

**ЯСНЕЦКИЙ Евгений Анатольевич**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва 2001 г.**

18.12.13  
Работа выполнена в Московском государственном техническом университете  
имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель:

д. т. н., профессор

Марков А. А.

Официальные оппоненты:

д.т.н., с.н.с. Казаков О.Л.;

к.т.н., с.н.с. Климов С.М.

Ведущая организация:

З ЦНИИ МО РФ (г. Москва)

Защита состоится «14» февраля 2002 г. на заседании диссертационного  
совета Д 212.141.10 в Московском государственном техническом университете  
имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

в библиотеке МГТУ.

или прислать отзыв в одном

экземпляр.

2001 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1575837

Яценский Е.А. Методы и сре

С.Р. Иванов

1575837

Бауманская ул., д.5.

к.

Актуальность работы. Существует класс задач моделирования, при решении которых необходимо учитывать такие особенности поведения элементов моделируемой системы как наличие определенных целей, плана достижения этих целей, адаптивность, способность к взаимодействию с другими элементами системы и прочее.

Перспективным является использование методов искусственного интеллекта, в основе которых лежит представление моделируемой системы как сообщества интеллектуальных агентов, действующих в некоторой окружающей среде. Для управления интеллектуальными агентами используются системы, основанные на знаниях, например, экспертные системы.

Объектно-ориентированные методы анализа и проектирования и базирующийся на их основе компонентный подход позволяют рассматривать создаваемую модель как набор самостоятельных компонент, функционирующих в единой гибридной среде моделирования. При этом открываются такие принципиально новые возможности, как повторное использование ранее созданных компонент при построении новых моделей, использование знаний, накопленных интеллектуальным компонентом для других приложений, например для управления реальным объектом и т. д.

Особый интерес представляет интеграция в среду моделирования внешних информационных систем, например, баз данных по характеристикам объектов среды, геоинформационных систем, систем виртуальной реальности и т. п. В такие системы заложено большое количество информации, которая потенциально может быть использована как при создании, так и в ходе эксплуатации модели. Таким образом, среда моделирования должна быть открытой.

Основной, типичной для всех открытых систем, является задача организации интероперабельности компонент системы. Остается открытой проблема несоответствия внутренних представлений данных, используемых каждым компонентом среды моделирования.

Поддержка интеллектуальности элементов моделируемой системы требует организации взаимодействия компонент среды моделирования на качественно новом, семантическом уровне. Таким образом, имеет место задача построения формальной спецификации компонент среды моделирования, позволяющей реализовать данный уровень интероперабельности.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке научно-практических основ создания и реализации гибридной среды моделирования систем, содержащих интеллектуальные элементы, путем организации семантической интероперабельности составляющих ее компонент на основе их формальных спецификаций, представленных в виде знаний.

**Цель диссертационной работы.** Исследование и разработка методов и средств построения моделей динамических систем с интеллектуальными элементами, создание на их основе гибридной среды моделирования и реализация в ней модели движения автомобилей по участку дорожной сети.

Основные задачи исследования:

- Анализ и классификация методов моделирования динамических систем, содержащих интеллектуальные элементы;
- Создание программных средств поддержки объектно-ориентированного подхода к построению имитационных моделей;
- Проектирование и реализация набора управляющих правил интеллектуального агента применительно к задаче управления движением автомобиля по участку дорожной сети;
- Разработка онтологической спецификации подсистем-компонент гибридной среды моделирования: универсальной системы имитационного моделирования Simpras, продукционного интерпретатора FuzzyCLIPS, геоинформационной системы ArcView;
- Реализация программных модулей и процедур поддержки интероперабельности подсистем-компонент гибридной среды моделирования.

**Методы исследований.** Результаты диссертационной работы получены на основе использования методов имитационного моделирования систем, объектно-ориентированного анализа и проектирования, агентно-ориентированного построения интеллектуальных систем. Использованы научные положения теории систем искусственного интеллекта, теории нечетких множеств и логико-лингвистических моделей.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

- Определена архитектура гибридной среды моделирования систем с интеллектуальными компонентами. Определены типы используемых подсистем-компонент среды моделирования и функциональное назначение компонент каждого типа;
- Введены формализмы подмодели и модельного фрагмента, составляющие методологическую основу объектно-ориентированного подхода к построению имитационных моделей, в том числе, с целью эффективного использования унаследованных разработок;
- Разработан алгоритм планирования событий и протяжки модельного времени для дискретно-непрерывных гибридных имитационных моделей, построенных с использованием концепций подмодели и модельного фрагмента.

- Разработана методика синтеза онтологического описания подсистем-компонент среды моделирования для заданной предметной области;
- Выполнено развитие типовой структуры интеллектуальной управляющей системы для приложений моделирования действий интеллектуальных агентов в окружающей среде;

**Практическая ценность работы.** Алгоритмы и программные средства, теоретические методы и методики, созданные в диссертационной работе, использованы в ряде НИР, проводимых в 3 ЦНИИ МО РФ.

Полученные теоретические и практические результаты рекомендуются к внедрению в организациях, занимающихся исследованием динамических систем, представимых в виде сообщества интеллектуальных агентов, оперирующих в некотором внешнем окружении.

Внедрение результатов работы позволяет повысить качество создаваемых имитационных моделей за счет эффективного использования больших объемов данных, представленных в самостоятельно существующих информационных системах различного типа.

**Апробация работы.** Содержимое отдельных разделов и диссертации в целом было доложено:

- на научно-технической конференции, посвященной 165-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, ноябрь 1995 г.
- на 3-ей межведомственной научно-практической конференции «Моделирование и сертификация вооружения и военной техники», секция «Визуализация и технологии моделирования интеллектуальных систем». Москва, март 2000 г.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 169 страницах, содержит список литературы из 64 наименований и 4 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражены актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования. Приводится краткое содержание диссертации по главам.

**В первой главе** (Исследование средств и методов моделирования поведения интеллектуальных объектов) проведен анализ, формализация и классификация методов моделирования систем, содержащих объекты с интеллектуальным поведением, дана формальная постановка задачи исследования.

Использована концепция интеллектуального агента (ИА). Динамическая система, содержащая интеллектуальные компоненты, при данном подходе рассматривается как множество интеллектуальных агентов, погруженных в некоторую внешнюю среду, и взаимодействующих друг с другом и с внешней средой.

При формализации основной задачи диссертационной работы — построении гибридной среды моделирования (СМ) динамических систем с интеллектуальными компонентами, — использовано следующее формальное определение. Интеллектуальный агент — это пятерка элементов:

$$A = \langle K_A, D_A, G_A, F_A, F_{Ext} \rangle \quad (1)$$

где  $K_A$  — модель внешнего мира, используемая ИА для принятия решений;  $D_A$  — механизм принятия управляющих решений, с помощью которого происходит выбор агентом конкретного действия из множества возможных;  $G_A$  — множество целей агента;  $F_A$  — множество возможных действий агента;  $F_{Ext}$  — множество возможных воздействий со стороны внешней среды и других ИА.

Подход к реализации модели ИА основан на концепции динамического объекта, управляемого интеллектуальной управляющей системой (ИУС). Формальное определение динамического объекта задается семеркой вида:

$$Obj = \langle T, X, Y, \Omega, S, \Delta, \Lambda \rangle \quad (2)$$

где  $T$  — временная шкала;  $X$  — множество входов объекта;  $Y$  — множество выходов объекта;  $\Omega$  — множество допустимых входных воздействий  $\omega$ , определяемых как  $\omega: [t_1, t_2] \rightarrow X$ ,  $[t_1, t_2] \subset T$ ;  $S$  — множество состояний объекта;  $\Delta$  — функция перехода состояний объекта,  $\Delta: \Omega \times S \rightarrow S$ ;  $\Lambda$  — функция выходов,  $\Lambda: X \times S \rightarrow Y$ .

В основной задаче диссертационной работы выделены следующие подзадачи:

- Управление ИА;
- Реализация модели внешней среды ИА;
- Реализация взаимодействий типа агент–агент и агент–внешняя среда;
- Организация интероперабельности компонент СМ.

Проведено исследование и построена классификация методов и средств решения каждой из перечисленных подзадач.

Структура гибридной СМ представлена как развитие типовой структуры ИУС для задачи моделирования ИА (см. рис. 1).

Управление интеллектуальным агентом при такой организации СМ реализуется экспертной системой (ЭС). Данный компонент реализует адаптивный и недетерминированный характер функций перехода состояний  $\Delta$  и выходов  $\Lambda$  динамического объекта (см. соотношение 2) при моделировании ИА. В основе

механизма адаптации лежит использование в ЭС собственной модели внешнего мира, реализованной в виде базы знаний (БЗ) ЭС. Принятие решений (реализация функции выходов динамического объекта) осуществляется в решателе ЭС на основе вывода на знаниях в БЗ. Интерфейсный компонент ЭС выполняет функции преобразования информации, поступающей от объекта управления в символическое представление, с которым оперирует решатель ЭС, и функции преобразования управляющих команд, сформированных решателем, в сигналы управления объектом.

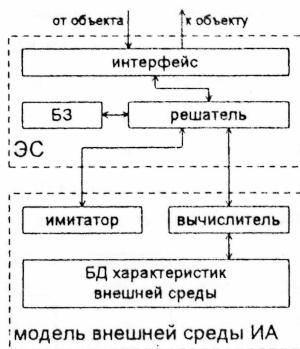


**Рис. 1. Развитие типовой структуры ИУС для задачи моделирования интеллектуального агента**

Реализация модели внешней среды и взаимодействий агентов друг с другом и с внешней средой выполняется совместно в имитаторе и вычислителе ИУС. Вычислитель, в процессе функционирования использует внешние данные из базы данных (БД) характеристик внешней среды. Использование данных, представленных в полном объеме в БД характеристик, позволяет реализовать воспроизведение с достаточной степенью точности количественной стороны взаимодействий ИА. Работа имитатора на основе заложенной в него имитационной модели воспроизводит качественную сторону взаимодействий.

Исследована возможность использования в качестве вычислителя ИУС внешних, самостоятельно функционирующих программных систем следующих типов:

- геоинформационные системы (ГИС);
- системы виртуальной реальности (ВР);
- специализированные БД характеристик.

В результате проведенного исследования выделены, классифицированы и формализованы свойства и особенности систем каждого типа, обоснована возможность использования их в роли компонент гибридной СМ.

Исследованы вопросы реализации имитационного компонента СМ, прототипом которого является имитатор ИУС (см. рис. 1). Определена структура имитационного компонента СМ. В качестве базового формализма использован формализм дискретных событий.

Сформулировано требование модульности имитационных моделей, функционирующих под управлением имитационного компонента СМ. При модульном подходе имитационная модель, реализующая взаимодействия «агент–агент» и «агент–внешняя среда», реализуется как множество самостоятельных, определенным образом связанных компонент-подмоделей.

Показано, что модульность имитационных моделей, используемых в СМ, является необходимым условием эффективного решения практической задачи диссертационной работы — построения имитационной модели движения автомобилей по участку дорожной сети, — поскольку модульный подход предоставляет возможность автоматизированной генерации моделей сложных систем на основе набора базовых компонентов-подмоделей (см. рис. 2).

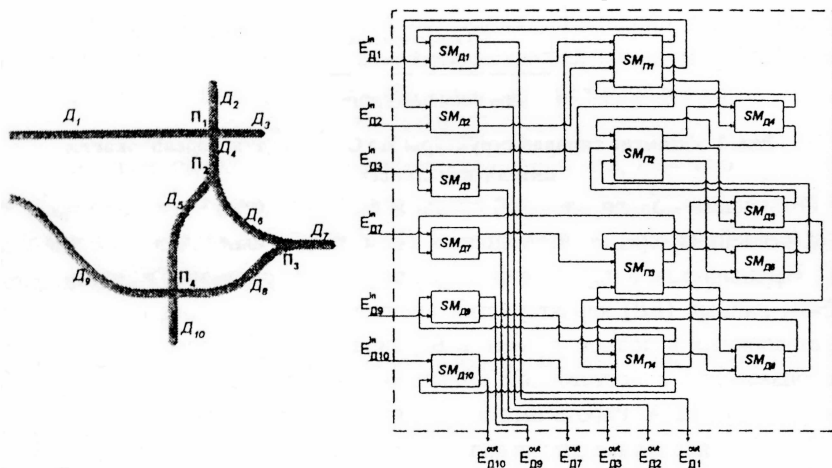


Рис. 2. Модульный принцип построения имитационных моделей при моделировании дорожной сети

На начальном этапе построения имитационной модели дорожной сети создаются компоненты-подмодели прямолинейного участка дороги  $SM_{Di}$  и перекрестка  $SM_{Pi}$ . Дальнейшая разработка ведется с использованием внешней программной системы — ГИС, в которой содержится электронная карта моделируемого участка дорожной сети с дополнительными данными о свойствах отдельных участков дорог и перекрестков.

На основе созданных компонент-подмоделей и данных, полученных из ГИС, происходит генерация имитационной модели дорожной сети. Движение

автомобилей моделируется как прохождение заявок через события, ассоциированные с соответствующими компонентами-подмоделями. Точки входа в модель образуют множество входных событий  $E^n$ , выходы модели — множество событий  $E^{out}$ .

Проанализированы особенности организации совместной работы имитационного компонента СМ и внешних, самостоятельно функционирующих программных систем (ГИС, системы ВР, спец. БД характеристик, рассмотренные в главе 1 ранее), при использовании формализма дискретных событий. В результате анализа построена классификация событий имитационного компонента гибридной среды моделирования (см. таблицу 1).

Таблица 1.

Классификация событий имитационного компонента гибридной СМ

| Критерий            | Типы событий      | Описание                                                                                                                                                     |
|---------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Способ планирования | Временные события | Время возникновения заранее известно — событие может быть запланировано                                                                                      |
|                     | События состояния | Время возникновения определяется выполнением некоторых условий на значения атрибутов объекта — событие идентифицируется непосредственно в момент наступления |
| Семантика           | События структуры | Ассоциированы с перемещениями агента в между элементами системы                                                                                              |
|                     | События сценариев | Ассоциированы с выполнением агентом определенной последовательности действий над элементами системы                                                          |

В конце главы, на основе выполненного исследования и формализации методов и средств моделирования поведения интеллектуальных объектов, дана формальная постановка задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** (Методы работы со знаниями в задаче управления интеллектуальным агентом) исследованы методы работы со знаниями в контексте задачи моделирования поведения ИА. На основе вновь введенной оригинальной концепции прикладной онтологии решена задача организации семантической интероперабельности подсистем в составе гибридной СМ, сформулированная в первой главе.

Проведена дальнейшая декомпозиция задачи интеллектуального управления на подзадачи представления знаний и использования знаний.

Относительно задачи представления знаний, выделены следующие категории сущностей, знания о которых необходимо представлять:

- пространство и время;
- цели ИА;
- действия ИА;
- реагирование ИА на внешние воздействия;

Рассмотрены модели знаний, основанные на логике высказываний, продукционные, сетевые и фреймовые модели, модели представления знаний в виде сценариев. Отмечены преимущества и недостатки каждой модели, показана возможность использования рассмотренных моделей при решении обозначенных задач.

Показано, что механизм принятия управляющих решений  $D_A$  (см. соотношение 1) реализуется как совокупность системы продукций, представленная множеством  $\{Pr_i\}$ , и механизма вывода  $Inf$ :

$$D_A = \langle \{Pr_i\}, Inf \rangle.$$

Относительно фреймовых моделей представления знаний показано, что они могут быть эффективно использованы для реализации принципов объектно-ориентированного подхода при построении БЗ ИА, что, в свою очередь предоставляет возможность оптимального согласования представлений, используемых при построении гибридной СМ.

Рассмотрена возможность использования присоединенных процедур фреймов для организации логического вывода над фреймами. Сделано заключение о том, что наилучшим из рассмотренных способов реализации механизма принятия управляющих решений  $D_A$  является способ, совместно использующий фреймовые и продукционные представления знаний ИА.

В результате проведенных исследований моделей представления знаний ИА разработана оригинальная методика построения БЗ ЭС управления ИА. Выполнено представление методики в виде алгоритма.

С целью решения задачи использования знаний интеллектуальным агентом проанализирована концепция онтологии как способа задания контекстно-зависимых соглашений для организации совместного и повторного использования знаний интеллектуальными агентами.

На основе анализа публикаций построена классификация уровней представления знаний (см. таблицу 2). Онтологический уровень, изначально отсутствовавший в данной иерархии, выполняющий связующие функции между нижними и верхними уровнями представления, предоставляет формализмы и примитивы, которые позволяют явно специфицировать формальную структуру концептуальных единиц и их взаимосвязи.

Использовано следующее определение онтологии. Онтология — это формальная спецификация концепций предметной области, выраженная средствами языка представления знаний.

Таблица 2.

Классификация уровней представления знаний

| Уровень         | Используемые примитивы и формализмы                  |
|-----------------|------------------------------------------------------|
| Лингвистический | Лингвистические термины                              |
| Концептуальный  | Концептуальные связи, примитивные объекты и действия |
| Онтологический  | Концептуальные типы, структурные связи               |
| Логический      | Предикаты, функции, логические операторы             |
| Прикладной      | Ячейки памяти, указатели                             |

Введено понятие прикладной онтологии как базового формализма реализации семантической интероперабельности компонент гибридной СМ. Формальная модель прикладной онтологии определена как четверка вида:

$$\Omega = \langle C, R, \Phi, A \rangle$$

где  $C$  — множество концептов предметной области;  $R$  — множество отношений над концептами;  $\Phi = \{\Phi^{dir}, \Phi^{inv}\}$  — механизм интерпретации концептов и отношений онтологии;  $A$  — множество аксиом.

На основе полученных в первой главе диссертации результатов формализации процесса взаимодействия ИА с внешней средой обоснована возможность использования прикладной онтологии для организации семантической интероперабельности компонент гибридной СМ (см. рис. 3). Показано, что процесс информационного обмена между программными подсистемами, входящими в состав гибридной СМ может быть представлен как коммуникации интеллектуальных агентов на основе общей онтологии.

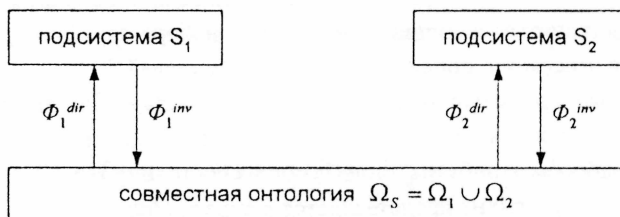


Рис. 3. Интеграция подсистем на базе прикладной онтологии

Разработана методика синтеза прикладной онтологии. Методика отражает принципы «спирального» проектирования программных систем и состоит из следующих этапов:

1. Спецификация концепций предметной области;
2. Спецификация внутренних представлений компонент СМ;
3. Согласование спецификации предметной области и спецификаций компонент СМ, составленных на первом и втором этапах.

Выполнена запись разработанной методики в виде алгоритма.

**В третьей главе** (Моделирование взаимодействий интеллектуальных агентов с окружающей средой) формализован процесс взаимодействия интеллектуальных агентов в виртуальной окружающей среде. Построена классификация по типам взаимодействий, выделены следующие категории:

- Воздействие: действия ИА, направленные на изменение состояния внешней среды или собственного состояния;
- Восприятие: действия, связанные с получением и использованием ИА информации о состоянии окружающей среды и о собственном состоянии.

Реализация воздействий ИА на внешнее окружение осуществляется в имитационном компоненте гибридной СМ (см. рис. 1). На основе результатов исследования структуры и функциональности данного компонента СМ, проведенных в первой главе диссертации, введены оригинальные концепции подмодели и модельного фрагмента, используемые в дальнейшем для построения моделей по модульному принципу.

*Подмодель* — это абстракция, определяющая способ представления некоторого класса элементов моделируемой системы в имитационной модели.

Формально подмодель определяется как пятерка вида:

$$SM = \langle N_{SM}, A_{SM}, E_{SM}, V_{SM}^{in}, V_{SM}^{out} \rangle$$

где  $N_{SM}$  — имя подмодели;  $A_{SM}$  — множество атрибутов подмодели;  $E_{SM}$  — событийное пространство подмодели;  $V_{SM}^{in}$  — вектор входов подмодели;  $V_{SM}^{out}$  — вектор выходов подмодели.

Показана возможность обеспечения поддержки объектной методологии на основе следующих характерных свойств подмодели: изолированность событийного пространства, наличие собственного набора атрибутов, операций наследования и агрегации, определенных для подмоделей.

*Модельный фрагмент* — это абстракция, используемая для представления определенной последовательности элементарных операций, выполняемых над некоторым набором атрибутов, описывающих состояние ИА.

Формально фрагмент представляется в виде тройки:

$$MF = \langle N_{MF}, E_{MF}, V_{MF}^{in} \rangle$$

где  $N_{MF}$  — имя фрагмента;  $E_{MF}$  — событийное пространство фрагмента;  $V_{MF}^{in}$  — вектор входов модельного фрагмента.

Принцип построения имитационных моделей на основе формализмов под-модели и модельного фрагмента проиллюстрирован на примере модели движения автомобилей по участку дороги AB с бензоколонкой G (см. рис. 4).

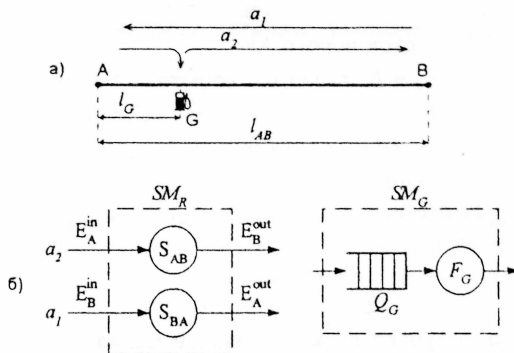


Рис. 4. Моделирование участка дороги с бензоколонкой

На рис. 4 использованы обозначения:

$a_1, a_2$  — траектории движения двух автомобилей;

$SM_R$  — подмодель участка дороги AB ( $S_{AB}, S_{BA}$  — соответствующие полосы движения дороги AB);

$SM_G$  — подмодель бензоколонки (с очередью  $Q_G$  и обслуживанием в  $F_G$ );

На рис. 5 приведена динамика изменения отдельных переменных, описывающих состояние рассматриваемой системы:

$N_R$  — число автомобилей на участке дороги AB;

$N_G$  — число автомобилей, обслуживающихся на бензоколонке;

$L_A$  — расстояние от пункта A до автомобиля ( $l_{AB}$  и  $l_G$  — из рис. 4.а).

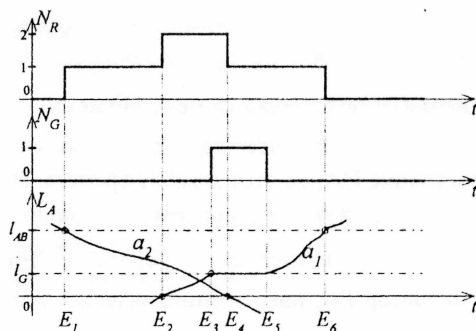


Рис. 5. Изменение состояния системы и связанные с этим события

На рис. 5 использованы обозначения:

$E_1, E_2$  — события, связанные с началом движения агентов  $a_2$  и  $a_1$  соответственно по участку дороги АВ;

$E_3$  — событие, связанное с достижением агентом  $a_1$  бензоколонки  $G$ ;

$E_4$  — агент  $a_2$  покидает участок дороги АВ;

$E_5$  — окончание обслуживания агента  $a_1$  на бензоколонке;

$E_6$  — агент  $a_1$  покидает участок дороги АВ.

События  $E_1, E_2, E_3, E_4$  и  $E_6$  являются событиями состояния (см. классификацию в табл. 1) — моменты их возникновения обусловлены достижением непрерывно изменяющихся координат агентов определенных значений.

Идентификация событий  $E_1, E_2, E_3, E_4$  и  $E_6$  выполняется с помощью оператора  $P_{SE}$  идентификации событий состояния, ассоциированного с подмоделью  $SM_R$ :

$$P_{SE} : I^P \rightarrow T^S,$$

где  $I^P$  — множество полуоткрытых интервалов модельного времени, на которых происходит продвижение модельного времени от одного временного события к следующему:

$$I^P = \{ [t_1, t_2), [t_2, t_3), \dots, [t_{n-1}, t_n), [t_n, t_{n+1}), \dots \};$$

$T^S$  — множество моментов времени, в которые происходят события состояния:

$$T^S = \{ t_i^n \}$$

$$t_n \leq t_i^n < t_{n+1},$$

$$[t_n, t_{n+1}) \in I^P.$$

В общем случае, оператор  $P_{SE}$  ассоциирован с каждой подмоделью и модельным фрагментом, при прохождении ИА через которые возможно возникновение событий состояния.

Работа оператора  $P_{SE}$  заключается в изменении состояния ИА на заданном временном полуоткрытом интервале  $[t_n, t_{n+1})$  по определенному закону. Если в процессе этого изменения, в некоторый момент времени  $t_i^n$  ( $t_n \leq t_i^n < t_{n+1}$ ) начинают выполняться некоторые заранее заданные условия на значения атрибутов, описывающих состояние ИА, то этот момент времени фиксируется как момент возникновения соответствующего события состояния. Модельное время устанавливается в значение  $t_i^n$ , и управление передается той подмодели, с которой ассоциирован оператор  $P_{SE}$ , идентифицировавший возникновение данного события состояния.

Моделирование взаимодействий класса «восприятие» (см. классификацию на стр. 10) представлено как задача лингвистического отображения на БЗ ЭС

управления ИА информации о его внешнем окружении полученной при моделировании взаимодействий класса «воздействие» посредством имитации. Использован математический аппарат теории нечетких множеств и лингвистических переменных.

Исследованы особенности термов лингвистических переменных, обусловленные характером представляемых величин: одномерные/многомерные, счетные/несчетные, конечные/бесконечные.

Решена задача лингвистического представления многомерных величин (используемых для лингвистического описания двумерных объектов на плоскости и трехмерных объектов в пространстве). С целью уменьшения вычислительной сложности алгоритмов, используемых обработки лингвистических термов, разработана процедура разложения многомерных нечетких множеств в комбинацию одномерных. Определена процедура оценки точности подобного разложения.

**В четвертой главе** (Реализация гибридной среды моделирования поведения интеллектуальных объектов) освещаются вопросы, связанные с практическим использованием методов и методик, разработанных в главах 1–3 диссертации, и конкретных инструментальных программных средств при реализации модели движения автомобилей по участку дорожной сети.

Реализована гибридная среда моделирования, в которую интегрированы следующие внешние подсистемы-компоненты:

- продукционный интерпретатор с расширениями для нечеткой логики «FuzzyCLIPS» (Fuzzy C Language Integrated Production System, система продукций с нечеткой логикой, интегрированная с языком Си) — разработка NASA, США; свободно доступна в виде исходных кодов на языке Си. В данной системе используется LISP-подобный объектно-ориентированный язык программирования COOL (CLIPS Object-Oriented Language);
- геоинформационная система «ArcView» — разработка ESRI (Environmental Systems Research Institute), США. Система снабжена интерфейсом прикладных программ (API, Application Program Interface) и встроенным макроязыком программирования «Avenue»;
- общецелевая система имитационного моделирования «Simpas», доступная в исходных кодах на языке Паскаль.

Структура гибридной СМ приведена на рис. 6.

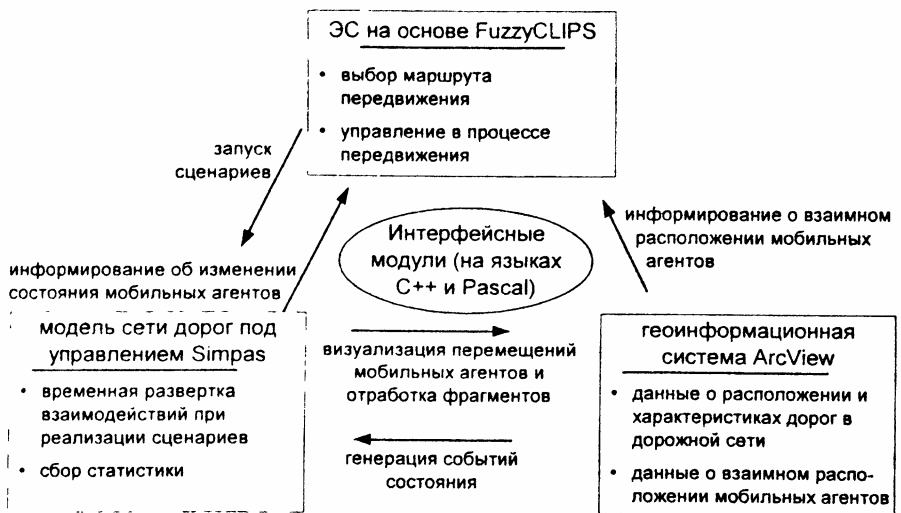


Рис. 6. Структурный состав гибридной CM и функции ее компонент

На основе спецификации указанных подсистем-компонент, в соответствии с методикой, разработанной в главе 2, составлена прикладная онтология предметной области «движение автомобилей по дорожной сети». Выполнено кодирование прикладной онтологии на языках программирования C++, Avenue, COOL.

Разработаны базовые компоненты-подмодели и модельные фрагменты, имитирующие движение автомобиля по прямому участку дороги и через перекресток. Программная реализация указанных подмоделей и модельных фрагментов выполнена на основе системы Simpas.

При разработке программных модулей поддержки интероперабельности подсистем-компонент и пользовательского интерфейса использованы языки программирования C++ в среде программирования Visual C++ 6.0 и Object-Pascal в среде Delphi 5.

Полная функциональность построенной модели подтверждает правильность научных положений, их работоспособность и высокую эффективность методов и методик, разработанных в диссертации.

**В заключении** сформулированы основные теоретические, методические и практические результаты диссертационной работы.

**В приложениях** приведены: фрагменты исходных текстов модулей, реализующих прикладную онтологию гибридной CM; фрагмент БЗ ЭС управления ИА для случая прохождения автомобиля через перекресток; результаты моделирования.

Цель, сформулированная в диссертационной работе, по исследованию и разработке методов и средств построения моделей динамических систем с интеллектуальными элементами, создание на их основе гибридной среды моделирования и реализация в ней модели движения автомобилей по участку дорожной сети, достигнута.

## Теоретическая часть.

1. Проведен анализ, формализация и классификация методов и средств моделирования поведения интеллектуальных объектов.
2. Дано формальное определение СМ. Формализован процесс функционирования СМ, сформулированы правила построения моделей динамических систем по модульному принципу.
3. Выполнена формализация процесса моделирования взаимодействия ИА с окружающей средой по комбинированной дискретно-непрерывной схеме.
4. Исследованы методы работы со знаниями в задаче моделирования поведения интеллектуального агента. Проведен анализ методов представления знаний: логических, продукционных, фреймовых и сетевых моделей представления знаний и представлений в виде сценариев.
5. Предложена оригинальная концепция прикладной онтологии, определена ее формальная модель.
6. Построено формализованное описание процесса межагентных коммуникаций на основе совместно используемой онтологии.
7. Исследован и обоснован тезис о возможности применения компонентного подхода к построению моделей и использования в качестве компонент СМ внешних ИС, содержащих информацию о характеристиках моделируемых объектов. Сформулирована и решена задача организации семантической интероперабельности компонент СМ на основе прикладной онтологии.

## Методическая часть.

1. Разработана оригинальная методика построения БЗ ЭС управления ИА с использованием перечисленных моделей знаний.
2. Разработана оригинальная методика синтеза прикладной онтологии предметной области моделирования как основы для создания гибридной СМ, основанной на знаниях.
3. Введены понятия подмодели, и модельного фрагмента, оператора идентификации событий состояния, составляющие методическую основу формализации, алгоритмизации и реализации моделей сложных динамических систем с интеллектуальными элементами.

## Практическая часть.

1. Реализована гибридная среда моделирования движения автомобилей по участку дорожной сети, содержащая следующие программные модули:
  - система управляющих правил для управляющей ЭС, функционирующей на основе продукционного интерпретатора FuzzyCLIPS;
  - объектная надстройка над общецелевой системой имитационного моделирования Simpas;
  - модуль поддержки программного интерфейса с ГИС ArcView;
  - набор макросов на языке «Avenue», расширяющий функциональность ГИС ArcView;
  - модуль поддержки пользовательского интерфейса.
2. На основе созданных в работе методов и методик и разработанного комплекса программных средств реализована экспериментальная модель движения автомобилей по участку дорожной сети.

Достоверность научных положений диссертации подтверждена выполненными экспериментальными исследованиями, практической реализацией среды моделирования и экспериментальных моделей, результатами внедрения.

Основное содержание диссертации отражено в следующих печатных работах:

1. Яснецкий Е.А. Открытая гибридная среда моделирования интеллектуальных динамических объектов в виртуальной окружающей среде // Компьюлог.— 2001.— №3.— С. 45-51.
2. Марков А.А., Яснецкий Е.А. Рефлексы как абстракции в объектно-ориентированном подходе к моделированию систем //Тез. докл. науч.-техн. конф., посвящ. 165-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана.– М., 1995.– С.45-46.
3. Yasnetsky E. Extracting 3D object orientation information from a single view point: estimation of capabilities // Proceedings of Digital Photogrammetry and Remote Sensing Conference.– St.Petersburg, 1995.– P.285–290.
4. Липницкий А.К., Яснецкий Е.А. Разностные алгоритмы адаптации систем селекции подвижных объектов //Тез. докл. науч.-техн. конф., посвящ. 165-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана.– М., 1995.– С.57.
5. Кулик В.П., Липницкий А.К., Яснецкий Е.А. Определение пространственной ориентации объекта //Тез. докл. науч.-техн. конф., посвящ. 165-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана.– М., 1995.– С.58.