и итераций в моделях жизненного цикла построения отдельных компонентов, необходимости совместной обработки неопределенных, неточных, нечетких и др. типов знаний, содержащих так называемые НЕ-факторы знаний.

3. Необходимость интеграции средств вывода с разнородными средствами в составе ИЭС (в силу масштабируемости их архитектуры), которые в процессах вывода могут являться как источниками, так и потребителями данных, а также обеспечение гибкой настройки средств вывода на решаемые задачи.

4. Сложность представления, хранения и анализа в динамических ИЭС изменяющихся во времени данных, поступающих из внешних источников, а также выполнения темпоральных рассуждений о нескольких различных асинхронных

процессах (задачах) с учетом результатов моделирования внешнего мира и различных его состояний.

Поэтому величина эффекта от создания и применения интеллектуальных систем различных типов во многом зависит от наличия современных мощных инструментальных средств и массовости их применения в стратегически значимых областях, что определяет особую актуальность, важность, а также высокие темпы роста исследований и разработок, связанных с созданием высокотехнологичной инструментальной базы для поддержки разработки интеллектуальных систем.

Анализ практического опыта создания целого ряда статических, динамических и обучающих ИЭС на основе использования задачно-ориентированной методологии и поддерживающего эту методологию инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ показал, что наибольшей сложностью по-прежнему обладают этапы проектирования и реализации ИЭС, причем существенное влияние оказывают специфика конкретной проблемной области и человеческий фактор. Здесь можно выделить следующие основные проблемы, показывающие необходимость создания эффективных инструментальных средств автоматизированной поддержки процессов разработки ИЭС.

1. Неспособность пользователей (инженеров по знаниям) полностью определять требования к разрабатываемым системам, отсутствие надежного метода оценки качества верификации и валидации разрабатываемых ИЭС, неприменимость традиционной технологии трассировки к БЗ ИЭС.

2. Наличие большого числа промежуточных стадий и итераций в моделях жизненного цикла построения отдельных компонентов ИЭС, в том числе за счет использования различных источников знаний и возрастания доли недостоверной и темпоральной информации.

3. Практическое отсутствие (за исключением комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ) специализированных инструментальных средств, обеспечивающих: автоматизированное проектирование программного и информационного обеспечения прикладных ИЭС на всех этапах жизненного цикла; повторное использование отдельных программных и информационных компонентов; наличие внутренней интегрируемости инструментальных средств; поддержка удобного когнитивно-графического интерфейса; открытость и переносимость инструментальных средств.

Подводящее число коммерческих зарубежных инструментальных средств, например G2 (Gensym Corp.), RTWorks (Talarian Corp.), SHINE (NASA / JPL), RTXPS (Environmental Software & Services GmbH), и др. не «знают», что проектирует и разрабатывает с их помощью инженер по знаниям, поэтому эффективность применения полностью определяется искусством разработчиков. Существует также большое количество универсальных сред разработки, например Microsoft Visual Studio, Eclipse, NetBeans, Apple XCode и др., которые не ориентированы на создание интеллектуальных систем, и их адаптация для автоматизации процессов разработки ИЭС сопряжена со значительными трудностями.

В контексте решения вышеперечисленных проблем определенные результаты были получены в рамках KBSA-подхода (Knowledge Based Systems Assistant), где особое внимание уделялось выбору типов спецификаций, генерации кода из спецификаций и др., что обеспечивало некоторое ассистирование процессов проектирования. Более существенных результатов в создании инструментальных средств нового поколения удалось достичь в рамках KBSE-подхода (Knowledge Base Software Engineering), интегрирующего как минимум возможности средств разработки традиционных ЭС и CASE-средств, а как максимум - обеспечивающего «интеллектуализацию» процессов разработки интеллектуальных систем.

Наиболее известным инструментарием нового поколения, в котором реализован KBSE-подход, является инструментальный комплекс АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, обеспечивающий автоматизированную поддержку процессов построения ИЭС на основе задачно-ориентированной методологии, и включающий интеллектуальное ассистирование (планирование) действий инженеров по знаниям за счет использования технологических знаний о типовых проектных процедурах (ТПП) и повторно-используемых компонентах (ПИК) предшествующих проектов.

Этот подход является наиболее актуальным и хорошо соответствует современным тенденциям, связанными со снижением трудозатрат на разработку и смягчение квалификационных требований к проектировщикам и разработчикам прикладных систем. Существенных результатов в развитии интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ можно достичь, за счет повышения роли ПИК на этапах анализа и проектирования, пересмотра состава и структуры ТПП и расширения функциональности базового компонента - интеллектуального планировщика, что обеспечит не только эффективную помощь инженерам по знаниям но и планирование разработки в целом.

Анализ текущих версий интеллектуального планировщика комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ показал, что основными направлениями дальнейшего развития интеллектуального планировщика является модификация и оптимизация методов и алгоритмов планирования действий инженера по знаниям в процессе разработки прототипов ИЭС различной архитектурной типологии. Поскольку с усложнением архитектур ИЭС, появлением в составе технологической БЗ большого количества ТПП и ПИК время поиска решений значительно увеличилось и поиск стал достаточно трудоемким, то негативный эффект от неоптимальности выбора решений стал более значительным. Поэтому возникает необходимость усовершенствования методов и алгоритмов планирования, используемых интеллектуальным планировщиком. Результаты системного анализа современных методов интеллектуального планирования и проведенные экспериментальные исследования показали целесообразность использования достаточно известного подхода, связанного с планированием в пространстве состояний.

Таким образом, наиболее важными требованиями к методологиям и инструментальным средствам построения интеллектуальных систем, в частности ИЭС, обладающих мощной функциональностью и масштабируемой архитектурой, становятся факторы снижения стоимостно-временных показателей разра-

ботки и интеллектуальной нагрузки на инженеров по знаниям за счет усиления степени «интеллектуализации» процессов построения систем на всех этапах жизненного цикла, в том числе привлекая методы и средства интеллектуального планирования.

Цель исследований. Целью диссертации является разработка и исследование интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ для автоматизации процессов построения ИЭС различной архитектурной типологии на основе задачно-ориентированной методологии. Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие основные задачи:

1. Проведен эволюционный анализ опыта исследований и разработок в области автоматизации построения ИЭС различных классов (статические, динамические, обучающие) на основе использования задачно-ориентированной методологии и поддерживающего инструментария – комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ. В контексте задачно-ориентированной методологии построения ИЭС исследована предложенная профессором Г.В. Рыбиной модель интеллектуальной программной среды и средства ее реализации, на основе чего поставлена задача разработки новых подходов к реализации базовых компонентов - интеллектуального планировщика и технологической БЗ для повышения степени интеллектуализации процессов проектирования и разработки программного обеспечения ИЭС.

2. Проведен онтологический анализ современных исследований в области методов, алгоритмов и программных средств интеллектуального планирования и осуществлен выбор планирования в пространстве состояний как наиболее эффективного метода для решения задачи планирования действий инженера по знаниям в процессе разработки ИЭС.

3. Предложен метод генерации планов построения прототипов ИЭС и алгоритмы его реализации, позволяющие на основе модели архитектуры ИЭС и набора типовых проектных процедур из технологической БЗ осуществлять построение планов разработки прототипов ИЭС.

4. Разработаны алгоритмы для поддержки функционирования новой версии интеллектуального планировщика, основанные на детерминированном планировании в пространстве состояний и расширяющие классический эвристический поиск за счет учета специфики проблемной области.

5. Выполнена программная реализация интеллектуального планировщика, его окружения и отладочных средств для интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

6. С целью развития базовых компонентов интеллектуальной программной среды усовершенствована и экспериментально исследована технологическая БЗ о ТПП и ПИК, связанных с процессами разработки статических и динамических ИЭС.

7. Осуществлено экспериментальное программное исследование интеллектуального планировщика и технологической БЗ путем разработки нескольких прототипов статических и динамических ИЭС, а также использования в учебном процессе НИЯУ МИФИ.

Объект исследования. Объектом исследований являются базовые компоненты интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, предназначенные для автоматизированного построения ИЭС различной архитектурной типологии.

Предмет исследования. Предметом исследований являются модели, методы и программные средства интеллектуального планирования процессов построения программного обеспечения ИЭС, предназначенные для функционирования в составе интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертации использованы методы искусственного интеллекта, методы интеллектуального планирования, методы эвристического поиска, теория автоматов, теория графов, технология разработки программного обеспечения.

Научная новизна. В диссертации были получены следующие новые результаты.

1. В контексте развития задачно-ориентированной методологии построения ИЭС предложен основанный на эвристическом поиске оригинальный метод планирования действий инженера по знаниям, позволяющий на основе модели архитектуры проектируемой системы и технологических знаний в виде ТПП и ПИК осуществлять автоматическую генерацию планов построения прототипов ИЭС с учетом различной архитектурной типологии данного класса интеллектуальных систем.

2. Разработаны высокопроизводительные алгоритмы управления генерацией планов и специализированная эвристическая функция, позволяющие в совокупности существенно сократить пространство поиска и используемые вычислительные ресурсы за счет ориентированности на целевое программно-аппаратное обеспечение.

3. Разработаны и экспериментально исследованы новые программные средства, реализующие предложенные в диссертации методы и алгоритмы создания интеллектуального планировщика – одного из базовых компонентов интеллектуальной программной среды для поддержки процессов построения ИЭС, включенные в состав текущей версии инструментального программного комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

4. Модифицирована технология построения программного обеспечения прикладных ИЭС, с помощью которой снижается трудоемкость и интеллектуальная нагрузка на инженеров по знаниям на этапах анализа системных требований и проектирования.

5. Осуществлена экспериментальная проверка разработанных инструментальных программных средств путем реализации нескольких прототипов динамических ИЭС.

Практическая значимость. Практическая значимость и ценность работы заключается в создании эффективных методов и программных средств интеллектуализации процессов построения широкого класса ИЭС. Важность решения поставленных задач определяется необходимостью снижения стоимостно-

временных показателей разработки и интеллектуальной нагрузки на инженеров по знаниям за счет повышения степени интеллектуализации процессов построения программного обеспечения прикладных ИЭС на всех этапах жизненного цикла, включая наиболее сложные и трудоемкие этапы анализа системных требований и проектирования.

Практическая значимость работы подтверждается использованием разработанных программных средств в составе инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ в процессе автоматизированного построения трех прототипов ИЭС, предназначенных для таких задач реальной практической важности и сложности, как: управление медицинскими силами и средствами при крупных дорожно-транспортных происшествиях; мониторинг дорожно-транспортных происшествий; планирование госпитализации пострадавших; управление ресурсами системы спутниковой связи между региональными центрами; диагностика качества заготовок для электронно-лучевой литографии и др. Также практическая значимость подтверждается путем разработки специального программного модуля обработки бизнес-информации для отечественной системы Lement Pro, позволяющего повысить качество планирования проектов разработки программного обеспечения за счет использования накопленного технологического опыта и учета экспертных критериев.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов подтверждается данными, полученными в результате использования разработанных программных средств для автоматизированного построения нескольких прототипов динамических ИЭС, в том числе актами об использовании результатов диссертации для разработки прототипа динамической ИЭС для управления медицинскими силами и средствами при крупных дорожно-транспортных происшествиях и прототипа динамической ИЭС для управления ресурсами системы спутниковой связи между региональными центрами. Также достоверность подтверждается результатами экспериментального сравнения программного ядра интеллектуального планировщика с зарубежными планировщиками (FastForward, HSP и др.) на примере решения классических задач (Ханойские башни, Пятнашки, Кубик Рубика и др.).

Реализация результатов диссертации. Результаты диссертации использовались в НИР, выполненных при поддержке РФФИ (проекты № 12-01-00467 и № 15-01-04696) в учебно-научной лаборатории «Интеллектуальные системы и технологии» кафедры «Кибернетика» НИЯУ МИФИ, а также в учебном процессе для практической поддержки базовых дисциплин по направлению подготовки «Программная инженерия», а именно: «Интеллектуальные диалоговые системы»; «Динамические интеллектуальные системы»; «Проектирование кибернетических систем, основанных на знаниях»; «Современные архитектуры интеллектуальных систем».

Результаты диссертации использовались при разработке прототипов динамических ИЭС для управления медицинскими силами и средствами при крупных дорожно-транспортных происшествиях, а также управления ресурсами систе-

мы спутниковой связи между региональными центрами (разработанных в рамках НИР по хоздоговорной тематике для Всероссийского центра медицины катастроф «Защита» Министерства здравоохранения РФ) (акт об использовании).

Результаты диссертации также использовались: при разработке исследовательского прототипа ИЭС для диагностики заготовок для электронно-лучевой литографии для Ярославского Государственного Университета им. П.Г. Демидова (акт об использовании), а также при разработке программного модуля подсистемы обработки бизнес-информации системы Lement Pro для ООО «СОДИС ЛАБ» (акт об использовании).

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях и семинарах: 8th IEEE International Conference on Intelligent Systems (Sofia, Bulgaria, 2016); XXth ITHEA Joint International Scientific Events on Informatics ITA (Varna, Bulgaria, 2017); First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» ИТИ (Sochi, 2016); International conference on artificial intelligence ICAI (USA, Las Vegas, 2016); 5th International Conference on Knowledge Engineering and the Semantic Web (Kazan, 2014); 7я Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» (Светлогорск, 2017); Международной научно-практической конференции «Теория активных систем» (Москва, 2014-2016 г.); 7-ая, 8-ая Международная научно-техническая конференция (Коломна, 2013-2015 г.); 1-й международный симпозиум «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: теория и практика» (Калининград, 2012 г.); 14-ая, 15-ая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ (Казань, Смоленск, 2014-2016 г.); 7-е, 8-е Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ (Москва, 2014-2016 г.); 16-ая, 17-ая, 18-ая, 19-ая Российская научно-практическая конференция «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» (Москва, 2013-2016 г.); 15-ая, 16-ая и 17-ая Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА» (Москва, 2012 – 2014 гг.); Научные сессии НИЯУ МИФИ. (Москва, 2011 – 2015 гг.).

Публикации. По теме диссертации в период с 2011 по 2017 гг. опубликовано 33 печатных работы, в том числе 10 – в российских периодических изданиях, рекомендованных ВАК и проиндексированных в РИНЦ, 6 – в журналах и сборниках трудов конференций, включенных в базу SCOPUS, остальные в сборниках трудов различных конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём основного текста, без учета приложений — 164 страницы. Диссертация содержит 49 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 192 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе проведен комплексный анализ состояния исследований и разработок в широком классе прикладных интеллектуальных систем, на основе чего сделан вывод, что именно интегрированные экспертные системы (ИЭС) сегодня наиболее востребованы в сфере коммерческих и промышленных приложений и технологий разработки программного обеспечения в целом. Важное место уделено анализу современных инструментальных средств поддержки разработки широкого класса интеллектуальных систем, на основе чего показано, что представленные на рынке коммерческие инструментальные средства для разработки интеллектуальных систем (G2, RTXPS, SHINE, RTworks, COMDALE/X и др.), а также для более широких классов программного обеспечения (Microsoft Visual Studio, Git, XCode и др.) не отвечают требованиям снижения интеллектуальной нагрузки на инженеров по знаниям.

Исследованы научные и технологические проблемы, связанные с разработкой зарубежных и отечественных ИЭС, в том числе созданных на основе задачно-ориентированной методологии построения ИЭС в статических и динамических проблемных областях (автор профессор Г.В. Рыбина). Были проанализированы основные положения задачно-ориентированной методологии построения ИЭС и методы ее реализации в рамках инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, представляющего собой современное программное средство типа WorkBench, включающее взаимосвязанную совокупность средств автоматизации проектирования, разработки и сопровождения различных классов прикладных ИЭС на всех этапах жизненного цикла. Концептуальной основой методологии является многоуровневая модель процессов интеграции в ИЭС, моделирование конкретных типов задач, релевантных технологии традиционных экспертных систем (ЭС), методы и способы построения программной архитектуры ИЭС и ее компонентов на каждом уровне интеграции и т.д.

Модель архитектуры проектируемых ИЭС строится исходя из идей глубокой интеграции компонентов, причем на верхнем уровне интеграции используется подход, связанный с расширением функциональности традиционных ЭС путем включения дополнительных функций, реализуемых некоторым компонентом K (где K – это СУБД, ППП и т.д.). Средний уровень интеграции в модели архитектуры каждой конкретной ИЭС определяется спецификациям наборов функций как простой ЭС (неформализованные операции), так и функций, не свойственных ЭС (формализованные операции), что отражает состав и структуру всех компонентов ИЭС и их информационные и управляющие связи, а также место и роль неформализованных задач (НФ-задач) среди других задач. Все спецификации определяются на этапе анализа системных требований пользователя на разработку ИЭС и этапе получения знаний из различных источников знаний (при наличии НФ-задач).

В диссертации были исследованы методы построения модели архитектуры ($M_{ИЭС}$), основанные на отображении взаимосвязей реальной системы средствами структурного анализа, в результате чего $M_{ИЭС}$ конкретизируется до уровня расширенной информационно-логической модели ($M_{РИЛ}$), представляющей собой совокупность диаграмм информационных потоков и описаний их элементов в графической нотации Гейна-Сарсона, которая дополнена специальным элементом - неформализованная операция (НФ-операция), указывающим на наличие НФ-задачи, что показывает на необходимость привлечения к процессам получения знаний конкретных экспертов или источников знаний других типов (БД, ЕЯ-тексты).

Поэтому основой модели архитектуры $M_{ИЭС}$ прототипа ИЭС является расширенная информационно-логическая модель ($M_{РИЛ}$), а модель каждого прототипа ИЭС соответственно представляется семеркой вида: $PRJ = \langle PN, KB_{PRJ}, Solver, PD, M_{ИЭС}, PPIK, PCOMP \rangle$, где PN – имя проекта, KB_{PRJ} – БЗ прототипа ИЭС, $Solver$ – машина (средства) вывода прототипа ИЭС; PD – данные проекта, т.е. информация различного характера (знания, данные, отдельные параметры, тексты и т.д.), используемая интеллектуальным планировщиком как в процессе разработки прототипа ИЭС, так и для генерации готового прототипа; $M_{ИЭС}$ – модель архитектуры прототипа на основе расширенной информационно-логической модели ($M_{РИЛ}$) в виде иерархии расширенных диаграмм потоков данных (РДПД); $PPIK$ – совокупность ПИК; $PCOMP$ – совокупность различных подсистем ИЭС, разработанных как средствами комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, так и с помощью внешних приложений.

Основное внимание в диссертации было уделено исследованию модели интеллектуальной программной среды, которая в соответствии с задачей ориентированной методологией построения ИЭС представляется в виде $M_{АТ} = \langle KB, K, P, TI \rangle$, где KB – технологическая БЗ о составе проекта и типовых проектных решениях, используемых при разработке ИЭС; $K = \{K_i, i \in \mathbb{N}\}$ – множество текущих контекстов, состоящих из множества объектов из KB , редактируемых или выполняющихся на текущем шаге управления; P – специальная программа – интеллектуальный планировщик, управляющая процессами разработки и тестирования ИЭС; $TI = \{TI_i, i \in \mathbb{N}\}$ – множество инструментов TI_i , применяющихся на различных этапах разработки ИЭС.

С целью дальнейшего развития был детально исследован декларативный компонент KB модели $M_{АТ}$, выступающий в качестве информационного хранилища (технологической БЗ) в данной среде и определяемый как $KB = \langle WKB, SKB, PKB \rangle$, где WKB – это БЗ, содержащая знания о ТПП, описывающих последовательности и способы применения тех или иных средств при создании прикладных ИЭС, а также последовательности этапов создания ИЭС; SKB – это БЗ, включающая знания об использовании ТПП и ПИК ранее созданных прототипов ИЭС; PKB (опционально) – представляет собой БЗ, со-

держашую специфические знания, используемые на различных этапах создания прототипа ИЭС для решения задач, требующих нестандартного подхода.

В самом общем виде модель любой ТПП представляется как $TRP = \langle C, L, T \rangle$, где C – множество условий, при выполнении которых возможна реализация ТПП; L – сценарий выполнения, описанный на внутреннем языке описания действий ТПП; T – множество параметров, инициализируемых интеллектуальным планировщиком при включении ТПП в план разработки прототипа ИЭС.

Каждый ПИК, участвующий в разработке прототипа ИЭС, описывается в виде $PIK = \langle N, Arg, F, PINT, FN \rangle$, где N – имя компонента, под которым он зарегистрирован в комплексе АТ-ТЕХНОЛОГИЯ; $Arg = \{Arg_i, i \in \mathbb{N}\}$ – множество аргументов, содержащих поддеревья БД текущего проекта, служащие входными параметрами для выполнения функций из множества $F = \{F_i, i \in \mathbb{N}\}$ – множество методов (интерфейсов ПИК) данного компонента на уровне реализации; $PINT$ – множество наименований интерфейсов других ПИК, используемых методами данного ПИК, $FN = \{FN_i, i \in \mathbb{N}\}$ – множество наименований функций, выполняемых данным ПИК.

Важное место в работе было уделено исследованию основного процедурного (операционного) компонента модели M_{AT} – интеллектуального планировщика, который в общем виде описывается моделью $P = \langle SK, AF, Pa, Pb, I, GP \rangle$, где SK – состояние текущего контекста, при котором активизируется планировщик; $AF = \{AF_i, i \in \mathbb{N}\}$ – множество функциональных модулей AF_i , входящих в состав планировщика; Pa – процедура выбора текущей цели на основании плана разработки; Pb – процедура выбора наилучшего функционального модуля-исполнителя из списка возможных кандидатов; I – процедуры, обеспечивающие интерфейс с соответствующими компонентами комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ; GP – процедуры работы с глобальным планом разработки ИЭС.

Таким образом, в контексте реализации базовых принципов задачно-ориентированной методологии были исследованы методы построения основных компонентов ИЭС в процессе прототипирования ИЭС на основе использования базовых компонентов модели M_{AT} . Особое внимание уделено анализу механизмов планирования действий инженеров по знаниям, с целью исследования возможностей расширения функциональности и повышения роли интеллектуального планировщика и технологической БЗ в процессах прототипирования ИЭС.

В финальной части раздела 1 приводятся результаты системного анализа современного состояния исследований и разработок в области интеллектуального планирования (под которым подразумевается автоматическая генерация плана) с точки зрения методологического, формально-концептуального, интеграционного, инструментально-технологического и прикладного аспектов. Сделан вывод, что использование методов детерминированного интеллектуального планирования в пространстве состояний для планирования действий инженеров по знаниям является наиболее приемлемым как с точки зрения концептуальной совместности с постановкой задачи планирования процессов прототипирования ИЭС,

так и в части реализации интеллектуального планировщика в рамках архитектуры интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

Поставлены цели и задачи диссертации.

Во втором разделе рассматриваются теоретические аспекты, связанные с постановкой задачи интеллектуального планирования процессов прототипирования ИЭС и разработкой метода для ее решения. Анализируются классические постановки задачи планирования, представленные в общем виде. Пусть $I = \{I_i, i \in \mathbb{N}\}$ - множество всех описаний состояний рассматриваемой системы (подмножество окружающего мира). Тогда задача планирования представляется в следующем виде: $PlanTask = \langle I, E, G, A \rangle$, где $E \in I$ – полное описание начального состояния; $G \in I$ – описание (возможно, неполное) целевого состояния; $A = \{a_i, i \in \mathbb{N}\}$ - множество действий (операторов, задач), изменяющих состояние системы. Упорядоченное множество $a_1, \dots, a_n, n \in \mathbb{N}$ называется решением задачи планирования, если последовательность операций $a_n(a_{n-1}(\dots a_1(e))\dots)$ приводит в итоге к целевому состоянию G . Данное упорядоченное подмножество a_1, \dots, a_n также называется планом.

С учетом общей постановки задачи планирования приводится описание формальной постановки задачи интеллектуального планирования применительно к моделям, методам и средствам, выступающим в качестве концептуальной основы задачно-ориентированной методологии построения ИЭС и интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ. Отмечено, что основной целью данной методологии и поддерживающего ее инструментария является интеллектуализация достаточно сложных и трудоемких процессов прототипирования прикладных ИЭС различной архитектурной типологии на всех этапах жизненного цикла, начиная от системного анализа проблемной области до создания серии прототипов ИЭС. Для снижения интеллектуальной нагрузки на инженеров по знаниям, минимизации возможных ошибочных действий и временных рисков при прототипировании ИЭС предусмотрено использование технологической БЗ, содержащей значительное число ТПП и ПИК, отражающих экспертный опыт инженеров по знаниям по созданию прикладных ИЭС (статических, динамических, обучающих).

Поэтому формальная постановка задачи интеллектуального планирования процессов прототипирования ИЭС рассматривается в контексте модели процессов прототипирования ИЭС в следующем виде: $M_{proto} = \langle T, S, Pr, Val, A_{IES}, PlanTask_{IES} \rangle$, где T - множество проблемных областей, для которых создаются прикладные ИЭС; S - множество стратегий прототипирования; Pr - множество созданных и/или создаваемых прототипов ИЭС на основе задачно-ориентированной методологии; $Val : T \times S \mapsto \{0, 1\}$ - функция экспертной валидации прототипа ИЭС, определяющая необходимость и/или возможность создания последующих прототипов ИЭС для конкретной проблемной области; A_{IES} - множество всех возможных действий инженеров по знаниям в процессе прототипирования; $PlanTask_{IES} : T \times S \times Pr \mapsto P(A)$ - функция планирования действий инженеров по знаниями для получения текущего про-

тотипа ИЭС для конкретной проблемной области. В диссертации приводится детальное описание всех компонентов M_{proto} , а также конкретизация некоторых базовых компонентов модели M_{AT} .

В соответствии с поставленными целями диссертации для эффективной реализации компонента $PlanTask_{IES}$ модели M_{proto} были исследованы современные методы интеллектуального планирования в пространстве состояний. Экспериментальное программное исследование показало, что наилучшие результаты достигаются, если пространство поиска формируется за счет моделирования действий инженера по знаниям при построении фрагментов модели архитектуры ($M_{ИЭС}$) прототипа ИЭС с помощью соответствующих ТПП. Для формального описания этого процесса в диссертации предложено использовать теорию графов путем сведения к задаче покрытия модели архитектуры $M_{РИЛ}$, представленной в виде помеченного графа $G_{РИЛ}$, фрагментами ТПП в виде соответствующих подграфов.

Важную роль для реализации $PlanTask_{IES}$ играет план построения конкретного покрытия (т.е. последовательность примененных фрагментов ТПП), который может быть однозначно преобразован в план построения прототипа ИЭС. В этом случае план построения прототипа ИЭС можно представить в виде $Plan = \langle A_G, A_{atom}, R_{prec}, R_{detail}, PR \rangle$ где A_G - множество глобальных задач (декомпозируемых на подзадачи); $A_{atom} = \{atom_i, i \in \mathbb{N}\}$ - множество плановых (атомарных) задач, выполнение которых необходимо для разработки прототипа ИЭС; $R_{prec} : A_{atom} \times A_{atom} \mapsto \{0, 1\}$ - функция, определяющая отношение предшествования между плановыми задачами; $R_{detail} : A_{atom} \mapsto A_G$ - отношение, показывающее принадлежность плановой задачи к глобальной задаче; PR - представление плана, удобное для инженера по знаниям.

С помощью отношения R_{prec} и множеств A_G и A_{atom} формируются две сети задач - укрупненная и детальная. Укрупненная сеть задач, полученная с помощью R_{prec} и A_G , называется глобальным планом (отношение предшествования между элементами A_G получено на основе отношения детализации R_{detail}), а детальная сеть задач, полученная на основе R_{prec} и A_{atom} , называется детальным планом. При этом, каждая плановая задача связана с определенной функцией конкретного операционного ПИК.

Исходя из опыта разработки прикладных ИЭС, на структуру ТПП накладывается определенное ограничение - в любой ТПП содержится хотя бы один обязательный фрагмент и произвольное число опциональных фрагментов, связанных с обязательным фрагментом по крайней мере одним потоком данных. Как правило, первый элемент из множества фрагментов включает в себя НФ-операцию, поскольку НФ-операция играет основную роль в построении архитектуры текущего прототипа ИЭС.

Постановка задачи. Для описания постановки задачи $PlanTask_{IES}$ используем общую формальную постановку задачи планирования в пространстве состояний, где используется такое базовое понятие, как система помеченных переходов (Labeled Transition System) или система дискретного случая, которая пред-

ставляется в виде $\Sigma = \langle S, A, E, \gamma \rangle$, где S - множество состояний; A - множество действий; E - множество событий; $\gamma : S \times (A \cup E) \rightarrow 2^S$ - функция перехода. Требуется для системы Σ , с начальным состоянием s_0 и подмножеством целевых состояний S_g найти последовательность действий, соответствующих переходам между состояниями $\{s_0, \dots, s_k\}$ таких, что $s_1 \in \gamma(s_0, a_1), \dots, s_k \in \gamma(s_{k-1}, a_k)$ и $s_k \in S_g$.

В качестве исходных данных выступают: модель архитектуры $M_{ИЭС}$, описанная с помощью иерархии РДПД; технологическая БЗ (модель WKB), содержащая множество ТПП (модель $ТПП$) и ПИК (модель PIK). Кроме того, в диссертации были введены следующие ограничения и рабочие определения.

1. Из состава модели архитектуры $M_{ИЭС}$, построенной на этапе анализа системных требований, используется только множество элементов и множество потоков данных, представимых в виде размеченного ориентированного графа $G_{РИЛ}$, где метки определяют связь между элементами иерархии РДПД и вершинами и дугами графа. Данный граф называется обобщенной РДПД, и он может быть однозначно получен из исходной модели архитектуры $M_{ИЭС}$.

2. Фрагмент обобщенной РДПД представляет собой произвольный связанный подграф, содержащийся в $G_{РИЛ}$. Экземпляр ТПП называется совокупность $ТПП$ и фрагмента обобщенной РДПД, удовлетворяющего условиям применимости (компонент C модели $ТПП$) соответствующей ТПП. Покрытием ($Cover$) обобщенной РДПД является множество экземпляров ТПП, с взаимно непересекающимися фрагментами, содержащими все вершины $G_{РИЛ}$ (или покрывают весь $G_{РИЛ}$).

3. Грубым покрытием обобщенной РДПД называется такое покрытие РДПД, в котором все экземпляры ТПП содержат только обязательные фрагменты. Точное покрытие является расширением грубого покрытия за счет включения в покрытие опциональных фрагментов.

4. Включению каждого фрагмента ТПП в покрытие сопоставляется некоторая стоимость, определяемая экспертной оценкой на основе технологического опыта, что концептуально соответствует усредненным затратам человеческих ресурсов на реализацию соответствующего фрагмента модели архитектуры ИЭС.

Таким образом, задачу генерации плана разработки прототипа ИЭС, с учетом исходных данных и введенных ограничений, удобно представить в терминах состояний и переходов в виде модели $PlanTask_{ИЭС} = \langle S_{ИЭС}, A_{ИЭС}, \gamma, Cost, s_0, G_{ИЭС}, F_{COVER} \rangle$, где $S_{ИЭС}$ - множество состояний графа G , описывающих текущее покрытие $Cover$; $A_{ИЭС}$ - множество возможных действий над G , заключающихся в добавлении к покрытию фрагментов конкретных экземпляров ТПП (полное множество формируется в совокупности WKB и G); γ - функция перехода между состояниями; $Cost$ - функция, определяющая стоимость последовательности переходов; s_0 - начальное состояние, описывающее пустое покрытие; $G_{ИЭС}$ - функция определения принадлежности

состояния к целевому; F_{COVER} – функция генерации плана разработки ($Plan$) из покрытия ($Cover$).

Решением $PlanTask_{IES}$ является план действий инженера по знаниям (модель $Plan$), который может быть однозначно получен путем преобразования последовательности переходов, связанных с генерацией покрытия $a_1 \dots a_n$, ($a_i \in A_{IES}$, $n \in \mathbb{N}$), приводящих к целевому состоянию s_G (такого, что $G(s_G) = 1$) за минимальную среди альтернатив стоимость, определяемую элементом $Cost$. Таким образом, план должен быть оптимальным, для чего необходимо разработать допустимую эвристическую функцию.

Для решения поставленной задачи в диссертации был предложен метод, в котором могут быть условно выделены четыре этапа: получение обобщенной РДПД ($G_{РИЛ}$) из модели архитектуры $M_{ИЭС}$; генерация точного покрытия $Cover$ с помощью эвристического поиска; генерация плана действий инженера по знаниям ($Plan$) на основе полученного детального покрытия ($Cover$); генерация представления плана (PR) на основе покрытия ($Cover$). Для реализации каждого этапа были разработаны соответствующие алгоритмы.

На первом этапе для получения обобщенной РДПД ($G_{РИЛ}$) из модели архитектуры $M_{ИЭС}$ используется алгоритм рекурсивной детализации, функционирующий следующим образом. На начальном шаге инициализируется пустой граф $G_{РИЛ}$, и из $M_{ИЭС}$ выбирается диаграмма верхнего уровня и входящие в нее элементы (НФ-операции, накопители и др.), которые условно разделяются на две группы – детализируемые и недетализируемые (детализируемым элементом считается элемент РДПД, которому соответствует диаграмма более нижнего уровня). На следующем шаге для всех недетализируемых элементов в $M_{ИЭС}$ создаются вершины в $G_{РИЛ}$ с соответствующими метками, а детализируемые элементы заменяются на содержимое детализирующих РДПД более нижнего уровня. Данный шаг выполняется рекурсивно до тех пор, пока не будут обработаны все детализируемые элементы, после чего осуществляется создание дуг $G_{РИЛ}$ с соответствующими метками на основе потоков данных $M_{ИЭС}$.

На втором этапе производится генерация точного покрытия как состояния $s_G \in S_{IES}$ графа $G_{РИЛ}$ с помощью детерминированного планирования в пространстве состояний, реализуемого алгоритмом эвристического поиска, основанном на A^* . Поскольку при генерации используется «стоимость» добавления новых фрагментов к текущему покрытию (определяемая элементом $Cost$), то осуществляется оптимальное планирование.

Иллюстрация промежуточного состояния, полученного в процессе данного этапа, приводится на Рис. 1. Здесь в покрытии участвуют две разных ТПП (SDP_1 и SDP_2), при этом присутствует два экземпляра $SP1$. Элементы $Op1$, $NF1$ и $E3$ в совокупности удовлетворяют условиям применимости (компонент C модели TPP) обязательного фрагмента $SDP2$ (обведен сплошной линией), поэтому данные элементы могут быть покрыты соответствующим фрагментом при подстановке $Op1$, $NF1$ и $E3$ в параметры ТПП (компонент T модели TPP). Накопитель $S2$ удовлетворяет условиям применимости опционального фрагмента

$SDP2$, поэтому может быть добавлен к соответствующему экземпляру $SDP2$. Опциональные фрагменты на иллюстрации обведены пунктирной линией.

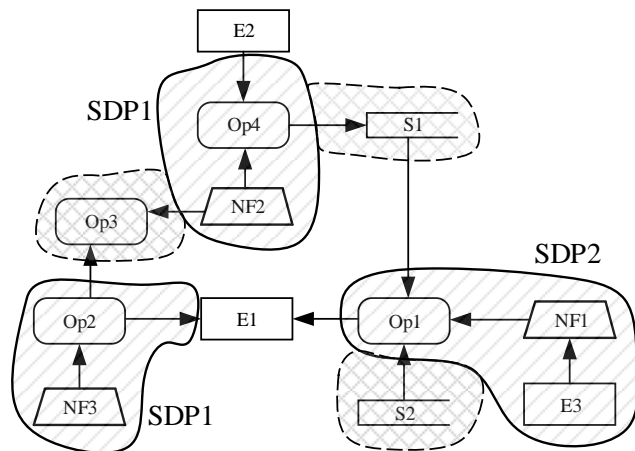


Рис. 1. Грубое и точное покрытия обобщенной РДПД

На третьем этапе на основе полученного покрытия с помощью функции F_{COVER} осуществляется генерация плановых задач и элементов модели $Plan$. Совокупность экземпляров ТПП, содержащихся в полученном покрытии, формирует множество глобальных задач из плана действий инженера по знаниям (элемент A_G модели $Plan$). В процессе детализации из каждого фрагмента (опционального или обязательного) генерируется подмножество задач, составляющих в совокупности A_{atom} , а на основе дуг обобщенной РДПД строится отношение R_{prec} (описывая тем самым сеть задач).

На финальном этапе формируется представление плана (элемент PR модели $Plan$), которое предназначено для удобства отображения плана инженеру по знаниям (по умолчанию используется иерархическое представление). Для генерации формируется двухуровневое дерево, на первом уровне которого содержатся группы, соответствующие глобальным задачам из A_G , а на втором – плановые задачи, полученные преобразованием включенных в покрытие фрагментов ТПП. Последовательность выполнения задач определяется с помощью алгоритма топологической сортировки.

В диссертации показано, что пространство поиска может быть существенно сокращено за счет разработки проблемно-ориентированной эвристической функции. Для этих целей был проведен анализ опыта прототипирования ИЭС, на основе чего были выделены следующие стандартные свойства технологической БЗ (компонент WKB): обязательный фрагмент любой ТПП содержит одну и только одну НФ-операцию; опциональные фрагменты любой ТПП не содержат НФ-операций; стоимость реализации любого фрагмента ТПП строго больше ну-

ля. Исходя из этого, обозначим с помощью C_{NF} минимальную стоимость обязательного фрагмента, а C_F - минимальную стоимость опционального фрагмента среди всех ТПП из WKB . Рассмотрим произвольное состояние s , полученное в процессе генерации покрытия ($Cover$) для обобщенной РДПД ($G_{РИЛ}$), которое требуется оценить с помощью эвристической оценки. Обозначим N - количество вершин $G_{РИЛ}$, соответствующих НФ-операциям, N_{COVER} - количество покрытых вершин, соответствующих НФ-операциям, а M_{COVER} - количество вершин, относящихся к формализованным операциям и накопителям, покрытых $Cover$. Тогда $M = G_{РИЛ} \cdot U - N$ - суммарное количество вершин обобщенной РДПД, соответствующее накопителям и формализованным операциям.

Эвристическая функция произвольного состояния s (содержащего покрытие $Cover$), оценивает минимально возможную стоимость оптимального плана до целевого состояния и вычисляется следующим образом: $h^{AT}(s) = (N - N_{COVER})C_{NF} + (1 - \frac{M_{COVER}}{M})C_F$. В диссертации приводится пример вычисления значения данной эвристической функции и доказательство допустимости предложенной функции.

В третьем разделе описаны особенности проектирования и программной реализации интеллектуального планировщика, а также отдельных компонентов интеллектуальной программной среды. Приводится подробное описание состава и структуры разработанных программных средств интеллектуальной программной среды, включающей ядро, подсистему пользовательского интерфейса и библиотеку расширений, реализующую взаимодействие с операционными ПИК. Подсистема пользовательского интерфейса обладает удобным графическим интерфейсом, на основе которого обеспечивается взаимодействие ПИК с инженером по знаниям с помощью экранных форм. Технологическая БЗ условно подразделяется на библиотеку расширений, хранящую операционные знания в виде плагинов, реализующих соответствующие операционные ПИК, и на декларативную часть. В ядре реализуется вся основная функциональность автоматизированной поддержки разработки прототипов ИЭС, управление файлами проекта, управление расширениями и др.

Основное внимание уделено интеллектуальному планировщику (Рис.2), являющемуся частью ядра и реализующему функциональность, связанную с планированием процессов прототипирования ИЭС. С помощью препроцессора иерархии РДПД производится предобработка иерархии РДПД за счет ее преобразования в одну обобщенную диаграмму максимальной детализации. Задача покрытия детализированной РДПД имеющимися ТПП реализуется с помощью генератора глобального плана, который на основе технологической БЗ и построенной обобщенной РДПД обеспечивает выполнение задачи, используя описанный выше метод, в результате чего строится точное покрытие, преобразуемое в дальнейшем в глобальный план разработки. Генератором детального плана на основе полученного покрытия РДПД и технологической БЗ осуществляется детализация каждого элемента покрытия, формируя тем самым предварительный детальный план. Затем на основе анализа доступных ПИК и их версий (данные о

которых запрашиваются у компонента управления процессом разработки), компонентом интерпретации плана формируется детальный план, где каждая задача связана с конкретным ПИК и может быть выполнена инженером по знаниям. С помощью компонента построения конечного плана производится формирование необходимого представления плана для его использования другими компонентами интеллектуальной программной среды (компонент визуализации плана и др.).



Рис. 2. Архитектура, состав и структура интеллектуального планировщика

Для оценки эффективности функционирования интеллектуального планировщика был проведен сравнительный анализ ядра интеллектуального планировщика с зарубежными планировщиками (результаты сравнения опубликованы, а также приводятся в четвертом разделе и **Приложении** к диссертации). Сравнение осуществлялось на основе решения следующих классические задач: Ханойские башни, Пятнашки, Кубик Рубика и планирование в PDDL-формализме. В качестве критериев сравнения были выбраны: скорость генерации состояний; оптимальность плана; количество потребляемых ресурсов; количество просмотренных состояний.

Подробное описание программной реализации компонентов интеллектуальной программной среды приведено в тексте диссертации. Реализация выполнялась на языке C++11. Использованы среда разработки Visual Studio 2012, 2013, 2015 и Qt Creator. Графический интерфейс основан на фреймворке Qt 5.7. Приблизительный объем реализации насчитывает суммарно около 30 тысяч строк ко-

да. При выполнении реализации программного обеспечения использованы следующие сторонние библиотеки: QT (графический интерфейс); STL (базовые контейнеры и алгоритмы), libxml (для файлового слоя хранения документов), libiconv (для работы с кодировками и поддержкой русского языка). Ниже в Таблице 1 представлены технические характеристики разработанного программного обеспечения. Для реализации ядра интеллектуального планировщика разработана специализированная высокопроизводительная программная библиотека на языке C++, позволяющая осуществлять эвристический поиск в заданном пространстве состояний. В библиотеке вместо использования виртуальных вызовов во время выполнения применяется механизм шаблонов, который позволяет выполнить необходимую оптимизацию на этапе компиляции. Для решения проблемы ограниченной оперативной памяти при больших пространствах поиска используется дополнительный слой виртуализации оперативной и внешней памяти с помощью специальных структур данных, описанных во втором разделе диссертации. Расширяемая функциональность реализована за счет механизма динамически подгружаемых библиотек (операционных ПИК), при этом инициализация доступных модулей выполняется на этапе времени выполнения. Подгружаемые библиотеки имеют унифицированный программный интерфейс (инструкция разработчика для создания новых ПИК приводится в **Приложении**).

Таблица 1. Объем исходного кода разработанных программных средств

Название компонента	Кол-во классов	Объем кода, тыс. строк
Интеллектуальный планировщик	12	12
Опциональные плагины	7	4
Пользовательский интерфейс	8	5
Менеджер проектов	4	1.5
Компонент управления	5	2
Редактор диаграмм	6	3.5
Компилятор/линковщик	2	2

В диссертации была разработана новая технология использования интеллектуальной программной среды для построения прототипов прикладных ИЭС (Рис.3), в которой существенная роль отводится интеллектуальному планировщику, с помощью которого минимизируются риски ошибочных действий инженеров по знаниям, сокращаются стоимостно-временные показатели разработки на каждом этапе жизненного цикла и т.д.

В целом, на основе данных, полученных в результате совместного тестирования интеллектуального планировщика и других базовых компонентов интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ, был сделан вывод, что все разработанные средства могут достаточно эффективно использоваться в

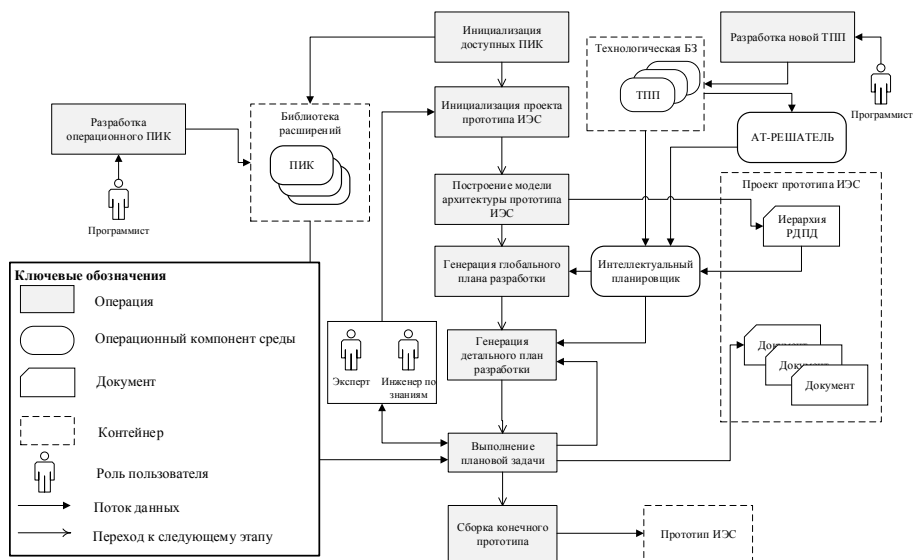


Рис. 3. Технология разработки ИЭС с помощью интеллектуальной программной среды

процессе прототипирования статических, динамических и обучающих прикладных ИЭС. Разработанные программные средства были интегрированы в состав комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

Четвертый раздел посвящен экспериментальному исследованию и апробации разработанных инструментальных программных средств и реализации технологии применения этих средств для создания прикладных ИЭС различных классов, что осуществлялось путем разработки нескольких прототипов прикладных ИЭС (получено два акта об использовании результатов диссертации): прототип динамической ИЭС для управления медицинскими силами и средствами при крупных дорожно-транспортных происшествиях; прототип динамической ИЭС для управления ресурсами спутниковой сети; прототип статической ИЭС для диагностики заготовок для электронно-лучевой литографии. На основе разработанных программных средств выполнена реализация модуля подсистемы обработки бизнес-информации системы Lement Pro, на примере которой показано, что ядро интеллектуального планировщика является достаточно универсальным и может быть использовано в широком классе проблемных областей, связанных с планированием (подтверждено актом об использовании).

Представлены также результаты сравнения ядра интеллектуального планировщика с несколькими зарубежными планировщиками на основе перечисленных выше критериев. Сделан вывод, что разработанные программные средства планировщика обладают целым рядом функциональных и технологических преимуществ по сравнению с зарубежными планировщиками. Технология приме-

нения разработанных средств интеллектуальной программной среды описана на «сквозном» примере построения прототипа динамической ИЭС для управления медицинскими силами и средствами при крупных дорожно-транспортных происшествиях, разработанного с помощью интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ. Данный прототип используется в исследованиях и разработках, проводимых Всероссийским Центром Медицины Катастроф «Защита» (акт об использовании).

В **Приложении** к диссертации вынесены подробные результаты сравнительного анализа и экспериментов с ядром интеллектуального планировщика, а также в отдельном томе представлены: описание разработанных классов реализации компонентов интеллектуальной программной среды; инструкция разработчика для разработки новых ПИК для интеллектуальной программной среды; инструкция разработчика по настройке ядра интеллектуального планировщика на конкретную проблемную область на примере классической игры в Пятнашки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен эволюционный анализ опыта исследований и разработок в области автоматизации построения ИЭС различных классов (статические, динамические, обучающие) на основе использования задачно-ориентированной методологии и поддерживающего инструментария – комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ. В контексте задачно-ориентированной методологии построения ИЭС исследована предложенная профессором Г.В. Рыбиной модель интеллектуальной программной среды и средства ее реализации, на основе чего поставлена задача разработки новых подходов к реализации базовых компонентов - интеллектуального планировщика и технологической БЗ для повышения степени интеллектуализации процессов проектирования и разработки программного обеспечения ИЭС.

2. Проведен онтологический анализ современных исследований в области методов, алгоритмов и программных средств интеллектуального планирования и осуществлен выбор планирования в пространстве состояний как наиболее эффективного метода для решения задачи планирования действий инженера по знаниям в процессе разработки ИЭС.

3. Предложен оригинальный метод генерации планов построения прототипов ИЭС и алгоритмы его реализации, позволяющие на основе модели архитектуры ИЭС и набора ТПП из технологической БЗ осуществлять построение планов разработки прототипов ИЭС.

4. Разработаны алгоритмы для поддержки функционирования новой версии интеллектуального планировщика, основанные на детерминированном планировании в пространстве состояний и расширяющие классический эвристический поиск за счет учета специфики проблемной области.

5. Выполнена программная реализация интеллектуального планировщика, его окружения и отладочных средств для интеллектуальной программной среды комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ.

6. С целью развития базовых компонентов интеллектуальной программной среды усовершенствована и экспериментально исследована технологическая БЗ, включающая ТПП и ПИК, связанные с процессами разработки статических и динамических ИЭС.

7. Осуществлено экспериментальное программное исследование интеллектуального планировщика и технологической БЗ путем разработки трех прототипов статических и динамических ИЭС, а также использования в учебном процессе НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, представленные в базе цитирования SCOPUS

1. Rybina G. V., Blokhin Y. M. Distributed knowledge acquisition control with use of the intelligent program environment of the at-technology workbench // Communications in Computer and Information Science. 2014. P. 150–159.

2. Rybina G., Blokhin Y. Methods and means of intellectual planning: Implementation of the management of process control in the construction of an integrated expert system // Scientific and Technical Information Processing. 2015. Vol. 42. № 6. P. 432–447.

3. Rybina G., Blokhin Y. Automated planning: Usage for integrated expert systems construction // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. Vol. 449. P. 169–177.

4. Rybina G., Rybin V., Blokhin Y., Parondzhanov S. Intelligent programm support for dynamic integrated expert systems construction // Procedia Computer Science. 2016. Vol. 88. P. 205–210.

5. Rybina G., Rybin V., Blokhin Y., Sergienko E. Intelligent technology for integrated expert systems construction // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. Vol. 451. P. 187–197.

6. Rybina G. V., Blokhin Y. M. Use of intelligent planning for integrated expert systems development // 8th IEEE International Conference on Intelligent Systems, IS 2016, Sofia, Bulgaria, September 4-6, 2016. — 2016. P. 295–300.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и проиндексированных в РИНЦ

1. Рыбина Г. В., Блохин Ю. М., Иващенко М. Г. Интеллектуальная технология построения интегрированных экспертных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 3. С. 48–57.

2. Рыбина Г. В., Блохин Ю. М., Гохберг Г. С., Рудый А. С. Интегрированная экспертная система диагностики качества заготовок для электронно-лучевой литографии // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 9. № 8. С. 21–26.

3. Рыбина Г. В., Мозгачев А. В., Шанцер Д. И., 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., Блохин Ю. М., Иващенко М. Г. Некоторые аспекты интеллектуальной технологии построения обучающих интегрированных экспертных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 4. С. 27–36.
5. Rybina G. V., Blokhin Y. M., Danyakin I. D. Models, methods and tools for intelligent program environment for integrated expert systems construction // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2014. Т. 12. № 8. С. 4–16.
6. Рыбина Г. В., Блохин Ю. М., Даниякин И. Д. Интеллектуальная технология построения интегрированных экспертных систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. № 1. С. 3–19.
7. Рыбина Г. В., Блохин Ю. М. Методы и средства интеллектуального планирования: применение для управления процессами построения интегрированных экспертных систем // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. № 1. С. 75–93.
8. Блохин Ю. М., Шахраманьян А. М., Мозжухин Д. А. Применение интеллектуального планировщика комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ для обработки бизнес-информации в системе Lement Pro // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14. № 8. С. 19–25.
9. Рыбина Г. В., Рыбин В. М., Блохин Ю. М. и др. Интеллектуальная технология построения динамических интегрированных экспертных систем на основе задачно-ориентированной методологии: некоторые теоретико-методологические аспекты // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 25–35.
10. Блохин Ю. М. Поиск в пространстве состояний с комбинированным использованием внешней памяти для интеллектуального планирования // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 7. С. 16–28.

Основные публикации в прочих изданиях

1. Rybina G. V., Rybin V. M., Blokhin Y. M., Sergienko E. S. Use of AT-TECHNOLOGY workbench for construction of tutoring integrated expert systems // International Journal "Information Theories and Applications". 2017. Vol. 24. № 2. P. 141–149.
2. Рыбина Г. В., Блохин Ю. М. Некоторые аспекты управления процессами построения интегрированных экспертных систем на основе интеллектуального планирования // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014: Труды конференции. Том 2. — Казань : Изд-во РИЦ Школа. 2014. С. 122–130.

3. Рыбина Г. В., Блохин Ю. М. Некоторые аспекты интеллектуальной технологии построения динамических интегрированных экспертных систем средствами комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2016. Труды конференции. В 3-х томах. Том 2. — Смоленск : Универсум. 2016. С. 194–202.

4. Rybina G. V., Blokhin Y. M. Intelligent software environment for integrated expert systems development // Proceedings of the 2016 International conference on artificial intelligence ICAI'2016. — USA : CSREA Press. 2016. P. 230–236.

5. Рыбина Г. В., Блохин Ю. М. Методы интеллектуального планирования и особенности их применения для автоматизации процессов разработки интегрированных экспертных систем // Седьмая Международная конференция "Системный анализ и информационные технологии" САИТ-2017: Труды конференции. — М. : ФИЦ ИУ РАН. 2017. С. 317–323.