

МЕТОДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КООРДИНАЦИИ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ВЫСШЕГО ТИПА

И.Н. Парасюк, С.В. Ершов

Институт кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,
03680, Киев-187, проспект Академика Глушкова, 40.
Тел. 526 6422, e-mail: ivpar1@i.com.ua

Разработана динамическая архитектура мультиагентных систем на основе нечеткой логики высшего типа, позволяющая более информативно представить степень неопределенности системы нечетких правил при спецификации поведения интеллектуальных агентов и систем. Предложен метод взаимодействия нечетких агентов, базирующийся на значениях "речевых актов", позволяющий обрабатывать намерения о сотрудничестве, связанном с предложением, сопровождающимся нечетким значением типа 2. Разработана ролевая модель координации поведения нечетких агентов, основанная на протоколах обмена сообщениями, задающая функциональность агентов в рамках мультиагентной системы. Поведение агента, соответствующее ролевым сущностям, формализовано правилами принятия решений на основе нечеткой логики типа 2.

Dynamic architecture of intelligent multi-agent systems based on fuzzy logic of a higher type that allows more informative to present uncertainty of fuzzy rules when specifying the behavior of such systems and agents is developed. A method of fuzzy agents interactions based on the values of "speech acts", which allows to handle intent on cooperation associated with the proposal, followed by type 2 fuzzy value is proposed. Role-based coordination model of fuzzy agents behavior based on message exchange protocol that defines the functionality of agents within the multi-agent system is developed. Agent's behavior that corresponds to role entities is formalized by decision rules based on type 2 fuzzy logic.

Введение

Интеллектуальные мультиагентные системы состоят из множества агентов – автономных программ, которые способны решать задачи либо самостоятельно, либо сотрудничая с другими агентами. Автономия интеллектуального агента реализуется независимым процессом, индивидуальными знаниями агента и способностью взаимодействовать с другими агентами и средой (восприятие, действие). Агент расположен в среде, которую он воспринимает, и на состояние которой он влияет посредством действий [1]. Эта среда может состоять из других агентов, с которыми он взаимодействует. Модели агентов с сильными интерактивными возможностями (коммуникация, сотрудничество и т. д.) могут быть использованы в качестве основных компонентов для проектирования сложных мультиагентных систем [1, 2].

Из-за неопределенности характера взаимодействия и сотрудничества агентов при решении практических задач необходимо использование интеллектуальных агентов с нечеткой логикой [3–5], реализующих распределенную деятельность сложной мультиагентной системы. Интеллектуальные агенты могут вырабатывать более адекватные решения относительно своих дальнейших действий с учетом нечеткой информации в процессах на основе взаимодействия [6, 7].

Очень часто границы "информационных гранул", представляемых нечеткими множествами, плохо различимы, выражены некоторыми зонами. В этом случае их можно выразить нечеткими множествами высшего типа. Так у нечетких множеств типа 2 отдельные значения принадлежности задаются функциями принадлежности, т. е. учитывается "размытость" определения принадлежности. Они выражают субъективную и лингвистическую неопределенность, связанную с различными оттенками смысла информационных гранул. При реальном взаимодействии интеллектуальных агентов передаваемые значения (гранулы) имеют неточный, "размытый" смысл.

Уместно отметить, что создание агентов, использующих преимущества нечеткой логики высшего типа (в частности, типа 2), требует разработки архитектурных моделей нечетких агентов, моделей коллективного поведения группы агентов, методов координации и взаимодействия таких агентов, учитывающих особенности представления нечеткой информации. Это важно, например, при решении таких прикладных задач, как исследование эффективности процессов эвакуации людей в чрезвычайных ситуациях, поведения транспортных средств в условиях неопределенности (неполной информации) и ряда других задач.

Цель настоящей работы – обоснование методов взаимодействия и координации в интеллектуальных мультиагентных систем с использованием нечеткой логики высшего типа, что позволяет более информативно представить степень неопределенности лингвистического представления фактов и знаний (убеждений) при моделировании структуры и группового поведения интеллектуальных агентов в нечеткой среде.

Взаимодействие в мультиагентных системах

Взаимодействие является одним из важнейших аспектов проектирования мультиагентных систем. Взаимодействие в мультиагентных системах можно отнести к двум типам. Мультиагентные системы могут исполь-

зовать как локальное информационное взаимодействие (передачу сообщений) так и сетевое взаимодействие (или архитектура “доски объявлений”).

Локальное взаимодействие. При локальном взаимодействии не предусмотрено долговременное хранение сообщений. Такое взаимодействие не использует в качестве посредника промежуточные коммуникационные средства. Чтобы подчеркнуть непосредственное взаимодействие между агентами, используется понятие “передача сообщений”. При этом типе взаимодействия передача сообщений является двунаправленной. Такой децентрализованный тип взаимодействия повышает отказоустойчивость по причине неисправностей отдельных агентов. Передача сообщений между агентами описана в работах [2, 8].

Архитектура “доски объявлений”. При взаимодействии на основе данной архитектуры, группа агентов совместно использует хранилище данных, которое предоставляет эффективное хранение/поиск данных и совместно используется агентами в группе [9]. Типы данных, которые могут быть доступны агентам, можно контролировать с использованием управляющей оболочки (сетевого интерфейса), уведомляющей агентов об изменении данных в репозитории. Основная проблема такой архитектуры связана с отказами “доски”, что может нарушить взаимодействие в группе агентов. Тем не менее, при таком взаимодействии можно установить некоторую избыточность хранилищ и использовать ресурсы, распределенные между различными досками.

Язык коммуникации агентов. Увеличение количества агентов и их неоднородность требует использования унифицированного языка коммуникации агентов с целью обеспечения надлежащего взаимодействия и обмена информацией. Элементы, которые имеют первостепенное значение при проектировании такого языка заключаются в следующем [8]:

- 1) общий языковой формат взаимодействия (протокол), который может однозначно интерпретирован всеми участвующими агентами,
- 2) общая онтология, обеспечивающая одинаковое значение одного и того же передаваемого сообщения в любом контексте и независимую от отдельных агентов семантику таких сообщений.

Основные подходы при проектировании языков коммуникации агентов – это процедурный и декларативный подходы. При процедурном подходе, взаимодействие между агентами моделируется как обмен процедурными директивами. При декларативном подходе, язык коммуникации агентов основан на обмене декларативными заявлениями, указывающими определения, допущения, утверждения, аксиомы и т.д. Для правильного проектирования языка коммуникации, декларативные заявления должны быть достаточно выразительны, чтобы охватить использование агентами самой разнообразной информации. Декларативные заявления должны быть короткими и точными, так как увеличение длины потенциально сказывается на скорости взаимодействия и вносит вероятность искажения информации.

Для удовлетворения всех перечисленных выше требований разработан язык коммуникации агентов, состоящий из трех частей: словарь, внутренний язык и внешний язык. Внутренний язык отвечает за перевод информации в логическую форму, которая понятна всем агентам. Как вариант внутреннего языка рассматривается KIF (Knowledge Interchange Format, Формат обмена знаний) [10]. Лингвистическое представление, созданное этими внутренними языками, является кратким, однозначным и зависит от контекста. Для каждого лингвистического представления, язык коммуникации поддерживает большой репозиторий словарного запаса открытого состава.

Knowledge Interchange Format [10] – один из самых известных внутренних языков и основан на исчислении предикатов первого порядка. Информация, которая может быть представлена с использованием KIF – примитивные данные, ограничения, отрицания, дизъюнкции, правила, информация метауровня, которая помогает агентам в процессе принятия решения. Поскольку бывает необходимо добавить много неявной информации в сообщение, для обмена информацией нельзя использовать только один формат KIF. Чтобы решить эту проблему, были разработаны высокоуровневые языки, использующие внутренний язык в качестве основы. Такие высокоуровневые языки делают взаимодействие между агентами независимым от синтаксиса содержимого и онтологии. Хорошо известный высокоуровневый внешний язык данной – KQML (Knowledge Query and Manipulation Language, Язык запросов и манипулирования знаниями) [11].

KQML задуман и как формат сообщения и как протокол обработки сообщений, чтобы содействовать бесперебойному взаимодействию между агентами. KQML состоит из трех уровней: уровень коммуникации, указывающий информацию об агенте-отправителе и агенте назначения, метку или идентификатор запроса; уровень сообщений, который определяет выполняемую функцию; уровень содержания, обеспечивающий необходимые детали для выполнения конкретного запроса. В KQML уровень коммуникации – низкоуровневый на основе пакетов. Коммуникационные потоки KQML могут быть построены на основе TCP/IP, UDP или на основе любого другого протокола передачи пакетов.

Координация в мультиагентных системах

Координация является важнейшим аспектом проектирования мультиагентных систем, содержащих большое количество функционирующих параллельно агентов, часто для достижения общей цели. В работе [12] выделены основные причины, требующие координации между агентами: выполнить глобальные ограничения задачи, использовать распределенные ресурсы, экспертные знания и информацию, предотвратить конфликты между агентами, повысить общую эффективность системы.

Координація може бути досягнута путем применення обмежень на вибор дій кожного агента или путем использованием информации, полученной от других агентов. Проблема координации может быть решена путем уменьшения количества вариантов действий, заключающегося в применении ограничений или назначении роли каждому агенту. После того как агенту назначается определенная роль, количество разрешенных вариантов действий уменьшается. Такой подход является основой распределенного метода координации.

Тем не менее, при централизованном методе координации назначение ролей не требуется, так как такой метод основан на модели клиент/сервер. При таком централизованном методе для обмена информацией между агентами используется архитектура “доски объявлений”. Ведущий агент определяет каждому из подключенных агентов обязанность читать и обновлять информацию в центральном репозитории. Недостаток централизованной координации состоит в дезинтеграции системы в результате отказа репозитория или агента-посредника.

Координация посредством протокола. Агенты обмениваются друг с другом информацией посредством переговоров. Протокол взаимодействия агентов в распределенной мультиагентной системе определяет схему (распределенный алгоритм), по которой ведутся такие переговоры. Протокол, как правило, задается на языке высокого уровня, который определяет способ координации между агентами и представляет собой ряд методов распределения задач и ресурсов. Наиболее широко используемый протокол – протокол контрактных сетей (Contract Net Protocol) [8, 13], который упрощает использование распределенного управления выполнением совместной задачи на основе сотрудничества. Протокол определяет, какая информация должна быть передана между агентами и формат этой информации. Для представления такой информации может быть использован язык низкого уровня, например, KIF.

Переговорный процесс должен удовлетворять следующим характеристикам:

1. переговоры – локальный процесс между агентами, при котором не используется централизованное управление;
2. существует возможность установления двухсторонней связи между всеми участвующими агентами;
3. каждый агент принимает решение о дальнейших переговорах на основе своей собственной модели среды;
4. окончательное соглашение производится посредством выбора общего плана действий.

Каждый агент по мере необходимости выполняет роли “Менеджер” и “Подрядчик”. По существу, если в процессе решения агент-менеджер не в состоянии решить некоторую задачу, он ищет другой подходящий агент, который способен ее решить. Его роль состоит в разбиении сложной задачи на меньшие подзадачи и нахождении агентов-подрядчиков, которые могут эффективно выполнить эти задачи. Каждый агент-подрядчик контрактной сети способен выполнять определенные задачи. Подрядчик может стать агентом-менеджером и распределить подзадачу между агентами-исполнителями для того, чтобы сократить собственные затраты времени на ее решение. Менеджер заключает договор (контракт) с агентом-подрядчиком через процесс торгов (конкурса). В процессе осуществления конкурса, агент-менеджер задает тип требуемого ресурса и описание решаемой задачи. Агенты, которые находятся в режиме ожидания и имеют ресурсы, необходимые для выполнения задачи, представляют предложения с указанием их возможностей. Если на объявление решаемой задачи отвечают несколько агентов, то агент-менеджер, пользуясь некоторым критерием, оценивает полученные заявки, выбирает наиболее подходящего подрядчика и присуждает контракт. В случае недоступности какого-либо подходящего агента-подрядчика, агент-менеджер ждет определенный период времени, прежде чем повторить предложение контракта всем агентам.

Модель FIPA [8] является примером агентной платформы, которая использует протокол контрактных сетей для достижения координации между агентами. FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents, Фонд интеллектуальных физических агентов – модель, разработанная для стандартизации агентной технологии. FIPA имеет свой собственный язык коммуникации агентов, который служит в качестве основы для спецификации протокола контрактных сетей.

Обычно общая стратегия переговоров достигается за счет итерационной коммуникации, где параметры переговоров постепенно модифицируются до достижения точки равновесия. Поэтому для решения сложных задач протокол контрактных сетей требует значительного количества обмена сообщениями.

Теория речевых актов. Переговоры строятся с использованием небольшого числа примитивов, называемых речевыми актами, например, *inform* (сообщить), *ask* (запросить), *confirm* (подтвердить), *reply* (ответить), *diffuse* (распространить), *accept* (согласиться) [8, 13]. Процесс переговоров начинается тогда, когда агент посылает сообщение, содержащее его точку зрения (позицию) по некоторому вопросу. Посредством обмена сообщениями *ask*, *inform*, *reject* агенты могут обсуждать некоторую задачу и приходиться к общему решению. Во время переговоров агенты обновляют свои базы знаний и, тем самым, повышают свои способности взаимодействия, отвечая на новые запросы.

Представление субъективной неопределенности в мультиагентных системах

Понятие нечеткого множества типа 2 было введено Заде [14] как расширение понятия обычного нечеткого множества (типа 1). Нечеткое множество типа 2 характеризуется функцией принадлежности, значение принадлежности для каждого элемента такого множества задается не отдельным значением, а функцией при-

надлежности в диапазоне [0, 1]. Выбор функции принадлежности является субъективным процессом, это означает, что разные эксперты могут прийти к построению разных множеств для одного и того же понятия. Это субъективность происходит из-за индивидуальных различий в восприятии и выражения абстрактных понятий экспертами.

Если функция принадлежности определена как обычное нечеткое множества, она основана на субъективном мнении одного или нескольких экспертов, и показывает не более одного значения для каждого элемента множества. Поэтому в случаях, когда эксперты имеют несколько различных мнений, и все они считаются действительными, неопределенность значения принадлежности нельзя выразить только одним значением. Такая же ситуация возникает в случае, если невозможно точно задать значение принадлежности, а только утверждать что оно находится в определенном диапазоне, или распределено по определенному закону. Именно нечеткие множества типа 2 позволяют эффективно представлять такого вида “размытые” неопределенности. На рис. 1 показано два нечетких множества с треугольной функцией принадлежности: обычное (типа 1) и типа 2.

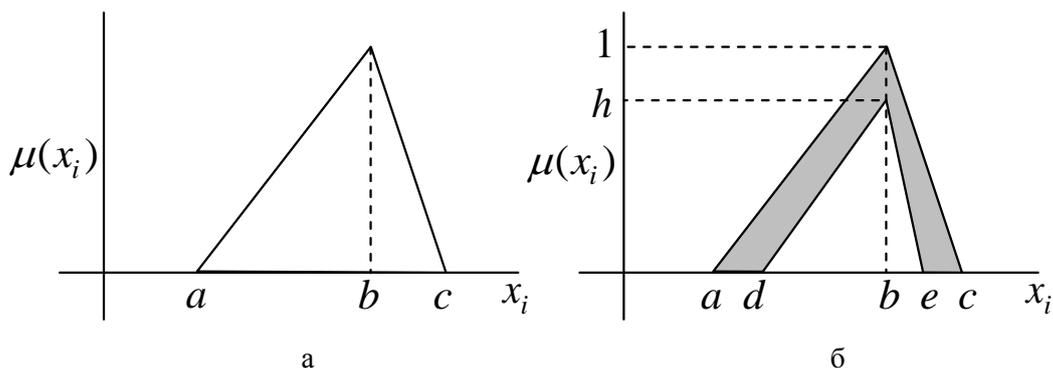


Рис. 1. а – нечеткое множество обычного типа и б – нечеткое множество типа 2

На рис. 1 а показано множество значений $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$, где $A \subseteq X$, X – пространство допустимых значений и $\mu_A(x)$ – функция принадлежности, которая задает отображение каждого значения X на значение принадлежности между 0 и 1; б – множество значений – $\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u)\}$, где функция $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ в диапазоне [0, 1] задает вторичное значение принадлежности для каждого элемента x и первичного значения принадлежности u . Треугольная функция принадлежности нечеткого множества задается следующей функцией с параметрами $a < b < c$:

$$\mu_A(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x - a) / (b - a), & a \leq x \leq b \\ (c - x) / (c - b), & b < x \leq c, \\ 0, & c < x. \end{cases}$$

Интервальное нечеткое множество типа 2 может быть задано параметрически двумя функциями принадлежности [15, 16] – верхней и нижней функцией принадлежности, обозначаемыми соответственно как $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x, a, b, c, 1)$ и $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x, d, e, h)$ (см. рис. 1). Поэтому для компактного представления нечеткого множества типа 2 (нормализованного) достаточно последовательности, состоящей из шести чисел-параметров: (a, b, c, d, e, h) .

Основу функционирования интеллектуального агента, основанного на нечеткой логике типа 2, составляет система правил нечеткого вывода ЕСЛИ-ТО, но ее множества антецедентов или консеквентов этих правил – нечеткие множества (или нечеткие числа) типа 2. Основными компонентами архитектурной модели такого нечеткого агента являются следующие: фузификатор, система правил, средства нечеткого вывода и процессор выходных значений. Процессор выходных значений состоит, соответственно из редуктора типа - создающего на выходе нечеткое множество типа 1 и дефузификатора – генерирующего соответствующего ему четкого значения. В непрерывном случае редукция нечеткого множества типа 2 оказывается сложной вычислительной задачей. Эта задача упрощается, если функции принадлежности второго порядка имеют интервальный характер [17].

Агенты, которые реализуют процесс определения действий на основе нечеткой математики, называются нечеткими агентами [7]. Были предложены модели таких нечетких агентов для спецификации поведения интеллектуальных мультиагентных систем, в которых агенты принимают решение на основе нечеткой логики в соответствии с базой нечетких правил вывода [3–5]. Нечеткие агенты также используются для достижения таких аспектов поведения, как поддержание дистанции между агентами, согласование скоростей и, соответственно, обход препятствий [6].

Мультиагентная система M_a – нечеткая, если составляющие ее интеллектуальные агенты – нечеткие. Это означает, что агенты имеют нечеткие модели поведения и нечеткие знания, их взаимодействие подразумевает обмен нечеткими значениями и их оценивание. Агенты являются нечеткими, если их модели представления знаний (в том числе используемые ими правила) – нечеткие (т. е. определяется нечеткими значениями принадлежности нечетким множествам), а их поведение задано этими нечеткими моделями. Поведение такого агента может быть задано функциями его восприятия, действия и принятия решения. Восприятия, сделанные нечетким агентом ag , определяется функцией $\Psi_{\Theta} : S \times S_{M_a} \rightarrow \Theta_{ag}$, зависят как от состояния самого агента, так и состояния мультиагентной системы M_a в целом (оценивание восприятий агентом ag зависит как поступивших сообщений от других агентов, так и от нечетких знаний самого агента). Решения, принятые нечетким агентом ag , определяются функцией $\Psi_{\Delta} : \Theta_{ag} \times S_{ag} \rightarrow \Delta_{ag}$, зависят от интерпретации восприятия, сделанных агентом только на основе его нечетких знаний. Действия, выполняемые нечетким агентом ag , целиком определяются функцией $\Psi_A : \Delta_{ag} \times S_{ag} \rightarrow A_{ag}$, т. е. они зависят от решений, принятых агентом и состояния мультиагентной системы M_a .

Роли агентов нечеткие, что означает, что распределение ролей, которые нечеткий агент может выполнять, представляет собой дискретное нечеткое множество. В каждый момент времени, можно определить роли, которые выполняет агент на основе значений принадлежности каждой возможной роли и установки минимального порогового значения, при котором агенту следует выполнять эти роли.

Взаимодействие между нечеткими агентами

В мультиагентных системах взаимодействие представляет собой последовательный обмен сообщениями между агентами и их средой (см. рис. 2 а). Этот обмен зависит от внутренних свойств среды, в которой функционируют агенты [1, 9]. Агенты считаются пассивными, если начало взаимодействия зависит только при получении сообщений, или активными, если взаимодействие является результатом действий самого агента. Коммуникация – это взаимодействие между агентами, при котором используются средства речевых актов (см. рис. 2 б).

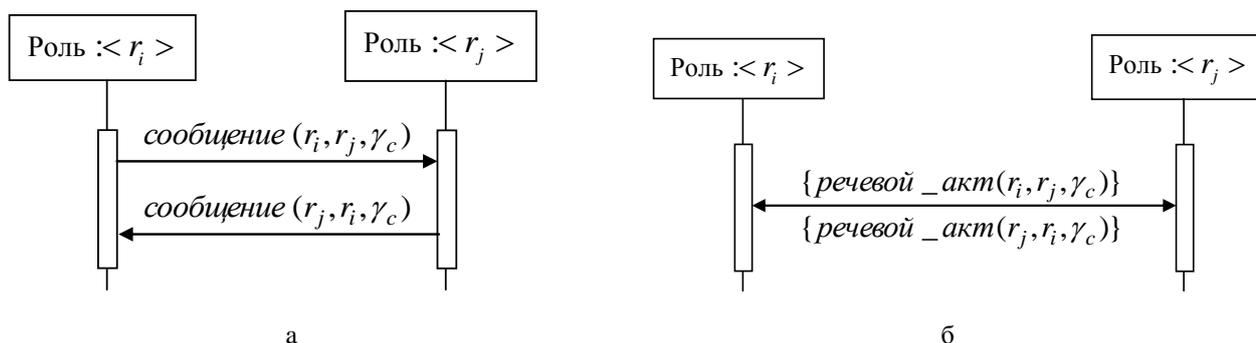


Рис. 2. Схематическое представление взаимодействия и коммуникации между нечеткими агентами

Коммуникация в мультиагентной системе может быть выполнена в двух режимах:

- 1) адресная коммуникация, при которой агент-отправитель посылает сообщение одному или нескольким агентам-получателям, основной единицей в этой коммуникации является речевой акт [8, 13];
- 2) безадресная коммуникация, при которой агент-отправитель посылает сообщение всем агентам, имеющимся в среде (без указания агентов-получателей). Если взаимодействия между агентами осуществляются достаточно часто, они могут быть основаны на моделях координации действий [18]. Подходы к координации в мультиагентных системах делятся на шесть основных категорий: распределенное решение задач, протоколы, переговоры, формирование коалиций, организационная структура, планирование.

Взаимодействие $i \in I$ между двух нечеткими агентами определяется следующим кортежем:

$$i = \langle r_s, r_t, \gamma \rangle,$$

где r_s – роль агента-источник взаимодействия, r_t – роль агента назначения взаимодействия, γ – сообщение, содержащее нечеткое значение. Целевой агент всегда оценивает нечеткое значение, содержащееся в сообщении, чтобы определить степень интереса, которую участие в этом взаимодействии может для него представлять.

С целью обмена информацией, запроса услуг, переговоров относительно нечетких значений и т.д., агенты выражают свои намерения в соответствии с языковыми средствами теории речевых актов [8, 13]. Основных речевых актов достаточно для того, чтобы нечеткие агенты воспринимали намерения о сотрудничестве, связанном с предложением, задаваемым сообщением. Такое взаимодействие задается протоколом, при котором для

некоторых взаимодействий требуется формирование агентом ответного сообщения (рис. 3). При таком взаимодействии, исходный агент выбирает свой агент назначения в соответствии со своими намерениями в контексте конфигурации решения.

Коммуникация $\lambda_{s,t}$ между двух нечеткими агентами определяется следующим образом:

$$\lambda_{s,t} = \langle \lambda, r_s, r_t, \tau, \bar{\mu}, \underline{\mu} \rangle,$$

что можно представить как $i = \langle r_s, r_t, \gamma \rangle$ и $\gamma = \langle \lambda_{s,t}, \tau, \eta \rangle$, где $\lambda_{s,t} \in \Gamma_{ri}$ – множество действий, которые нечеткий агент роли r_i может выполнить, $\lambda \in \Lambda$ – речевой акт, обозначаемый перформативным глаголом, r_s – нечеткий агент-источник коммуникации, r_t – нечеткий агент-получатель, $\tau \in T$ – это тип сообщения, $\langle \bar{\mu}, \underline{\mu} \rangle$ – нечеткое значение, представляющее собой нечеткое множество типа 2, которое может быть значением утверждения, вопроса, ответа и т. д. Например, при получении сообщения, соответствующего речевому акту "информировать" $\lambda_{s,t} = \langle inform, r_s, r_t, \tau = FS2, \bar{\mu}, \underline{\mu} \rangle$ агент может выделить содержащееся в нем значение нечеткого множества типа 2: $(\bar{\mu}(0; 2; 4; 1), \underline{\mu}(1; 2; 3; 0,8))$.

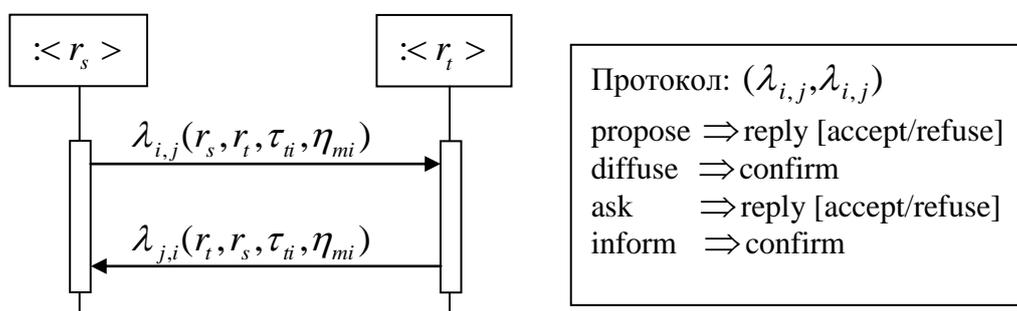


Рис. 3. Коммуникационный протокол между нечеткими агентами

Каждый нечеткий агент играет одну или несколько предустановленных ролей, границы которой определены его компетенцией в рамках мультиагентной системы. Поведение агента, соответствующее таким ролям формализуется его нечеткими правилами принятия решений. Нечеткие правила принятия решений Δ_{r_i} нечеткого агента роли r_i , представляющие его совокупную базу знаний, описываются следующим образом:

$$\Delta_{r_i} = \langle E_{r_i}, X_{r_i}, \Gamma_{r_i} \rangle,$$

где E_{r_i} – множество нечетких значений, соответствующих событиям, на которые агент r_i может реагировать, X_{r_i} – множество нечетких значений, связанных с внутренними состояниями агента r_i , и Γ_{r_i} – множество действий, которые агент роли r_i может выполнять. В общем случае такими действиями могут быть послышки сообщений другому агенту, содержащие значение речевого акта и нечеткое значение, вырабатываемое системой нечетких правил.

Например, рассмотрим правило δ_1 такое, что:

$$e_1 = \langle inform, r_s, r_t, t = 2, \bar{\mu}, \underline{\mu} \rangle, \quad x_1 = \langle (\bar{\mu}, \underline{\mu}) \geq (0,6; 0,4) \rangle, \quad \gamma_1 = \langle diffuse, r_t, A_t, t = 2, \bar{\mu}, \underline{\mu} \rangle.$$

Это правило означает, что в качестве нечеткого события e_1 нечеткий агент r_t получает сообщение типа t , значение которого равно 2 (что соответствует передаче нечеткого значения типа 2), с помощью которого нечеткий агент r_s сообщает r_t значение $(\bar{\mu}, \underline{\mu})$. При условии x_1 : "значение верхней функции принадлежности $\bar{\mu}$ должно быть больше, чем пороговое значение 0,6, а нижней функции принадлежности $\underline{\mu}$ – больше 0,4" будет запускаться действие γ_1 : агент r_t будет передавать это нечеткое значение $(\bar{\mu}, \underline{\mu})$ всем агентам коалиции A_t .

Архитектура нечетких мультиагентных систем

Проблемы, возникающие из-за частичного знания агентами своей среды, требуют разработки сложных координационных механизмов [1, 18]. Архитектура мультиагентной системы контролирует и координирует

взаимодействие между агентами системы, тем самым структурируя их виды деятельности с целью достижения требуемого поведения. В общем случае архитектура мультиагентной системы рассматривается как "совокупность ролей, которые состоят в определенных отношениях друг с другом, и, которая принимает участие в систематических институциональных формах взаимодействия с другими ролями" [19].

Архитектура мультиагентной системы задает совокупность агентов, поведение и функции которых определены нечеткими правилами. Такая совокупность может быть разделена на коалиции агентов, имеющих общие цели и характеристики. Агент может состоять одновременно в нескольких коалициях. Он может выполнять одну или несколько ролей в коалициях, к которым он принадлежит. Чтобы выполнять свою роль, агент может взаимодействовать с агентами своего коалиции или других коалиций. Таким образом, роль является абстрактным представлением функции, выполняемой агентом в коалиции.

При динамической архитектуре, роли нечетких агентов могут стать динамическими и определяется следующим образом

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}.$$

Тогда, нечеткое множество ролей, которые выполняет агент ag определяется по формуле (13):

$$R(ag) = \{\mu_{r_1}(ag), \mu_{r_2}(ag), \dots, \mu_{r_n}(ag)\}.$$

Пусть $\Omega_R : Ag \rightarrow \{R\}$ – функция "играть роль", тогда роли $r_j \in R$, которые играет нечеткий агент ag задаются $\Omega_R : (ag_i, r_j) \rightarrow \{\mu_{r_j}(ag_i)\}$, где $j \in J_R$, $J_R = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество всех ролей. Архитектура мультиагентной системы нечеткая (и динамическая), поскольку распределение ролей, выполняемых нечеткими агентами постоянно изменяется.

Нечеткую систему на основе агентов можно разделить на множество коалиций следующим образом:

$$Ag_1 \subseteq Ag, \dots, Ag_i \subseteq Ag,$$

где i – число коалиций.

Для каждой коалиции может быть определена основная роль, которую нечеткие агенты будут выполнять в этом сообществе. Считается, что каждый агент принадлежит к коалиции, в которой он играет свою основную роль:

$$\forall ag \in Ag \exists x (ag \in Ag_x \wedge \max(\Omega_R(ag, r_x))).$$

Нечеткие агенты взаимодействуют, посылая сообщения агентам своей коалиции (как правило, они предназначены для выполнения их главной роли). Они также взаимодействуют с нечеткими агентами из других коалиций, в этом случае они могут участвовать в других ролях.

Если нечеткий агент ag_i взаимодействует с агентом ag_j из другой коалиции то он участвует в выполнении его роли r_j :

$$\forall ag_i \in A \exists x (r_x \in R \wedge ag_j \in A_x \wedge \max(\Omega_R : (ag_j, r_x)) \wedge \lambda_{i,j}(r_i, r_j, \tau, \bar{\mu}, \underline{\mu}) \Rightarrow \max(\Omega_R : (ag_i, r_x))).$$

Каждый агент действует автономно в соответствии с его собственными нечеткими правилами вывода. К ним относятся нечеткие правила, которые определяют его поведение, а также нечеткие правила, которые определяют взаимодействия с другими нечеткими агентами.

Иерархическая нечеткая мультиагентная система представляет собой подробное представление отдельного нечеткого агента для упрощения нечетких баз правил с явным учетом отдельных агентов и взаимодействия между ними. Кроме того, дополнительная эффективность достигается за счет возможности лучшего представления одновременного воздействия уменьшенного количества входов на отдельные (упрощенные) базы правил. Однако, при этом теряется точность из-за накопления ошибок в результате повторяющегося применения фузификации, нечеткого вывода, редукции типа и дефузификации в течение нескольких циклов работы такой системы. Для повышения точности редукция типа с дефузификацией и дальнейшей фузификацией промежуточных переменных могут отсутствовать, нечеткое значение, представляющее собой нечеткое множество типа 2 непосредственно передается между агентами.

Обобщением такой модели мультиагентных систем является ее представление как виртуальной сетки (grid). Каждый агент представлен вершиной сетки в то время как взаимодействие между агентами – соединениями между этими вершинами. Модель мультиагентной системы с $p \times q$ вершинами $\{N_{11} \dots N_{p1}\}, \dots, \{N_{1q} \dots N_{pq}\}$, $p \times q$ входами вершин $\{x_{11} \dots x_{p1}\}, \dots, \{x_{1q} \dots x_{pq}\}$ принимающими лингвистические значения из любых допустимых входных множеств, $p \times q$ выходами вершин $\{y_{11} \dots y_{p1}\}, \dots, \{y_{1q} \dots y_{pq}\}$ принимающие лингвистические значения из любых допустимых множеств выходов, состоящая из p горизонтальных уровней и q вертикальных ярусов (слоев), может быть описана формулой (1).

$$\begin{array}{l}
 \text{Ярус 1} \dots\dots\dots \text{Ярус } q \\
 \text{Уровень 1 } N_{11}(x_{11}, y_{11}) \dots\dots\dots N_{1q}(x_{1q}, y_{1q}) \\
 \dots\dots\dots \\
 \text{Уровень } p \ N_{p1}(x_{p1}, y_{p1}) \dots\dots\dots N_{pq}(x_{pq}, y_{pq}) .
 \end{array} \tag{1}$$

Структура сетки в формуле (1) определяет местоположение агентов, а также их входы и выходы. В этом случае, каждый вход и выход может быть как скаляром так вектором, представляющим набор нечетких значений типа 2. Уровни в этой структуре сетки представляют собой пространственные иерархии узлов в плане субординации в пространстве, тогда как ярусы задают временную зависимость с точки зрения последовательности выполнения. Однако, формула (1) не дает никакой информации о соединениях между вершинами в виртуальной сетке. Такая информация содержится в структуре соединений в формуле (2), согласно которой $p \times (q - 1)$ соединений узлов $\{z_{11,12} \dots z_{p1,p2}\}, \dots, \{z_{1q-1,1q} \dots z_{pq-1,pq}\}$ принимают лингвистические значения из допустимых множеств для соответствующих выходов и входов узла.

$$\begin{array}{l}
 \text{Ярус 1} \dots\dots\dots \text{Ярус } q-1 \\
 \text{Уровень 1 } z_{11,12} = y_{11} = x_{12} \dots\dots\dots z_{1q-1,1q} = y_{1q-1} = x_{1q} \\
 \dots\dots\dots \\
 \text{Уровень } p \ z_{p1,p2} = y_{p1} = x_{p2} \dots\dots\dots z_{pq-1,pq} = y_{pq-1} = x_{pq} .
 \end{array} \tag{2}$$

Для единообразия, мультиагентные системы, описываемые выражениями (1) и (2) предполагают наличие узлов в каждой ячейке базовой структуры сетки. Однако, не все ячейки в модели должны быть заполнены агентами. Для упрощения, все соединения в вышеприведенной модели – между узлами одного уровня и в соседних ярусах. Тем не менее, некоторые соединения в мультиагентной системе могут быть между агентами на разных уровнях или агентами несоседних ярусов.

Пример взаимодействия и координации нечетких агентов

Рассмотрим процесс координации между нечеткими агентами для задачи управления подачей газа конечным потребителем. Управление подачей газа осуществляется путем частичного или полного открытия/закрытия вентиля (заслонки), от положения которого зависит давление в трубе. Задача – не допустить значительного отклонения давления. Поскольку потребление ресурса может существенно колебаться, принятие решения о положении вентиля не может быть осуществлено только на основании объема потребления. Следует учитывать также другие факторы – например, температуру воздуха, время суток. Кроме того, показания датчиков для снижения их стоимости не могут быть абсолютно точными и вносят дополнительную нечеткость.

Предположим, решение о положении вентиля принимается агентом на основании двух нечетких лингвистических переменных (температуры воздуха и текущего объема потребляемого ресурса). В таблице показаны допустимые значения лингвистических переменных и соответствующих им термов, на основе которых строятся лингвистические правила, на рис. 4 – функции принадлежности нечетких множеств, описывающих лингвистические термы; для простоты используются треугольные функции принадлежности. В таблице представлен набор нечетких правил, осуществляющих управление.

Таблица. Нечеткие лингвистические переменные для агентов управления ресурсами

Лингвистическая переменная	Тип	Лингвистические термы
Температура	Входная	Очень низкая (ОН), ниже нулевой (НН), нулевая (Н), выше нулевой (ВН), очень высокая (ОВ)
Текущий объем потребляемого ресурса	Входная	Очень малый (ОМ), малый (М), средний (СР), большой (Б), очень большой (ОБ)
Изменение степени открытия вентиля	Выходная	Значительно закрыть (ЗЗ), немного закрыть (НЗ), отсутствует (О), немного открыть (НО), значительно открыть (ЗО)

Каждый агент системы подачи газа активизирует нечеткие правила, содержащиеся в его базе знаний, антецеденты которых соответствуют нечеткому представлению событий, получаемому вследствие фузификации входных значений от внешних устройств, производимых периодически другими агентами. Эти правила имеют следующий вид:

$$\delta_x r : \text{ЕСЛИ} \{ \text{событие} \wedge \text{условие} \} \text{ ТО } \{ \text{действие} \} .$$

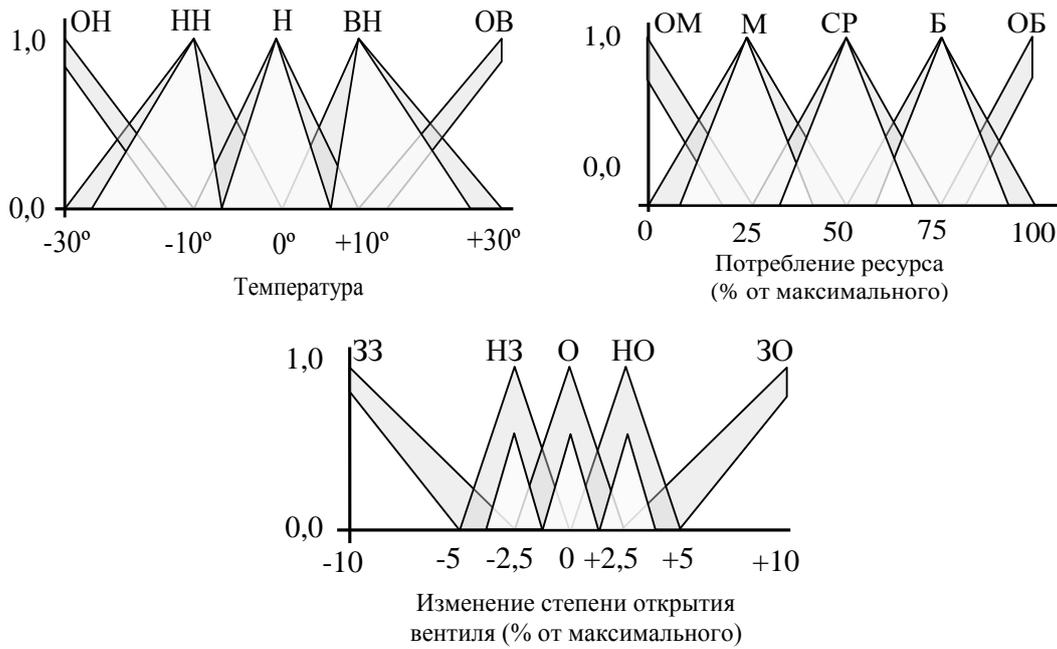


Рис. 4. Функции принадлежности для нечеткого агента

Пусть r_1 – роль агента, вырабатывающего нечеткое значение температуры (типа 2), а r_2 и r_3 – роли агентов, поставляющих нечеткие значения объема потребляемого ресурса и изменения степени открытия вентиля. Приведем примеры некоторых нечетких правил для агента, выполняющего роль r_3 (изменение степени открытия вентиля):

- $\delta_1 r_3$: ЕСЛИ температура=ОВ И потребляемый_ресурс=СР
ТО изменение_открытия_вентиля=ЗО
- $\delta_j r_3$: ЕСЛИ температура=Н И потребляемый_ресурс=М
ТО изменение_открытия_вентиля=НЗ

Задача агентов выполняющих роли r_1 и r_2 – фуззификация поступающих значений и сравнение их с предыдущими значениями $(\bar{\mu}_r, \underline{\mu}_r)$. Если несоответствие новых и предыдущих значений значительно, эти агенты отправляют агенту r_3 сообщение *inform* с указанием новых нечетких значений типа 2 $(\bar{\mu}'_r, \underline{\mu}'_r)$:

- $\delta_k r_1$: ЕСЛИ $(\bar{\mu}'_{r_1}, \underline{\mu}'_{r_1}) \neq (\bar{\mu}_{r_1}, \underline{\mu}_{r_1})$
ТО *inform*($r_1, r_3, T, (\bar{\mu}'_{r_1}, \underline{\mu}'_{r_1})$)
- $\delta_l r_2$: ЕСЛИ $(\bar{\mu}'_{r_2}, \underline{\mu}'_{r_2}) \neq (\bar{\mu}_{r_2}, \underline{\mu}_{r_2})$
ТО *inform*($r_2, r_3, T, (\bar{\mu}'_{r_2}, \underline{\mu}'_{r_2})$)

Для иллюстрации активацию указанных выше правил, рассмотрим схему взаимодействия, показанную на рис. 5. Пусть e_i – событие измерения температуры, e_j – событие измерения потребления ресурсов, a_i – сообщение об изменении температуры, a_j – сообщение об изменении потребления ресурсов, a_k – сообщение о необходимости открытия/закрытия вентиля. Нечеткий агент, выполняющий роль r_1 , отмечает, что произошло изменение температуры (событие e_i). Такой агент фуззифицирует значение, соответствующее событию e_i , получает и оценивает новое интервальное нечеткое множество температуры $(\bar{\mu}'_{r_1}, \underline{\mu}'_{r_1})$, затем информирует нечеткий агент r_3 (действие a_i). Агент роли r_3 запускает систему нечетких правил типа 2, оценивает степень сходства [20] выработанного такой системой правил интервального нечеткого множества $(\bar{\mu}'_{r_3}, \underline{\mu}'_{r_3})$ с каждым нечетким множеством лингвистической переменной “изменение степени открытия вентиля” (ЗЗ, НЗ, О, НО, ЗО) (см. таблицу), а затем вырабатывает сообщение, задающее изменение степени открытия вентиля (действие a_k).

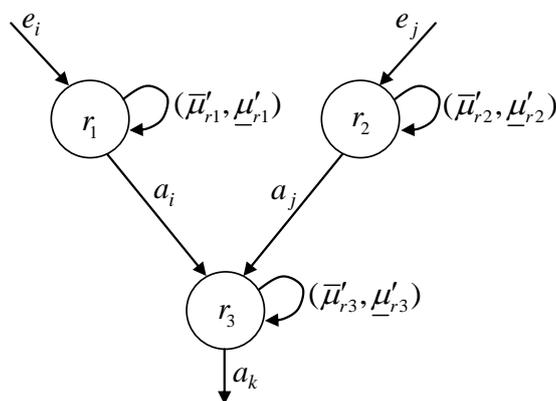


Рис. 5. Схема взаємодія нечітких агентів

Рассмотрим конкретный сценарий взаимодействия между нечеткими агентами, показанный на рис. 6. Рассмотрим, например, новое значение температуры и постоянный объем потребления 30% (рис. 6). Нечеткий агент r_1 получает новое измерение температуры $+2^\circ$, формирует новое интервальное нечеткое множество $(\underline{\mu}'_{r_1}(a,b,c,1), \underline{\mu}'_{r_1}(d,b,e,h)) = (\underline{\mu}'_{r_1}(0; 2; 4; 1), \underline{\mu}'_{r_1}(1; 2; 3; 0,8))$, а затем информирует нечеткий агент роли r_3 об этом новом множестве.

Нечеткий агент роли r_2 ранее информировал агента r_3 относительно нечеткого значения объема потребляемого ресурса $(\underline{\mu}'_{r_2}(a,b,c,1), \underline{\mu}'_{r_2}(d,b,e,h)) = (\underline{\mu}'_{r_2}(26; 30; 34; 1), \underline{\mu}'_{r_2}(28; 30; 32; 0,67))$. Поскольку это значение существенно не изменилось, то взаимодействия между r_2 и r_3 не происходит. Вместо этого, агент, выполняющий роль r_3 запускает систему нечетких правил вывода типа 2 (частью которой являются

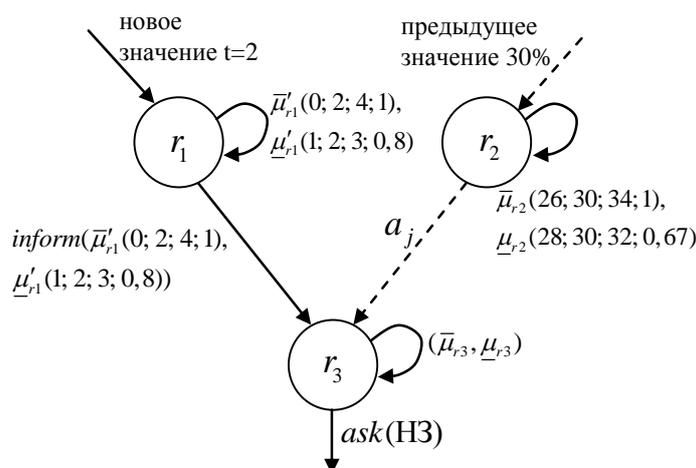


Рис. 6. Сценарій взаємодія нечітких агентів

вышеупомянутые правила δ_i, δ_j), получая в результате нечеткое множество $(\underline{\mu}_{r_3}, \underline{\mu}_{r_3})$, которое в общем случае не может быть представлено в виде треугольного интервального множества типа 2. Затем, оценив степень сходства (алгоритм вычисления которой приведен в [20]) выработанной такой системой правил интервального нечеткого множества $(\underline{\mu}'_{r_3}, \underline{\mu}'_{r_3})$ с каждым нечетким множеством лингвистической переменной “изменение степени открытия вентиля”, этот агент получает новое лингвистическое значение “немного закрыть”, которое передается другому агенту для исполнения.

Выводы

Разработана динамическая архитектура мультиагентных систем на основе нечеткой логики высшего типа, позволяющая более информативно представить степень неопределенности системы нечетких правил при спецификации поведения интеллектуальных агентов и систем. Предложен метод взаимодействия нечетких агентов, базирующийся на значениях “речевых актов”, позволяющий обрабатывать намерения о сотрудничестве, связанном с предложением, сопровождаемым нечетким значением типа 2. Разработана ролевая модель координации поведения нечетких агентов, основанная на протоколах обмена сообщениями, задающая функциональность агентов в рамках мультиагентной системы. Поведение агента, соответствующее ролевым сущно-

ствам, формалізовано правилами прийняття рішень на основі нечіткої логіки типу 2. Розроблено спосіб формування коаліцій нечітких агентів і взаємодія між нечіткими агентами різних коаліцій.

В перспективі розроблені методи взаємодія і координації дозволять моделювати і проектувати складні, розподілені системи програмного забезпечення, ґрунтовані на методології “чисельні со словами”. Вони дозволять зробити представлення знань і моделювання висновків в мультиагентних системах більш наглядним, виводя словесні висновки з посилань, виражених засобами натурального мови.

1. *Wooldridge M.J.* An Introduction to Multi-agent Systems. – Cambridge: MIT Press, 2002. – 366 p.
2. *Sterling L., Taveter K.* The Art of Agent-Oriented Modeling. – Cambridge: MIT Press, 2010. – 367 p.
3. *Парасюк І.Н., Еришов С.В.* Нечіткі моделі мультиагентних систем в розподіленій середі // Проблеми програмування. – 2010. – № 2–3. – С. 330–339.
4. *Парасюк І.Н., Еришов С.В.* Моделі-орієнтована архітектура нечітких мультиагентних систем // Комп’ютерна математика. – 2010. – № 2. – С.139–149.
5. *Еришов С.В.* Принципи побудови нечітких мультиагентних систем в розподіленій середі // Там же. – 2009. – № 2. – С. 54–61.
6. *Парасюк І.Н., Еришов С.В.* Мультиагентні моделі на основі нечіткої логіки вищого типу для високопродуктивної середі // Проблеми програмування. – 2012. – № 2–3. – С. 260–269.
7. *Парасюк І.Н., Еришов С.В.* Трансформаційний підхід к розробці інтелектуальних агентів на основі нечітких моделей // Там же. – 2011. – № 2. – С. 62–78.
8. *Bellifemine F., Caire G., Greenwood D.* Developing Multi-Agent Systems with JADE. – Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2007. – 303 p.
9. *Lander S.E.* Issues in multiagent design systems // IEEE Expert. – 1997. – Vol. 12, N 2. – P. 18–26.
10. *Knowledge Interchange Format (KIF).* – <http://www.ksl.stanford.edu/knowledge-sharing/kif/>.
11. *KQML Papers and presentations.* – <http://www.csee.umbc.edu/csee/research/kqml/papers/>
12. *Nwana H.S., Lee L., Jennings N.R.* Coordination in multi-agent systems / Software Agents and Soft Computing Towards Enhancing Machine Intelligence // LNCS. – 1997. – Vol. 1198. – P. 42-58.
13. *Городецький В.И., Грушинський М.С., Хабалов А.В.* Многоагентні системи (обзор) // Новини штучного інтелекту. – 1998. – № 2. – С. 64–116.
14. *Zadeh L.A.* Fuzzy Logic = Computing With Words// IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1996. – Vol. 4. –P. 103–111.
15. *Mendel J.M., John R.I.* Type-2 sets made simple // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 2002. – Vol.10, № 2. – P.117–127.
16. *Karnik N.N., Mendel J.M., Liang Q.* Type-2 fuzzy logic system // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. – 1999. – Vol.7, № 6. – P.643–658.
17. *Mendel J.M.* Type-2 fuzzy sets and systems: an overview // IEEE Computational Intelligence Magazine. – 2007. – Vol. 2. – P. 20–29.
18. *Bedrouni A., Mitru R. et al.* Distributed Intelligent Systems: A Coordination Perspective. – Springer, 2009. – 181 p.
19. *Wooldridge M., Jennings N.R., David K.* The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2000. – Vol. 3, N 3. – P. 285–312.
20. *Wu D., Mendel J. M.* A comparative study of ranking methods, similarity measures and uncertainty measures for interval type-2 fuzzy sets // Information Sciences. – 2009. – Vol. 179, N 8. – P. 1169–1192.