

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Бугайченко Дмитрий Юрьевич

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ
ФОРМАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОЙ
СПЕЦИФИКАЦИИ
САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ
МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ С
ВРЕМЕННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

05.13.11 — Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2007

Работа выполнена на кафедре информатики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент Соловьев Игорь Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Баранов Сергей Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, Кознов Дмитрий Владимирович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 2007 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д212.232.51 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Б. К. Мартыненко

Б. К. Мартыненко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одной из основных особенностей многих современных информационных систем является то, что они не предназначены для самостоятельного принятия решений. Предположительно, все возможные варианты поведения таких систем должны быть спроектированы человеком и заложены в них на этапе разработки. Попадание подобной системы в условия, не учтенные ее разработчиками, может приводить к аварийному завершению или более тяжелым последствиям. Одним из подходов, направленных на решение этой проблемы, является применение агентно-ориентированного метода проектирования и разработки. Отличительным свойством концепции *агента* (программного агента) является наличие внешней среды, с которой агент способен взаимодействовать, но не обладает возможностью ее контролировать и поэтому всегда должен быть готов к тому, что предпринятые им действия не приведут к желаемым результатам. Это свойство делает концепцию агента привлекательным инструментом для решения многих задач, в том числе, для создания систем управления сложными устройствами и комплексами.

Для современных информационных систем все чаще встает требование способности к оптимизации поведения в условиях изменяющейся внешней среды, а также способности к накоплению и анализу опыта, что, в определенной степени, входит в конфликт с жесткими ограничениями на время реакции и вычислительную мощность оборудования. Кроме того, для подобных систем особенно остро стоит вопрос корректности их поведения.

Частично проблему корректности помогает решить тщательное и обширное тестирование, но оно обладает тем же недостатком — поведение системы обычно проверяется только в тех условиях, которые запланированы человеком. В случае действительно сложных систем полное тестирование, проверяющее все возможные комбинации условий, как правило, невозможно за разумное время.

Представляется, что решение данной проблемы следует искать на пути применения методов *формальной* спецификации проектируемой системы с последующим *автоматическим* тестированием или *верификацией* (обычно это проверка модели или *model checking*).

Основу большинства методов формальной спецификации составляет некоторый вариант *темпоральной логики*. Наиболее широкое распространение получила логика ветвящегося времени *CTL* [16], основным достоинством которой является билинейная относительно размера спецификации и размера модели системы сложность задачи верификации. *CTL* расширяет классическую логику высказываний темпоральными

операторами “в следующий момент ϕ ” $\bigcirc\phi$ и “когда-нибудь ϕ , а до тех пор ψ ” $\psi \mathcal{U} \phi$ и кванторами “на любом пути ...” \mathbf{A} и “существует путь на котором ...” \mathbf{E} .

Для спецификации систем с временными ограничениями предложены различные расширения логики CTL . Например, логика $RTCTL$ [22] расширяет CTL ограниченным оператором $\psi \mathcal{U}_{\leq t} \phi$, интерпретируемым как “не более чем через t шагов ϕ , а до тех пор ψ ”. Основным достоинством $RTCTL$ является сохранение билинейной сложности задачи верификации. Большей выразительной мощности, за счет увеличения вычислительной сложности, можно достичь введя переменные часов (x, y, \dots) и квантор фиксации (\cdot) [12]: $x \cdot \mathbf{A} \psi \mathcal{U} ((x \leq t) \wedge \phi)$.

Основным ограничением CTL является отсутствие явных средств спецификации систем, состоящих из нескольких взаимодействующих сущностей. Это ограничение преодолевается в логике альтернированного времени ATL [13], позволяющей учитывать многокомпонентность системы в явном виде. ATL включает конечное множество игроков-агентов P и заменяет кванторы CTL на квантор “для коалиция игроков $C \subseteq P$ существует такая стратегия, что на любом пути ...” $\langle\langle C \rangle\rangle$. Для ATL также были предложены методы спецификации ограничений на время реакции, например, с помощью подстрочного индекса [19] или с помощью переменных часов [18].

Характерной чертой многих методов формальной верификации является комбинаторный взрыв пространства состояний верифицируемых систем. Частично эту проблему позволяют решить так называемые *символические* (symbolic) алгоритмы, которые оперируют с множествами состояний, а не с отдельными состояниями. Серьезный толчок к развитию символических алгоритмов дало введение ориентированных булевых разрешающих диаграмм ($OBDD$) [14], позволяющих относительно компактно представлять большие множества и эффективно выполнять над ними операции. Было предложено множество различных модификаций концепции $OBDD$, среди которых можно выделить алгебраические разрешающие диаграммы (ADD) [11].

Для уменьшения времени реакции системы широко используется подход *исполняемых планов* [17]. В этом случае до начала непосредственного взаимодействия с внешней средой система составляет план действий для достижения своих целей. Существует множество различных алгоритмов планирования, используемых для мультиагентных систем, часть из которых базируется на классических алгоритмах поиска пути в графе A^* [20]. Однако подобные алгоритмы также подвержены проблеме комбинаторного взрыва пространства состояний, частично решить которую позволяют алгоритмы *символического планирования* [15].

Описанные выше алгоритмы позволяют строить планы для дости-

жения относительно простых целей, например, достижение системой определенного состояния при посещении только допустимых состояний. В работе [21] были предложены алгоритмы для решения более сложной задачи — построения плана, удовлетворяющего спецификации, описанной с помощью логики линейного времени¹. Подобный подход получил название “планирование с темпорально расширенными целями”.

Другой задачей, возникающей при разработке самонастраивающихся мультиагентных систем, является реализация методов накопления и анализа опыта. Набор методов, предложенных для решения этой задачи очень широк, активно развивается по сей день и включает самые разнообразные методы — от нейронных сетей до сложных баз знаний.

Из вышесказанного следует, что разработка и реализация методов формально-логической спецификации мультиагентных систем с ограничениями на время реакции, а также реализация алгоритмов планирования и накопления опыта для таких систем, является весьма актуальной задачей.

Цели работы. Основными целями работы является разработка и экспериментальная реализация методов формально-логической спецификации мультиагентных систем с ограничениями на время реакции, соответствующих алгоритмов верификации и планирования с темпорально расширенными целями, а также методов накопления и анализа опыта для оптимизации поведения системы. Для решения поставленной задачи необходимо было разработать ряд методов и реализовать ряд алгоритмов.

- Метод формально-логической спецификации мультиагентных систем с временными ограничениями. Далее соответствующий формализм именуется *MASL*.
- Алгоритм верификации систем по спецификации *MASL*.
- Алгоритм построения мультиагентных планов с темпорально расширенными целями, выраженными в ограниченном варианте логики *MASL*, обеспечивающем эффективную реализацию.
- Метод накопления и анализа опыта для мультиагентных систем.

Методы исследования. В диссертации используются теория и методы современной математической логики, включая модальные и темпо-

¹Синтаксис логики линейного времени *LTL* включает те же темпоральные операторы, что и логика ветвящегося времени *CTL*, но не включает кванторов путей, так как семантика *LTL* предполагает только один возможный вариант будущего.

ральные логики, методы формально-логической спецификации, а также метод символических алгоритмов, основанных на представлении множеств с помощью разрешающих диаграмм.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в следующем.

- Предложена новая математическая модель интеллектуального агента, позволяющая описывать такие аспекты деятельности агента как неполнота информации, планирование, накопление опыта, управляемое целями поведение и взаимодействие с другими агентами.
- Разработан новый логический формализм *MASL*, позволяющий в удобном виде описывать свойства коалиций агентов и обладающий рядом преимуществ по сравнению с существующими формализмами.
- Разработаны новые алгоритмы построения планов в ограничениях *MASL*, позволяющие строить планы для случая нескольких потенциально конкурирующих агентов в условиях недетерминированного взаимодействия с внешней средой.
- Предложены новые методы накопления и анализа опыта агентов, использующие символическое представление опыта в виде разрешающих диаграмм.

Практическая и теоретическая ценность. Предложенный в работе комплекс методов может быть использован для формальной спецификации, верификации и автоматического тестирования мультиагентных систем, а также для проектирования и реализации агентов, способных к планированию действий и к накоплению и анализу опыта. Кроме того, предложенные методы могут быть использованы при обучении методам проектирования мультиагентных систем.

Наиболее перспективным представляется применение предложенных методов для разработки систем управления устройствами и комплексами, соответствующими требованиям разработанной модели, в условиях наличия у системы времени на предварительное планирование действий. К этому классу можно отнести, например, следующие системы:

- системы автоматического перемещения грузов;
- автономные исследовательские зонды;

- системы управления автоматизированным производством;
- системы автоматического поиска предметов и обхода территории.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях и семинарах.

1. Конференция Технологии Microsoft в теории и практике, Россия, Санкт-Петербург, 2004
2. Конференция Технологии Microsoft в теории и практике, Россия, Санкт-Петербург, 2006.
3. Международная конференция Процессы управления и устойчивость, Россия, Санкт-Петербург, 2006.
4. Международной конференция Современные проблемы информатизации, Россия, Воронеж, 2006.
5. Международная конференция Процессы управления и устойчивость, Россия, Санкт-Петербург, 2007.
6. Семинар Санкт-Петербургской ассоциации искусственного интеллекта, Россия, Санкт-Петербург, 2007.
7. Семинар Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, 2007.
8. The 5th International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems, Germany, Leipzig, 2007.
9. Семинар кафедры информатики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, Россия, Санкт-Петербург, 2007.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 8-ми глав, включая введение, заключение и приложение, а также списка литературы из 187 наименований. Объем основной части работы — 172 страницы, полный объем работы — 260 страниц.

Содержание работы

Во введении приводится обзор структуры работы, обзор предметной области и основных результатов, полученных в этой области другими

исследователями, а также формулируются основные цели поставленной работы и мотивации, которыми эти цели обусловлены. Кроме того, во введении описана эволюция методов реализации интеллектуальных агентов и приведен обзор современных подходов к этой задаче.

Глава 1 начинается с введения основных понятий и рассмотрения основных свойств, присущих *интеллектуальному агенту*. В главе 2 описана модель интеллектуального агента, представленного как набор $ag = (S, A, env, see, I_B, bel, brf, I_D, des, drf, plan, prf)$, где

- S есть непустое конечное множество состояний внешней среды;
- A есть непустое конечное множество действий агента;
- $env : S \times A \rightarrow 2^S$ есть функция *поведения* внешней среды, сопоставляющая текущему состоянию внешней среды и выбранному агентом действию *множество* возможных следующих состояний внешней среды. Таким образом, действия агента могут влиять на окружающую среду, но не контролировать ее полностью;
- $see \subseteq S \times S$ есть корректное восприятие агентом состояний внешней среды, задающее множество P классов эквивалентности на S ;
- $I_B = I_{bel} \times 2^{P \times A \times P}$ есть множество *представлений* агента;
- $bel \in I_B$ есть множество текущих представлений агента;
- $brf : I_B \times A \times P \rightarrow I_B$ есть *функция обновления представлений*;
- $I_D = I_{des} \times 2^{Goal}$ есть множество *желаний* агента, где $Goal$ есть множество всех возможных функций-критериев;
- $des \in I_D$ есть множество текущих желаний агента;
- $drf : I_D \times P \rightarrow I_D$ есть *функция обновления желаний*;
- $plan = (P, A, I_{pln}, \sigma_{pln}, i_{pln,0})$ есть текущий план агента, представленный конечным автоматом с входным алфавитом P , выходным алфавитом A , множеством состояний I_{pln} , отношением переходов σ_{pln} и начальным состоянием $i_{pln,0}$;
- $prf : I_B \times I_D \times 2^{Plan} \times P \rightarrow 2^{Plan}$ есть *функция обновления плана*, где $Plan$ есть множество всех возможных планов.

В главе 3 модель интеллектуального агента расширяется до модели *мультиагентной системы*, представленной множеством агентов, расширенных способностями получения и отправки сигналов для синхронизации действий, а также восприятием действий других агентов.

Ключевым понятием, введенным в главе 3, является понятие *коалиции* как набора совместно действующих агентов. Формально коалиция моделируется как единый агент, возможные действия, представления, желания и намерения которого являются объединение соответствующих характеристик входящих в коалицию агентов. Полученные в главах 2 и 3 результаты были опубликованы в работах [5, 6, 7, 2].

В главе 4 вводится формальная логика спецификации свойств интеллектуального агента, объединяющая возможности пропозициональной динамической логики *PDL* и логики ветвящегося времени *RTCTL* и расширенная следующими дополнительными операторами.

- **Bel** ϕ — оператор, используемый для описания представлений агента. Семантика этого оператора задается с помощью возможных миров, определяемых восприятием агента $see \subseteq S \times S$ и представлениями агента $bel \subseteq P \times A \times P$.
- **Des** ϕ — оператор, используемый для описания желаний агента. Семантика этого оператора задается относительно структуры желаний агента des .
- **Intend** ϕ — оператор, используемый для описаний намерений агента. Семантика этого оператора задается с помощью возможных миров, определяемых восприятием see , представлениями bel и планом $plan$ агента.

Для данной логики определяется два варианта семантики: с динамическим и со статическим ментальным состоянием. В первом случае предполагается, что представления, желания и намерения агента могут измениться в любой момент времени, что должно учитываться при построении множества возможных путей. Этот вид семантики является наиболее общим, но сопряжен с высокой вычислительной сложностью верификации. Во втором случае предполагается, что представления, желания и намерения агента не изменяются, что верно для ограниченных промежутков времени, совпадающих с реализацией определенного плана. Доказано, что для семантики со статическим ментальным состоянием задача верификации является полиномиальной, кроме того, именно семантика со статическим ментальным состоянием является более удобной для формулирования темпорально расширенных целей.

В главе 5 предлагаются символические алгоритмы верификации для логики спецификации интеллектуального агента, а также способы символического представления модели интеллектуального агента с использованием разрешающих диаграмм. Доказаны корректность и полнота этих алгоритмов, а также то, что их алгоритмическая сложность не превосходит полинома от длины формулы и размера модели.

В главе 6 работы предлагается формальная логика *MASL*, предназначенная для описания свойств мультиагентной системы с временными ограничениями способной к накоплению и анализу опыта. Логика *MASL* расширяет логику спецификации интеллектуального агента для случая мультиагентной системы. В этой логике вводится *квантор коалиции* $\langle\langle A \rangle\rangle\phi$, указывающий на то, что интерпретацию формулы ϕ следует проводить относительно формальной модели коалиции A как единого агента. Полученные в главах 4, 5 и 6 результаты были опубликованы в работах [8, 3, 9, 1, 10]. Рассмотрим несколько примеров описания свойств мультиагентной системы.

- $\langle\langle A \rangle\rangle\mathbf{A} G \phi$ — коалиция A ведет себя таким образом, что на любом пути всегда выполнено свойство ϕ . Такие свойства называют свойствами *безопасности*.
- $\psi \Rightarrow \mathbf{A} \bigcirc (\phi \Rightarrow \langle\langle B \rangle\rangle \text{Bel} (\psi \Rightarrow \mathbf{E} \bigcirc \phi))$ — если из состояния, удовлетворяющего ψ , система перейдет в состояние, удовлетворяющее ϕ , то коалиция B будет знать, что такой переход возможен.
- $\langle\langle A \rangle\rangle\mathbf{A} G (\text{Des } \phi \Rightarrow \mathbf{A} \mathcal{F}_{\leq 10} \psi)$ — коалиция A ведет себя таким образом, что на любом пути всегда при возникновении у нее желания реализовать ϕ не более чем через 10 тактов ϕ будет реализовано. Такие свойства называют свойствами *живучести*.
- $\langle\langle A \rangle\rangle \text{Des } \phi \wedge \text{Bel } \mathbf{E} \mathcal{F} \phi \Rightarrow \text{Intend } \phi$ — если коалиция A хочет реализовать свойство ϕ и считает, что существует путь, на котором оно может быть реализовано, то она будет пытаться реализовать это свойство.
- $\mathbf{A} G (\mathbf{A} \mathcal{F}_{\leq 16} \phi) \wedge (\mathbf{A} \mathcal{F}_{\leq 16} \neg \phi)$ — система в целом ведет себя таким образом, что свойства ϕ и $\neg \phi$ чередуются с периодом не более 16 тактов.
- $\langle\langle C \rangle\rangle \text{Intend } \phi \Rightarrow \mathbf{A} \mathcal{F} \phi$ — если коалиция C решила реализовать свойство ϕ , то она этого когда-нибудь добьется.

В главе 7 предлагаются символические алгоритмы мультиагентного планирования в ограничениях *MASL*. Входными данными для алгоритма планирование являются описание модели мультиагентной системы и набор формул *MASL*. Результатом алгоритма является план, представленный моделью взаимодействующих конечных автоматов²,

²Модель взаимодействующих конечных автоматов является одним из возможных расширений модели конечных автоматов. Для взаимодействующего конечного автомата, помимо входного и выходного алфавита, определены множества входящих и исходящих сигналов, а также каналы связи, перенаправляющие исходящие сигналы одного автомата во входящие сигналы другого автомата.

следуя которому система будет удовлетворять требуемым свойствам. Построение плана производится в четыре этапа: предварительная обработка формулы, построение множества состояний автомата, построение общего плана, выделение планов для отдельных агентов из общего плана.

Наиболее интересным является этап построения общего плана, на котором изначальный план, не накладывающий никаких ограничения на действия агента, постепенно уточняется для каждой из подформул формулы–цели через исключение действий, опровергающих эту подформулу. Для уточнения плана используется техника аналогичная технике символической верификации через поиск неподвижной точки. При этом, в отличие от алгоритмов верификации, после построения плана для формулы в целом производится уточнение плана для подформул с учетом ограничений, накладываемых общим планом. Благодаря тому, что план может уточняться параллельно для нескольких формул, возможна распределенная реализация планирующего алгоритма. Доказаны корректность и завершаемость предложенных алгоритмов, кроме того, доказано, что их алгоритмическая сложность не превосходит полинома от размера модели и экспоненты от длины формулы. Полученные в главе 7 результаты были опубликованы в работе [4].

В главе 8 предлагается новый подход к решению задачи накопления опыта системой, использующий символическое представление данных в виде разрешающих диаграмм. Опыт агента представляются в виде функции $res : S \times ACS \times S \rightarrow \mathbb{N}$ (где ACS есть декартово произведение множеств действий всех агентов системы, а \mathbb{N} есть множество натуральных чисел), представленной с помощью разрешающих диаграмм. Результат функция res в точке $(s, a, s') \in S \times ACS \times S$ описывает сколько раз результатом выполнения системой в состоянии $s \in S$ действия $a \in ACS$ являлось состояние $s' \in S$.

Для предложенного представления опыта описаны такие операции как добавления факта, интеграции опыта нескольких агентов, а также получение описания представлений агента $bel \subseteq S \times ACS \times S$, построенного с использованием порога отсеечения $\theta \in [0, 1]$ следующим образом: $bel = \{(s, a, s') \in S \times ACS \times S \mid res(s, a, s') \geq \theta \cdot \max_{s' \in S} res(s, a, s')\}$.

Кроме того, предложен ряд методов анализа опыта, оптимизации представления и построения обобщений: проекция редукции разрешающей диаграммы bel на исходную разрешающую диаграмму res , расширенная редукция схожих относительно некоторого критерия ситуаций, а также объединение малознакомых схожих ситуаций.

В заключении работы приведен список основных результатов и обзор потенциальной области применения предложенных методов. Приложение А к работе содержит доказательства полноты и корректности

разработанных алгоритмов, а также анализ их алгоритмической сложности.

Приложение Б содержит описание реализации алгоритмов планирования и верификации, их архитектуре, формате входных файлов, а также тестов, использовавшихся для проверки их работоспособности. Алгоритмы верификации и планирования реализованы в виде консольных приложения. В качестве способа описания моделей системы и их свойств используется диалект XML, заданный с помощью XSD-схемы, используемой для автоматической проверки корректности входных файлов. Для преобразования входных файлов в дерево объектов используется платформа .NET 2.0 и язык программирования C#. На основе полученного дерева строится дерево объектов C++, которые используются для проведения основных вычислений. Использование гибридного C#/C++ решения позволяет использовать богатый набор классов .NET Framework для анализа и разбора XML, не потеряв при этом в производительности основного алгоритма. В качестве пакета разрешающих диаграмм используется пакет университета Колорадо CUDD, портированный под операционную систему Windows с использованием набора библиотек и компиляторов MinGW. Все использованные в разработке программы, библиотеки и пакеты свободно распространяются для научных целей и некоммерческого использования.

Основные результаты. В рамках диссертации получены следующие результаты.

1. Разработана математическая модель интеллектуального агента, описывающая такие аспекты деятельности агента, как взаимодействие с внешней средой, неполнота информации, способность к анализу и накоплению опыта, ограничения на время реакции, управляемое целями поведение и планирование действий.
2. Разработана математическая модель мультиагентной системы, включающая такие аспекты деятельности сообщества интеллектуальных агентов, как коммуникация, координация и кооперация агентов.
3. Разработан логический формализм для спецификации свойств интеллектуального агента, позволяющий описывать свойства математической модели интеллектуального агента.
4. Разработан логический формализм для спецификации мультиагентной системы с временными ограничениями MASL, включающий логику спецификации интеллектуального агента и расширяющий её средствами описания свойств определенных групп агентов (коалиций).

5. Разработаны и реализованы алгоритмы верификации (“проверки модели”, model checking) систем по спецификациям *MASL*, имеющие полиномиальную сложность и использующие технику символической верификации. Корректность, завершаемость и полнота алгоритмов доказаны, кроме того, доказано, что их алгоритмическая сложность не превосходит полинома от размера модели и длины формулы.
6. Разработаны и реализованы алгоритмы построения мультиагентных планов, удовлетворяющих спецификации *MASL* и использующие технику символического планирования. Корректность и завершаемость алгоритмов доказаны, кроме того, доказано, что их алгоритмическая сложность не превосходит полинома от размера модели и экспоненты от длины формулы.
7. Предложены методы накопления и анализа опыта в символической форме с помощью разрешающих диаграмм, позволяющих в относительно компактной форме хранить весь опыт системы и быстро преобразовывать этот опыт в структуры, удобные для символических алгоритмов построения планов и верификации.

Работы автора по теме диссертации

- [1] *Бугайченко, Д. Ю.* Верификация распределенных систем реального времени по спецификации *MASL*. // *Вестник СПбГУ*, Серия 1, — 2007. — №3, Июль. С 65—74.
- [2] *Бугайченко, Д. Ю.* Математическая модель интеллектуального агента. // Сборник трудов международной конференции «Процессы управления и устойчивость». — Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ, 2006. С. 9—19.
- [3] *Бугайченко, Д. Ю.* Математическая модель и спецификация интеллектуальных агентных систем. // *Системное программирование*. — 2006. — №2. С. 94—115.
- [4] *Бугайченко, Д. Ю.* Символическое планирование в ограничениях *CTL*. // Сборник трудов международной конференции «Процессы управления и устойчивость». — Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ, 2007. С. 335—341.
- [5] *Бугайченко, Д. Ю., Соловьев, И. П.* Абстрактная архитектура интеллектуального агента и методы ее реализации. // *Системное программирование*. — 2005. — №1. С. 36—67.

- [6] *Бугайченко, Д. Ю., Соловьев, И. П.* Архитектура Изолированного Интеллектуального Агента. // Сборник трудов международной конференции «Современные проблемы информатизации». — Воронеж: Издательство «Научная книга», 2006. С. 220—222.
- [7] *Бугайченко, Д. Ю., Соловьев, И. П.* Методы решения некоторых инфраструктурных задач, возникающих при разработке мультиагентных систем. // Материалы конференции «Технологии Microsoft в теории и практике». — Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ, 2006. С. 177—178.
- [8] *Бугайченко, Д. Ю., Соловьев, И. П.* Разработка методик проектирования интеллектуальных систем реального времени с использованием интеллектуальных агентов. // Материалы конференции «Технологии Microsoft в теории и практике». — Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ, 2004. С. 77—78.
- [9] *Бугайченко, Д. Ю., Соловьев, И. П.* Формально-логическая спецификация мультиагентных систем реального времени. // *Вестник СПбГУ*, Серия 1, — 2007. — №2, Апрель. С 49—57.
- [10] *Bugaychenko, D. Y., Soloviev, I. P.* MASL: A Logic for the Specification of Multiagent Real-Time Systems. // Proc. of the 5th International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems. — Leipzig (Germany): 2007. Pp. 183—192.

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Работы [5, 6, 7, 8, 9, 10] опубликованы в соавторстве с научным руководителем. В работе [5] автором разработана формальная модель интеллектуального агента, а также приведен обзор возможных способов её реализации. В работах [6, 7, 8] автором предложены способы организации распределенной интеллектуальной системы, а также методы решения некоторых возникающих при разработке таких систем задач. В работах [9, 10] автором предложен формально-логический метод спецификации мультиагентных систем. Работы [1, 9] опубликованы в издании, рекомендованном ВАК.

Список цитируемой литературы

- [11] Algebraic Decision Diagrams and Their Applications // IEEE /ACM Proc. of the International Conference on CAD. — Santa Clara, California: IEEE Computer Society Press, 1993. — Pp. 188—191.
- [12] *Alur, R.* A really temporal logic / R. Alur, T. A. Henzinger // *J. ACM*. — 1994. — Vol. 41, no. 1. — Pp. 181—203.

- [13] *Alur, R.* Alternating-time temporal logic / R. Alur, T. A. Henzinger, O. Kupferman // *J. ACM.* — 2002. — Vol. 49, no. 5. — Pp. 672–713.
- [14] *Bryant, R. E.* Graph-based algorithms for Boolean function manipulation / R. E. Bryant // *IEEE Transactions on Computers.* — 1986. — Vol. C-35, no. 8. — Pp. 677–691.
- [15] *Cimatti, A.* Automatic OBDD-based generation of universal plans in non-deterministic domains // *AAAI/IAAI.* — 1998. — Pp. 875–881.
- [16] *Emerson, E. A.* Temporal and modal logic. / E. A. Emerson // *Handbook of Theoretical Computer Science, Volume B: Formal Models and Semantics (B).* — North-Holland Pub. Co., 1990. — Pp. 995–1072.
- [17] *Haigh, K. Z.* High-level planning and low-level execution: towards a complete robotic agent // *Proc. of the first international conference on Autonomous agents.* — New York, NY, USA: ACM Press, 1997. — Pp. 363–370.
- [18] *Henzinger, T. A.* Timed alternating-time temporal logic // *Proc. of the 4th International Conference on Formal Modelling and Analysis of Timed Systems* — Vol. 4202 of *Lecture Notes in Computer Science.* — Paris, France: Springer, 2006. — September. — Pp. 1–17.
- [19] *Laroussinie, F.* Model checking timed ATL for durational concurrent game structures // *Proc. of the 4th International Conference on Formal Modelling and Analysis of Timed Systems* — Vol. 4202 of *Lecture Notes in Computer Science.* — Paris, France: Springer, 2006. — September. — Pp. 245–259.
- [20] *Pearl, J.* Heuristics: intelligent search strategies for computer problem solving / J. Pearl. — Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1984.
- [21] *Pistore, M.* Symbolic techniques for planning with extended goals in non-deterministic domains // *Proc. of the 6th European Conference on Planning.* — 2001.
- [22] *Quantitative temporal reasoning* / E. A. Emerson, A. K. Mok, A. P. Sistla, J. Srinivasan // *Real-Time Systems.* — 1992. — Vol. 4, no. 4. — Pp. 331–352.

Подписано в печать . .2007 г. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Объем 1 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № .

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии НИИХ СПбГУ
с оригинал-макета заказчика.

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26.