

УДК 004.891

И.В. Шостак<sup>1</sup>, М.А. Данова<sup>1</sup>, Р.Б. Капитан<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*<sup>2</sup> *Черкасский государственный технологический университет, Черкассы*

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА СОЗДАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ВИРТУАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

*Описана специализированная инструментальная среда в форме мультиагентной системы (МАС) для создания и развертывания интегрированной экспертной системы поддержки принятия решений (ИЭСППР) при управлении виртуальными производственными предприятиями. МАС ИЭСППР имеет в своем составе инструментарий инженерии знаний, предназначенный для создания онтологической системы, и программный инструментарий, предназначенный для разработки новых модулей расширения исполняющей системы. Показано, что механизмы исполнения МАС ИЭСППР достаточно эффективны и мало зависят от количества потоков исполнения, при этом особенностями данной инструментальной среды являются наличие виртуальной памяти и, в случае использования агентами процессов на основе системных объектов fibers, возможность управления размером выделяемого приложению виртуального адресного пространства.*

**Ключевые слова:** инструментальная среда, программный комплекс, мультиагентная система, поддержка принятия решений, экспертная система, онтологическая система, виртуальное производственное предприятие.

### Введение

В [1] была предложена структура специализированной инструментальной среды в форме мультиагентной системы (МАС) для создания и развертывания интегрированной экспертной системы поддержки принятия решений (ИЭСППР), разработанной для автоматизации процесса управления виртуальными производственными предприятиями.

Разработанная среда включает в себя два программных комплекса: инструментарий инженерии знаний, предназначенный для создания онтологической системы, и программный инструментарий, предназначенный для разработки новых модулей расширения исполняющей системы. В ряде случаев разработчик может создать новую систему, не прибегая к программированию, и лишь создавая новую онтологию для решения задачи и используя существующие модели агентов и предлагаемые методы их взаимодействия [1].

Инструментарий инженерии знаний включает в себя конструктор онтологий, систему извлечения знаний, интегратор знаний и систему понимания текста на ограниченном естественном языке (языке деловой прозы). Каждая из указанных систем, в свою очередь, строится как мультиагентная система, имеющая собственную онтологию и средства диалога.

Особое значение для работы пользователей имеет конструктор онтологий, позволяющий описывать понятия и отношения, существующие в заданной предметной области [2]. При этом пользователю обеспечивается возможность графического создания онтологии из базовых концептов, включая объекты, свойства, процессы, отношения и атрибуты. Специальные средства визуализации разработаны для

построения агентов мира потребностей и возможностей, задания условий матчинга между ними и критериев принятия решений [1].

В отличие от известных мультиагентных систем, реализуемых, как правило, на основе Java-классов [3], в данной разработке изначально был взят курс на создание собственной среды функционирования агентов, способной гарантировать системе высокую производительность, необходимую для промышленных применений.

Созданная инструментальная среда МАС ИЭСППР специализирована для построения мультиагентных систем для моделирования процессов принятия решений. На основе этого инструмента был впервые реализован метод компенсаций и построены мультиагентные системы для поддержки процессов принятия решений в задачах управления транспортной и производственной логистикой, управления проектами и ряде других. Рассматриваемая инструментальная среда предназначена для построения МАС ИЭСППР коллективного взаимодействия в сети Интернет, реализуемого в реальном времени. Эта система отличается высокой гибкостью и возможностью работы в реальном времени и может применяться также для создания систем электронной коммерции, интегрированных Интернет-порталов, систем дистанционного обучения и других мультипользовательских приложений. В МАС ИЭСППР реализован метод виртуальных «круглых столов» и обеспечена возможность пополнения онтологии и синтеза новых правил работы агентов «на лету».

*Цель статьи* состоит в описании инструментария программиста для создания специализированных программных компонентов, состоящий из расширяемого набора библиотек программ. Рассмотрен-

ные компоненты в целом составляют набор дополняющих средств, призванных упростить, ускорить и удешевить разработку МАС ИЭСППР для конкретных производственных предприятий.

## 1. Описание структуры исполняющей системы МАС ИЭСППР

Наиболее известные программные агенты в основном используются для поиска информации в сети. Последние обычно называются 'bots' или 'spiders' [4] и функционируют, как правило, независимо. Поскольку указанные агенты перемещаются по сети, то их серьезной проблемой также является наличие систем безопасности, которые как правило не допускают чужие программы на сервер.

Разрабатываемые в рамках МАС ИЭСППР агенты «живут» на Интернет- или локальном сервере виртуального производственного предприятия и никуда не перемещаются. Агенты способны воспринимать информацию из виртуальной среды и принимать решения, а также коммуницировать с другими агентами. Главные особенности разработанной системы связаны с наличием развитых средств поддержки коммуникации и переговоров агентов, а также возможностями построения на основе онтологической системы баз знаний, содержащих описания понятий и отношений предметной области в форме семантических сетей (традиционные программные объекты не имеют возможности работать с собственными описателями).

Еще одной особенностью МАС ИЭСППР является наличие «вложенных» агентов (агентов, способных «жить» внутри других агентов), что позволяет ограничить «область видения» агента и сделать более эффективной систему их коммуникации. При этом сообщение приходящего на «составного» агента может немедленно поступать всем его «жителям» и наоборот. При этом с каждым «составным» агентом может быть связан свой собственный мир, в котором собственно и могут взаимодействовать «внутренние» агенты. Естественно, что агенты могут свободно «переезжать» из одного мира в другой, из одного составного агента – в другой.

Типичным примером мира агентов является виртуальный рынок логистической компании. Номенклатура агентов на этом рынке включает агентов покупателей и продавцов, товаров и заказов, складов и транспорта. Вместо «физических» законов взаимодействия объектов здесь действуют сценарии переговоров агентов, посвященные поставке продукции в срок, достижению скидок постоянным покупателям или вследствие оптовой покупки и т.д. Объектами этого мира могут являться деньги, документы и т.п. На основе этого мира могут быть построены системы

е-коммерции, логистики и многие другие. Для пользователя любой мир представляется сценами, описывающими состояния агентов и объектов мира в каждый момент времени.

В разработанном подходе к созданию инструментальной среды МАС ИЭСППР все перечисленные знания из предметной области могут быть отделены от программного кода и сосредоточены в отдельных описаниях. Вместе с тем, в рассматриваемой системе в целях эффективности реализации, онтология предметной области может быть реализована и в программном коде.

Исполняющая система включает в себя подсистему параллельного исполнения агентов, подсистему коммуникаций агентов, подсистему поддержки онтологии, подсистему формирования интерфейса, сервисную подсистему. Рассмотрим более подробно две основные подсистемы: подсистему параллельного исполнения агентов и подсистему коммуникации агентов. Подсистема параллельного исполнения агентов по своей сути представляет собой Диспетчер процессов, связанных с каждым агентом в сцене (рис. 1). При этом каждому процессу сцены в данной подсистеме последовательно выделяется некоторый квант времени для исполнения. Длительность этого кванта переменная и зависит от того, где находится в программе агента пользователя следующий системный вызов, т.е. от вызова до вызова любой функции подсистемы. Пользователь может также принудительно разбить свою программу на блоки (размещая там специальные вызовы), которые будут обеспечивать прерывание работы программы и передачу управления на другие параллельные процессы. Процесс может и явно передавать управление другими процессам, что гарантирует агентам возможность взаимодействия как по прерыванию, так и по времени.

Все процессы внутри одного агента в целом работают параллельно и синхронизируются передачей сообщений. При этом в каждый момент времени у одного агента исполняется только один процесс (иначе его общий атрибут одновременно мог бы быть изменен несколькими процессами). Все получаемые на агента сообщения передаются процессам агента. Разделение сообщений между процессами происходит по типу сообщений, явно указываемом в

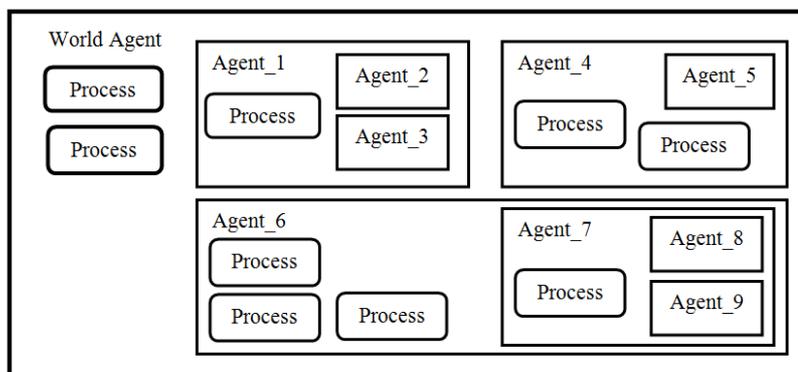


Рис. 1. Внутреннее представление сцены мира сообществом агентов

филт্রে в каждом процессе. При этом сообщения играют роль важных событий, запускающих процессы. Порядок же исполнения процессов внутри одного агента определяется приоритетами процессов: процессы с более низкими приоритетами никогда не исполняются, пока активен процесс с более высоким приоритетом. Если существуют несколько процессов с одинаковыми приоритетами, то они исполняются по очереди. В расчете на последующее реальное многомашинное взаимодействие разработанный диспетчер создан не централизованным, а полностью распределенным. Фактически, для каждого агента создается своя копия полнофункционального диспетчера, который занимается его процессами. В результате диспетчеры образуют дерево процессов, в котором имеются «корень», «узлы» и «листья». Здесь «листья» сопоставляются с процессами, т.к. процесс не может содержать в себе другие процессы, «узлы» сопоставляются с агентами, а агент мира сопоставляется с «корнем» дерева, привязываемым к операционной системе (что собственно и отличает агента мира от других агентов).

В настоящий момент в MAC ИЭСППР поддерживается три типа «листьев» (процессов) – основанные на системном объекте fiber. Каждый из описанных типов процессов достаточно специфичен и создает для себя свой тип «листа», обеспечивая возможность согласованной работы столь различных компонент. В результате, процессы могут быть построены как компилированные процедуры, дающие наибольшую скорость работы, так и интерпретируемый набор инструкций.

«Корень» дерева процессов является точкой сопряжения с механизмами диспетчеризации операционной системы (ОС) и с системой управления, через которую пользователь контролирует исполнение (запуск, останов, пошаговая работа и пр.). Именно от этого «корня» начинается работа системы исполнения и каждого агента/процесса. В случае ОС Windows в корне находится пул нитей Windows и система балансировки нагрузки на нити.

Важной особенностью подсистемы является то, что «дерево», за исключением своего «корня» и некоторых типов «листьев» (fiber-based процессы),

является независимым от структуры ОС. Поэтому процесс портирования под другие ОС (в случае наличия соответствующего компилятора) состоит из замены «корня» и переработки или удаления ОС-специфичных «листьев».

Подсистема коммуникации агентов обеспечивает возможность идентификации агентов и обмена сообщениями в ситуациях, присущих открытым системам. Для взаимодействия агентов в MAC ИЭСППР использован подход, применяемый в распределенных системах, который состоит в том, что на самого агента не может быть прямых ссылок, для этого существует специальный объект-связь AgentNexus, который в себе несет ссылку на агента. Ссылки на AgentNexus выполнены на основе COM интерфейса IAgentNexus, таким образом в каждый момент времени известно, используется ли этот объект кем-то еще. AgentNexus агрегируется агентом (т.е. возвращает IUnknown агента). При этом, все интерфейсы, принадлежащие самому агенту являются блокирующими уничтожение, но их использование строго ограничено. В случае уничтожения агента, объект AgentNexus не уничтожается, если на него существуют ссылки, но перестает быть агрегированным, т.е. самостоятельно обслуживает IUnknown. Таким образом, в MAC ИЭСППР подсистема коммуникаций обеспечивает взаимодействие агентов только посредством передачи сообщений (в последующем будет создана система органов чувств агентов). В сообщениях идентификаторами агентов выступают объекты связи агентов, а не сами агенты. Если агент существует на одной машине, но взаимодействует с агентами на других машинах, то там создаются его объекты-связки, с информацией, о том, куда же в действительности пересылать ответные сообщения. Регистрация сообщений выполняется один раз при инициализации системы. Регистрация состоит из двух этапов, в начале регистрируется имя и код сообщения (уникальный числовой номер), а также наборы параметров, которые можно использованы с данным кодом. Регистрируемые наборы параметров должны быть уникальны (с учетом совместимости параметров) в пределах одного кода сообщения. Параметры сообщения могут следующие типы, описанные в табл. 1.

Таблица 1

Типы данных в разработанной мультиагентной системе

Тип данных	Описание типа
Integer	Целое число, в качестве ограничения можно задать диапазон
Int64	Целое число 64 бита (ID)
Float	Число с плавающей точкой, в качестве ограничения можно задать диапазон
Class	Ссылка на класс, в качестве ограничения можно задать родительский класс
Object	Указатель на объект, в качестве ограничения можно задать родительский класс объекта
Agent	Идентификатор или прямой указатель на агента, в качестве ограничения можно задать родительский класс
Interface	Ссылка на произвольный интерфейс
Message	Ссылка на другое сообщение
Boolean	Булевское значение
DateTime	Абсолютная или относительная дата (по стандарту OLE2)
Currency	Число с фиксированной точкой, для денежных операций
String	Строка

При задании параметра сообщения также можно указать, допустимо ли вместо значения параметра передавать NULL (отсутствие значения). Кроме этого, для типов Class, Object, Agent, Interface, Message можно указать допустимость передачи значения nil (пустой указатель). Кроме параметров, сообщение несет в себе следующую информацию: код сообщения, номер набора параметров, порядковый номер сообщения (уникальный номер для каждого созданного в системе сообщения), порядковый номер сообщения, явившегося причиной данного. Один из способов применений данного поля, это обработка ответов от группы агентов, информация о получателе/получателях.

Каждый процесс агента имеет очередь входящих сообщений и фильтр, контролирующий то, какие сообщения попадают к нему в очередь. Фильтрация сообщений возможна по коду сообщения, по отправителю и по номеру сообщения-причины. Последнее используется при получении нескольких ответов на один вопрос, для этого запоминается уникальный номер сообщения вопроса, после чего все сообщения, у которых данный номер стоит как номер сообщения-причины, считаются ответами.

В качестве адресатов при отправке сообщения могут быть указаны: конкретный агент, список агентов, класс агентов.

## 2. Особенности программной реализации MAC ИЭСППР

MAC ИЭСППР представляет собой конструктор онтологии и готовая к исполнению исполняющая система, включающая программу-оболочку с контрольным примером из области логистики, набор библиотек базовых программ для создания прикладных систем пользователя и комплектом документации. Пользователь системы может не только создавать новые онтологии, но и добавлять модули к базовым библиотекам для создания новых возможностей (например, новых типов некоторых объектов и агентов) и расширения интерфейса. При этом библиотеки пользователя и модули интерфейса могут пополняться и модернизироваться динамически «на лету», без полной перекомпоновки системы (что позволяет в последующем при создании новых версий досылать потребителям только изменения через Интернет, не пересылая всю новую версию прикладной системы целиком). Набор базовых библиотек MAC ИЭСППР включает в себя перечисленные ниже компоненты:

### А. Библиотеки исполнения:

- MagentACorePackage.bpl – основная библиотека исполнения. Содержит в себе менеджер расширений ядра, систему диспетчеризации, систему сообщений и объявления базовых типов агентов. В состав входят 29 модулей и 15800 строк кода.

- MagentACore.dll – библиотека, которая обеспечивает подключение агентного ядра к подсистемам его использующим, например к системе под-

держки визуализации. Главная задача этой библиотеки – позднесвязывание интерфейса с MagentACorePackage.

- MagentACommonPackage.bpl – содержит систему унифицированного сохранения/восстановления объектов, объявления базовых типов списков, сервисные функции. В ее состав входят 13 модулей и 13700 строк кода.

- MagentADsgnPackage.bpl – включает в себя редакторы атрибутов, которые могут быть использованы в AgentInspector и служебные функции, используемые при сохранении состояний визуальных элементов интерфейса. Эти компоненты и функции не зависят от других библиотек MAC ИЭСППР, кроме MagentACommonPackage. В состав входят 8 модулей и 6000 строк кода.

- MagentAWeakPackage.bpl – содержит константы и типы, совместно используемые библиотеками исполнения и библиотеками поддержки визуализации. В основном это коды сообщений и структуры данных, которыми обмениваются эти подсистемы. В состав входят 7 модулей и 800 строк кода.

### Б. Библиотеки поддержки визуализации:

- MagentAIntfPackage.bpl – один из вариантов реализации управления ядром. Используется как посредник для взаимодействия с MagentACore.dll. Имеет встроенную систему поддержки расширений визуализации и унифицированную систему управления ресурсами для визуализации агентов, а также систему опосредованного взаимодействия расширений. В состав входят 15 модулей и 8000 строк кода.

- UniIntfPackage.bpl – библиотека базовых форм и сервисных функций, используемых при создании расширений визуализации для UniIntf. Данная библиотека включает в себя 5 модулей (1000 строк кода), содержащих 3 визуальных компонента (TStreamableObjectInspector, TIntfMenuAction, TAgentIntfAction) и два шаблона форм (TformBasic Tool Window и TformAgentViewTemplate). Причина их выделения в отдельную библиотеку заключается в необходимости совместного использования данных компонент и шаблонов UniIntf и визуальных расширений. Модули данной библиотеки обеспечивают унифицированную визуализацию исходных данных для агентов и результатов их работы.

- AgentInspector – дает возможность просматривать в виде дерева текущую сцену и информацию по агентам (значения атрибутов, списки малых агентов, списки процессов) и менять значения атрибутов. Возможности AgentInspector'a, являющегося расширением стандартной системы визуализации, могут быть дополнены из других расширений. В состав входят 8 модулей и 1700 строк кода.

- MessageLog – загрузка этого расширения активизирует систему перехвата сообщений ядре, в ее состав входят 7 модулей и 2600 строк кода.

- HoneyCombs – вариант представления сцены в виде агентов, расположенных на шестигранных

сотах, она также является расширением базовой библиотеки визуализации, 3 модуля, 800 строк кода.

- Набор компонент для Delphi10 для поддержки работы пользователя на этапе создания прикладных программ. Состоит из 9 модулей и 3500 строк кода.

В состав системы входит также стандартный модуль Unilntf.exe – унифицированный визуальный интерфейс для управления и использования агентного ядра, в его состав входят 22 модуля и 7000 строк кода. Система выполнена на основе Delphi 10 Seattle. Использует динамическую библиотеку компонент dcstd5.bpl, созданную на основе одноименной библиотеки, лицензированной у фирмы Dream Company. Система функционирует в среде Windows 7, 8, 10E. Разработанная инструментальная среда применялась при разработке мультиагентной системы управления виртуальным производственным предприятием [5].

## Выводы

1. Разработанная система обеспечивает возможность работы с 500 000 агентов без значительной деградации по сравнению с конфигурацией в 10 агентов. Таким образом, механизмы исполнения МАС ИЭСППР достаточно эффективны, мало зависят от количества потоков исполнения и по сравнению с механизмом нитей Windows обеспечивают поддержку гораздо большего числа агентов.

2. Особенностью МАС ИЭСППР является наличие виртуальной памяти и, в случае использования агентами процессов на основе системных объектов fibers, возможность управления размером выделяемого приложению виртуального адресного пространства. Если используются процессы на основе системных объектов fibers, то количество процессов ограничено 2000, что в случае использования одним агентом одного процесса дает ограничение 2000 агентов. Если же подобный тип процессов не

используется, то максимальное количество агентов зависит только от объема свободной виртуальной памяти и уже на персональном компьютере может достигать 200 - 300 тысяч (1 Мб примерно соответствует 1-3 тысячам агентов).

3. Важным достоинством МАС ИЭСППР является сохранение полного контроля за исполнением процессов за разработчиками системы, что позволяет в дальнейшем обеспечить пользователя разнообразными инструментами проектирования прикладных мультиагентных систем, легко перейти с одной платформы на другую, от однопроцессорных систем – к многопроцессорным и т.д.

## Список литературы

1. Шостак, И.В. Программное обеспечение для комплексной автоматизации сборочного производства самолетостроительного предприятия [Текст] / И.В. Шостак // Системы обработки информации - X: ХУПС. - Вип. 7(105), 2012. – С. 262 – 269.
2. Шостак, И.В. Агрегация данных для формирования виробничих рішень на промислових підприємствах із використанням онтологічних систем [Текст] / И.В. Шостак, А.П. Собчак, Г. Фірсова, О. Кушнарченко // Траєкторія науки. – X., 2016. – Т. 2, №3(8). – С. 1-10.
3. Компьютеризация информационных процессов на промышленных предприятиях [Текст] / В.Ф. Сьтник, Х. Срока, Н.В. Еремينا и др. – К.: Техника, 1991. – 215 с.
4. Косенко, М.Ю. Метод идентификации ботнетов на основемногоагентного подхода [Текст] / М.Ю. Косенко, А.В. Мельников // Системний аналіз і інформаційні технології. – Воронеж: Вестник ВГУ, 2015. - №2. – С. 89 – 96.
5. Собчак, А.П. Информационная технология синтеза интегрированной системы піддержки прийняття рішень на віртуальному приборостроительном підприємстві [Текст] / А.П. Собчак, И.В. Шостак // ScienceRise. – X., 2016. - №3/2(20). – С. 54-58.

Надійшла до редколегії 11.08.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Рудницький, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси.

## ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ СТВОРЕННЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ВІРТУАЛЬНОМУ ВИРОБНИЧОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

І.В. Шостак, М.О. Данова, Р.Б. Капитан

*Описано спеціалізоване інструментальне середовище у формі мультиагентної системи (МАС) для створення і розгортання інтегрованої експертної системи підтримки прийняття рішень (ІЕСППР) при управлінні віртуальними виробничими підприємствами. МАС ІЕСППР має в своєму складі інструментарій інженерії знань, призначений для створення онтологічної системи, і програмний інструментарій, призначений для розробки нових модулів розширення виконуючої системи. Показано, що механізми виконання МАС ІЕСППР досить ефективні і мало залежать від кількості потоків виконання, при цьому особливостями даного інструментального середовища є наявність віртуальної пам'яті і, в разі використання агентами процесів на основі fibers, можливість управління розміром віртуального адресного простору, який виділяється застосунку.*

**Ключові слова:** інструментальне середовище, програмний комплекс, мультиагентна система, підтримка прийняття рішень, експертна система, онтологічна система, віртуальне виробниче підприємство.

## INSTRUMENTAL ENVIRONMENT FOR CREATING A MULTI-AGENT EXPERT SYSTEM SUPPORTING DECISION MAKING IN A VIRTUAL INDUSTRIAL ENTERPRISE

I.B. Shostak, M.O. Danova, R.B. Captain

*A specialized tool environment in the form of a multi-agent system (MAS) is described for the creation and deployment of an integrated expert decision support system (IEDSS) in the management of virtual industrial enterprises. MAS IEDSS includes a knowledge engineering tool for creating an ontological system, and a software toolkit designed to develop new extension modules for the runtime system. It is shown that execution mechanisms MAS IEDSS are rather effective and depend on quantity of flows of execution a little, at the same time features of this instrumental environment are existence of the virtual storage and, in case of use by agents of processes on the basis of system objects of fibers, a possibility of control of the size of the virtual address space selected to application.*

**Keywords:** instrumental environment, program complex, multiagentny system, decision-making support, expert system, ontological system, the virtual industrial enterprise.