

Принципы повышения уровня безопасности движения на основе анализа мультимодального взаимодействия водителя транспортного средства и среды

77-48211/469680

Инженерный вестник # 06, июнь 2012

Девятков В.

УДК 004.8

МГТУ им. Н.Э. Баумана

deviatkov@iu3.bmstu.ru

Введение. Можно привести сотни определений, которые пытаются истолковывать смысл понятия «интеллектуальный». Наиболее удачным применительно к мультимодальному интеллектуальному взаимодействию кажется синтетическое определение, базирующееся на умении создавать модели поведения пользователей и среды, модифицировать эти модели в соответствии с текущим состоянием пользователей и среды, предоставлять водителям возможность мультимодального взаимодействия при достижении своих целей адекватно их способностям.

Обычные средства взаимодействия включают в себя клавиатуру и мышь. Для большинства непрофессиональных пользователей эти средства взаимодействия нельзя назвать естественными. Создатели систем интеллектуального взаимодействия стараются расширить средства взаимодействия за счет использования устройств восприятия доступных человеку модальностей (жест, голос). Именно благодаря мультимодальному взаимодействию может быть обеспечено адекватное взаимодействие со средой. Мультимодальные средства взаимодействия делают его доступным для людей различных уровней образования и возраста и дают возможность водителям взаимодействовать с миром посредством комбинаций модальностей, например, речи, жеста, тактильного экрана, дисплея, клавиатуры, указок, тактильных датчиков. Они обеспечивают значительную гибкость, и возможность использования более широким кругом лиц, чем когда-либо прежде. Особо следует отметить такое преимущество мультимодального взаимодействия, как его способность уменьшать вероятность ошибки, по сравнению с унимодальными

взаимодействиями. Для того, чтобы развивать мультимодальное взаимодействие необходимо знание способов интеграции (агрегирования) модальностей. Учитывая сложный характер мультимодального взаимодействия со средой, для того, чтобы создать хорошую мультимодальную систему, необходимо рассмотреть каждую модальность в совокупности с другими. В хорошо разработанной мультимодальной архитектуре различные модальности дополняют друг друга, предотвращают от ошибок унимодальных систем. Развитие мультимодального взаимодействия требует решения задач ввода модальностей и решения вычислительных задач их обработки. При этом отобранные модальности должны допускать указание как элементов геопространственных областей (посредством речи и жестов), так и указание коллективных аспектов работы группы. Решение вычислительных задач требует развития надежно работающих в реальном времени алгоритмов для слежения за многими людьми, распознавания динамических жестов, распознавания произносимых слов и т.п.

Особую роль в интеллектуальном взаимодействии играет естественный язык, используемый пользователем как входная и выходная модальность. Средства взаимодействия воспринимают речь водителя и реагируют на нее также речевым образом. К сожалению, долгие годы исследований в этом направлении так и не привели к настоящему времени к созданию систем, способных полностью взаимодействовать с водителем на речевом уровне. Однако определенные успехи в этом направлении достигнуты.

В частности, процесс преобразования аналогового речевого тренда в последовательность цифровых значений, которые используются для распознавания и выделения фонем и слов в настоящее время достаточно развит и широко используется. В распознавании смысла слов и предложений, состоящих из этих слов, также достигнуто немало успехов. Однако, число нерешенных проблем все еще значительно. В частности, человеческая речь изобилует синтаксически неправильными высказываниями, двусмысленностями, метафорами, которые зачастую невозможно распознать без анализа контекста и знания состояния мира. Для того, чтобы корректно распознать естественную речь, необходимо увеличивать объем информации, требуемой для распознавания смысла, до такого уровня, что работа в реальном времени может стать невозможной и, следовательно, речевой взаимодействие становится бессмысленным. Кроме того, при распознавании смысла слов могут быть допущены ошибки, являющиеся следствием шума, искажений

аппаратуры, особенностей голоса говорящего (хрипоты, сиплости, заикания), которые не всегда удастся преодолеть.

Настоящая статья не преследует цели рассмотрения всех особенностей создания мультимодального интеллектуального взаимодействия и его использования. Эти вопросы довольно подробно рассмотрены в монографии [1]. Статья посвящена, прежде всего, вопросам создания моделей поведения водителя и среды для использования в системах мультимодального взаимодействия с целью повышения уровня безопасности движения.

Архитектура системы интеллектуального взаимодействия. В нашем случае мир состоит из водителя, средств взаимодействия и среды. Среда – это сам автомобиль и внешнее по отношению к транспортному средству и водителю окружение. Водитель может взаимодействовать со средой только через средства взаимодействия.

Архитектура системы интеллектуального взаимодействия водителя показана на рис. 1. Здесь изображены водитель, среда и средства взаимодействия. В средствах взаимодействия отдельно выделена часть, названная анализатором ситуаций. Аппаратные средства взаимодействия на рисунке изображены в виде компьютера с клавиатурой. В общем случае это могут быть мониторы, микрофоны, видеокамеры и любые другие устройства ввода и вывода модальностей. На аппаратные средства взаимодействия поступают входные модальности, источником которых являются водитель, (стрелка 1), среда (стрелка 2), реакции анализатора ситуаций (стрелка 3). Водитель с помощью своих органов чувств может воспринимать модальности от аппаратных средств взаимодействия (стрелка 4) и от среды (стрелка 5). Модальности, поступающие на аппаратные средства взаимодействия, специальным образом обрабатываются. Обработка включает фильтрацию, нахождение характерных признаков, преобразование форматов и т.п. Каждая входная модальность может обрабатываться отдельно и передаваться как восприятие на анализатор ситуаций.

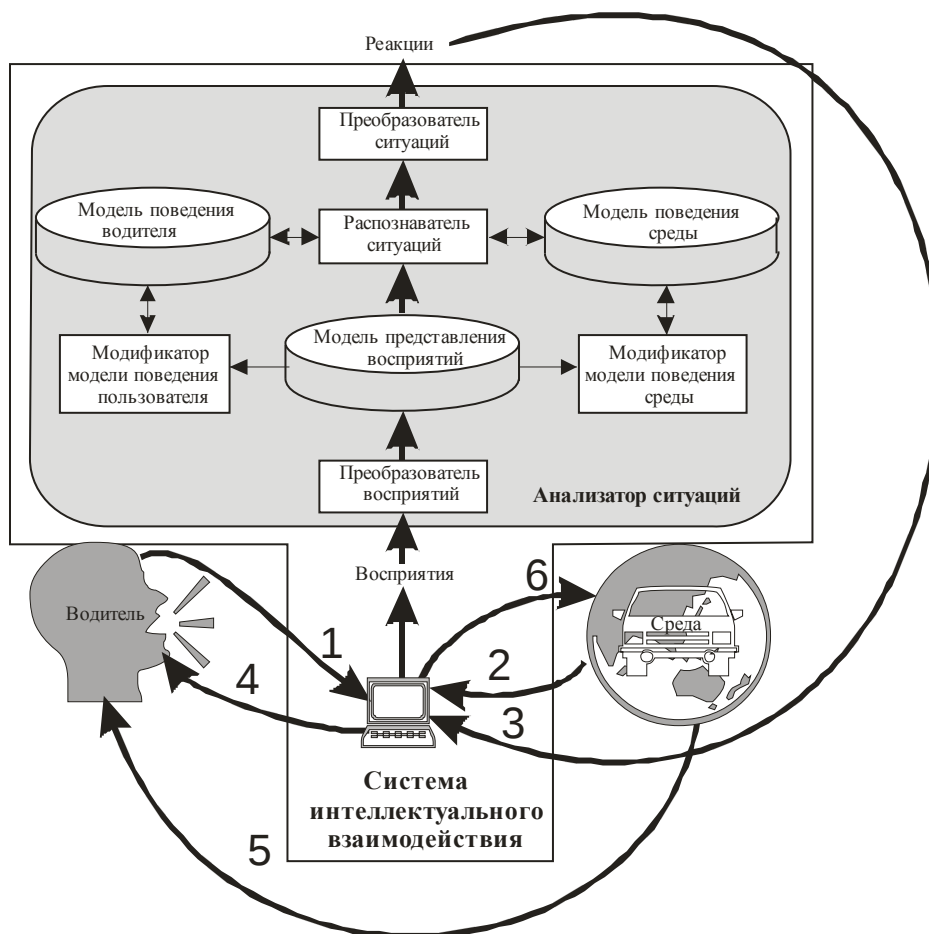


Рис. 1. Архитектура системы интеллектуального мультимодального взаимодействия водителя и среды

Анализатор ситуаций является главной темой настоящей статьи. Его задачей является выработка реакций по полученным восприятиям. Анализатор ситуаций содержит следующие блоки.

Преобразователь восприятий. Аппаратные средства взаимодействия обеспечивают все необходимые преобразования модальностей в формат, которые может воспринимать преобразователь восприятий. Задачей преобразователя восприятий является формирование символической модели представления восприятий, которая используется распознавателем ситуаций, а также для модификации представления модели поведения водителя и модели поведения среды на этапах первичного формирования моделей, их последующей адаптации или оптимизации.

Модель представления восприятий. Задаёт наборы значений признаков (параметров) модальностей за определенный период времени.

Модели поведения водителя и среды. Эти модели являются динамическими. Без наличия этих моделей распознавание каких-либо ситуаций, возникающих в среде, невозможно. Эти модели используются распознавателем ситуаций. Наличие хороших моделей поведения водителя и среды является ключевым для распознавания ситуаций, используемых для повышения уровня безопасности движения.

Модификаторы моделей поведения. Независимо от того, насколько хороша модель поведения мира, всегда могут возникать неожиданные или непредусмотренные аспекты этого поведения, которые не учтены в текущей модели, и, как следствие, не позволяют достичь каких-либо целей пользователей. Преодолевать эту проблему должен некоторый механизм адаптации модели путем ее определенной корректировки. Самое очевидное – это корректировка модели ее создателем. Имеется несколько решений этой проблемы на основе использования, например, нейронных или генетических алгоритмов. В настоящей статье эта проблема не затрагивается. Но обобщенная точка зрения такова – модель поведения мира должна быть достаточно гибкой, чтобы позволять осуществление коррекции в зависимости от поведения мира. Для этого организация анализатора ситуаций должна быть такой, чтобы адаптационный механизм корректировки модели поведения водителя и среды был встроен в него и позволял бы по определенным критериям, заранее ему известным или вырабатываемым в процессе функционирования, осуществлять такую корректировку.

Распознаватель ситуаций, используя текущие модели представления восприятий, поведения водителя и среды, осуществляет логический вывод с целью распознавания текущей ситуации, которая используется *преобразователем ситуации* для формирования соответствующей реакции.

Каковы же должны быть модели представления восприятий, поведения, каков должен быть алгоритм вывода распознавателя? Ответ на этот вопрос, естественно, зависит от особенностей поведения мира в целом. Можно выделить следующие виды поведений мира, влияющие на ответ.

- Поведение мира является четким детерминированным, за ним можно непосредственно наблюдать, извлекая все необходимые знания для пространственно-временного анализа. Следуя идеям Р.А. Брукса [3, 4], такое поведение может быть представлено без использования символического представления, требующего дедуктивного вывода, который предлагает искусственный интеллект. В подходе, изложенном в работах Р.А. Брукса, это поведение может быть представлено иерархией взаимосвязанных четких конечных

автоматов. Принцип построения указанной совокупности автоматов состоит в следующем. Начиная наблюдение с момента времени t_s и заканчивая моментом времени t_e (в принципе $t_e \rightarrow \infty$) строим все интересующие нас автоматы, начиная с простейших. Автоматы более низкого уровня представляют более примитивный вид поведения (такого, например, как перемещение центра тяжести объекта в двумерном пространстве) и имеют более высокий приоритет выполнения своих действий по отношению к автоматам более высокого уровня. Автоматы более высокого уровня представляют более сложное поведение по сравнению с автоматами нижележащих уровней, используя последние для представления этих поведений (например, динамику изменения расстояния между центрами тяжести объектов). Получаемое таким образом описание в последующем может регулярно модифицироваться по мере изменения поведения мира и использоваться для анализа с целью выявления тех или иных ситуаций.

- Поведение мира является нечетким, случайным, обладает большим числом признаков и необходимостью учитывать глубоко структурированные отношения между совокупностями признаков, но все еще можно непосредственно наблюдать за этим поведением и достаточно адекватно описывать его на основе нечетких или случайных моделей. В этом случае можно использовать такие модели как нечеткие конечные автоматы [2], Марковские модели и др.
- Поведение мира недоступно полностью для наблюдения и для непосредственного построения автоматов по результатам наблюдения. Но, тем не менее, есть возможность достаточно полно выразить на языке конечных автоматов или другом языке априорные знания о пространственно-временном поведении и отношениях признаков на основе априорного опыта.
- Поведение недоступно для наблюдения и нет возможности достаточно полно выразить на языке конечных автоматов априорные знания о пространственно-временном поведении и отношениях признаков. Есть возможность использовать только фрагментарные знания о поведении, которые можем проверять и модифицировать во времени и пространстве. В этом случае для описания поведения более удобным являются языки, основанные на символических представлениях, например, модальные исчисления [5,6].

Как видно из сказанного, для описания моделей поведения мира могут использоваться различные языки. В работах по искусственному интеллекту для описаний таких моделей широко используется термин «онтология». Под онтологией

обычно понимается описание поведения мира на каком-либо формальном языке, а под *ситуацией* - некоторое выводимое (устанавливаемое) по этому описанию свойство мира, которое он приобретает в определенное время в определенном месте. Чем более детальная и точная модель поведения водителя и среды может быть создана, тем более сложные задачи может решать анализатор восприятий. Использование онтологий для описания моделей поведения позволяет добиться принципиального качества системы интеллектуального взаимодействия: способности самостоятельно помогать водителю решать сложные задачи, которые без этой помощи он, либо вообще не смог бы решить, либо это потребовало бы у него слишком много времени. Описание моделей поведения в виде онтологий позволяет детально и точно описывать реальное поведение, перекладывать на систему интеллектуального взаимодействия значительное число задач и расширять возможности в осуществлении сложных реакций.

В настоящей статье в качестве языков онтологий, используемых для пространственно-временного описания поведения водителя и среды, а также последующего анализа ситуаций выбраны нечеткие конечные автоматы и модальная логика. Нечеткие конечные автоматы используются как средство описания возможных состояний, в которых могут находиться объекты мира (в нашем случае это водитель, навигатор, автомобиль и внешняя по отношению к ним среда) и возможные переходы между этими состояниями, осуществляемые в определенные моменты времени. Принципы подобного описания и использования нечетких конечных автоматов изложены в работе [2]. Модальная логика является средством описания отношений на множестве состояний нечетких автоматов, соответствующих ситуациям, которые подлежат распознаванию.

Аргументы в пользу выбора таких языков для нашего применения следующие.

- Присущая водителю как человеческому существу нечеткость интерпретации ситуаций. Эта нечеткость является следствием значительно разброса особенностей характера, привычек, физического состояния и других особенностей водителей.
- Введение водителя в заблуждение в случае предоставления ему четкой оценки ситуации поскольку водитель, как правило, полагает, что четкая оценка является следствием точного измерения, в то время как измерения приблизительны и субъективны.
- Неадекватность четкой оценки ситуаций человеческой способности оценивать ситуации качественно.

- Невозможность нормализации шкал четких оценок ситуаций и, как следствие, трудность агрегирования таких оценок.
- Оценивание ситуаций на сравнительно коротких дискретных интервалах времени.

Базовые принципы использования нечетких конечных автоматов.

Напомним ряд базовых принципов, определений и понятий, связанных с построением нечетких конечных автоматов и введенных в работе [2], а также некоторых сведений по модальным логикам, необходимых для понимания дальнейшего.

Имеем некоторую совокупность объектов $\theta_t^{i_0}, i_0 = 1, \dots, l_0$. Физически каждый объект может быть чем угодно и характеризуется набором присущих ему атомарных признаков (признаков 0-го уровня). Значения этих признаков рассматриваются на дискретной шкале виртуальных моментов времени $T = \{t | t \in N\}$, такой, что разность $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ между двумя соседними отсчетами времени является константой. На шкале T вводится временной интервал $[t_s, t_e] = \{t | t_s \leq t \leq t_e\}$.

Каждый признак 0-го уровня какого-либо объекта $\theta_t^{i_0}$ в момент времени t может принимать значение $\tilde{y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})$, $k_0 \in \{1, \dots, m_0\}$ из множества значений $\tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})$. Это множество $\tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})$ назовем *нечетким отсчетом*. На множестве $\tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})$ отсчетов $\tilde{y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})$, $k_0 \in \{1, \dots, m_0\}$, характеризующих объект $\theta_t^{i_0}$ в момент времени t задается функция принадлежности $\mu_{\tilde{Y}_{k_0}} = \mu_{\tilde{Y}_{k_0}}[\tilde{y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})]$. Пара $(\mu_{\tilde{Y}_{k_0}}[\tilde{y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})], \tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0}))$ называется *нечетким отношением* уровня 0 в момент времени t . Кортеж $\tilde{Y}_{k_0}[\theta_{t_s}^{i_0}, \theta_{t_e}^{i_0}] = \langle (\mu_{\tilde{Y}_{k_0}}[\tilde{y}_{k_0}(\theta_{t_s}^{i_0})], \tilde{Y}_{k_0}(\theta_{t_s}^{i_0})), \dots, (\mu_{\tilde{Y}_{k_0}}[\tilde{y}_{k_0}(\theta_{t_e}^{i_0})], \tilde{Y}_{k_0}(\theta_{t_e}^{i_0})) \rangle$ называется *нечетким трендом* уровня 0 на временном интервале $[t_s, t_e]$. Нечеткий тренд задает множество нечетких отношений $\Theta^{k_0} = \{(\mu_{\tilde{Y}_{k_0}}[\tilde{y}_{k_0}(\theta_{t_s}^{i_0})], \tilde{Y}_{k_0}(\theta_{t_s}^{i_0})), \dots, (\mu_{\tilde{Y}_{k_0}}[\tilde{y}_{k_0}(\theta_{t_e}^{i_0})], \tilde{Y}_{k_0}(\theta_{t_e}^{i_0}))\}$. Эти нечеткие отношения являются термами лингвистической переменной $L^{k_0}[\theta_{t_s}^{i_0}, \theta_{t_e}^{i_0}]$ уровня 0, заданными на временном интервале $[t_s, t_e] = \{t | t_s \leq t \leq t_e\}$. Иными словами каждая лингвистическая переменная $L^{k_0}[\theta_{t_s}^{i_0}, \theta_{t_e}^{i_0}] = \{L^{k_0}, X^{k_0}, T^{k_0}, \Theta^{k_0}\}$, где L^{k_0} - имя лингвистической переменной, X^{k_0} - ее универсум, $T^{k_0} = \{\tau^1, \tau^2, \dots, \tau^{p_0}\}$ - множество лингвистических значений лингвистической переменной L^{k_0} , Θ^{k_0} - множество термов лингвистической переменной. Каждому лингвистическому значению $\tau^{r_0} \in T^{k_0}$

сопоставляется терм $N(\tau^{r_0}) = (\mu_{\tilde{Y}_{k_0}} [\tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})], \tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})) \in \Theta^{k_0}$, такой, что $\tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0}) \subseteq X^{k_0}$, причем термы одинаковых лингвистических значений совпадают. Если терм $N(\tau^{r_0}) = (\mu_{\tilde{Y}_{k_0}} [\tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})], \tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0}))$, то будем также использовать следующие обозначения $N^\mu(\tau^{r_0}) = \mu_{\tilde{Y}_{k_0}} [\tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})]$, $N^Y(\tau^{r_0}) = \tilde{Y}_{k_0}(\theta_t^{i_0})$.

На множестве лингвистических переменных $L^{k_0}[\theta_{t_s}^{i_0}, \theta_{t_e}^{i_0}]$ вводятся лингвистические переменные $L^{k_1}[\theta_{t_s}^{i_1}, \theta_{t_e}^{i_1}] = \{L^{k_1}, X^{k_1}, T^{k_1}, \Theta^{k_1}\}$ уровня 1. Каждая такая переменная получается в результате агрегирования лингвистических переменных $L^{k_0}[\theta_{t_s}^{i_0}, \theta_{t_e}^{i_0}]$ уровня 1 следующим образом. Сначала вводится имя L^{k_1} лингвистической переменной. Затем выбирается множество интересующих нас лингвистических значений $T^{k_1} = \{\tau^{r_1}, \tau^{r_2}, \dots, \tau^{r_{p_1}}\}$, таких, что каждое лингвистическое значение τ^{r_1} , $r_1 \in 1, 2, \dots, p_1$ именуется некоторое подмножество лингвистических значений $T^{r_1} = \{\tau^{i_0}, \tau^{j_0}, \dots, \tau^{v_0}\}$, принадлежащих различным множествам лингвистических значений T^{k_0} , $k_0 = 1, \dots, m_0$. В качестве универсума X^{k_1} лингвистической переменной L^{k_1} выбирается декартово произведение $X^{i_0} \times X^{j_0} \times \dots \times X^{v_0}$ универсумов лингвистических переменных $L^{i_0}, L^{j_0}, \dots, L^{v_0}$. В качестве *нечеткого тренда* уровня 1 выбирается кортеж $\tilde{Y}_{k_1}[\theta_{t_s}^{i_1}, \theta_{t_e}^{i_1}] = \langle (\mu_{\tilde{Y}_{k_1}} [\tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_s}^{i_1})], \tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_s}^{i_1})), \dots, (\mu_{\tilde{Y}_{k_1}} [\tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_e}^{i_1})], \tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_e}^{i_1})) \rangle$. Каждый такой тренд задает множество нечетких отношений $\Theta^{k_1} = \{(\mu_{\tilde{Y}_{k_1}} [\tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_s}^{i_1})], \tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_s}^{i_1})), \dots, (\mu_{\tilde{Y}_{k_1}} [\tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_e}^{i_1})], \tilde{Y}_{k_1}(\theta_{t_e}^{i_1}))\}$ уровня 1. Каждое нечеткое отношение $\mu_{\tilde{Y}_{k_1}} [\tilde{Y}_{k_1}(\theta_t^{i_1})], \tilde{Y}_{k_1}(\theta_t^{i_1})$ получается следующим образом: $\tilde{Y}_{k_1}(\theta_t^{i_1}) = \{N^Y(\tau^{i_0}), N^Y(\tau^{j_0}), \dots, N^Y(\tau^{v_0})\}$, $\mu_{\tilde{Y}_{k_1}} [\tilde{Y}_{k_1}(\theta_t^{i_1})] = A_{\tilde{Y}_{k_1}} \{N^\mu(\tau^{i_0}), N^\mu(\tau^{j_0}), \dots, N^\mu(\tau^{v_0})\}$. Здесь $A_{\tilde{Y}_{k_1}}$ оператор агрегирования [1] множества функций принадлежности $\{N^\mu(\tau^{i_0}), N^\mu(\tau^{j_0}), \dots, N^\mu(\tau^{v_0})\}$.

На множестве лингвистических переменных $L^{k_1}[\theta_{t_s}^{i_1}, \theta_{t_e}^{i_1}]$ по аналогии с построением множества предыдущим можем построить множество лингвистических переменных $L^{k_2}[\theta_{t_s}^{i_2}, \theta_{t_e}^{i_2}]$ уровня 2 и т.д. до требуемого уровня u .

Лингвистические переменные (соответствующие им нечеткие тренды и макротренды), могут быть использованы для построения иерархии нечетких конечных автоматов, начиная от автоматов 0-го уровня и заканчивая автоматами,

представляющими тренды самого верхнего уровня. Этот процесс подробно рассмотрен в работе [2].

Лингвистические переменные 0-го уровня используются для синтеза автоматов 0-го уровня. Функция выходов каждого автомата 0-го уровня определяет значение только одного отсчета 0-го уровня в один момент времени. Используя автоматы 0-го уровня, создаются автоматы 1-го уровня, задающие отношения между лингвистическими переменными 0-го уровня. Каждый автомат 1-го уровня задает отношения между одним и тем же множеством лингвистических переменных 0-го уровня. Каждый автомат 2-го уровня задает отношения между лингвистическими переменными 1 уровня и т.д.. Функция выходов каждого автомата какого-либо уровня определяет значение только одного отсчета соответствующего уровня.

Функции переходов $\tilde{f}$ и выходов $\tilde{\varphi}$ нечеткого конечного автомата $\tilde{M}_{k_u}^u[\sigma_{t_s}, \sigma_{t_e}]$, $\sigma \in \{\theta, \Theta\}$ уровня u задаются следующими уравнениями:

$$\tilde{f}[t, b_i(\sigma_t)] = b_i(\sigma_{t+\Delta}), t \in [t_s + \Delta, t_e - \Delta],$$

$$\tilde{f}[t_s] = b_i(\sigma_{t_s}),$$

$$\tilde{\varphi}[b_i(\sigma_t)] = [\mu_{\tilde{Y}_i}(\tilde{Y}_i(\sigma_t)), \tilde{Y}_i(\sigma_t)]$$

Здесь функция переходов $\tilde{f}[t, b_i(\sigma_t)] = b_i(\sigma_{t+\Delta}), t \in [t_s + \Delta, t_e - \Delta]$ задает переходы между состояниями автомата на интервале времени $[t_s + \Delta, t_e - \Delta]$. Значение функции $\tilde{f}[t_s] = b_i(\sigma_{t_s})$ задает начальное состояние $b_i(\sigma_{t_s})$ автомата. Функция $\tilde{\varphi}[b_i(\sigma_t)]$ является нечеткой функцией выхода автомата (нечетким отношением), зависящим от состояния $b_i(\sigma_t)$ автомата и задает отсчеты, являющиеся термами лингвистической переменной.

Совокупности нечетких автоматов, описывающих поведение водителя и среды, и являются моделями их поведения. Вместе с правилами, используемыми для анализа интересующих нас ситуаций, получаем упоминаемую выше онтологию.

Лингвистические переменные, соответствующие им тренды, лингвистические значения и правила задает эксперт на основе своих наблюдений за реальной физической средой (миром).

Проиллюстрируем на примере принципы формирования онтологии.

Модели поведения 0-го уровня водителя, навигатора, транспортного средства и внешней среды. Построение моделей ограничим перечислением трендов 0-го уровня объектов (водителя, навигатора и транспортного средства) и соответствующих им нечетких автоматов 0-го уровня. В качестве верхних индексов

объектов будем использовать их сокращенные названия: $\theta^{вод}$ (водитель), $\theta^{нав}$ (навигатор), $\theta^{авт}$ (автомобиль), $\theta^{среда}$ (внешняя среда). Совокупности трендов будем представлять в виде $Y_{L_0}[\theta_{t_s}^{объект}, \theta_{t_e}^{объект}], T(L_0), \tilde{M}_{k_0}^0[\theta_{t_s}^{объект}, \theta_{t_e}^{объект}]$, где L_0 – лингвистическая переменная, $T(L_0) = \{\tau^{1_{L_0}}, \tau^{2_{L_0}}, \dots, \tau^{P_{L_0}}\}$, –множество лингвистических значений переменной L_0 , $\tilde{M}_{k_0}^0[\theta_{t_s}^{объект}, \theta_{t_e}^{объект}]$ – нечеткий автомат 0-го уровня который строится по данной совокупности трендов 0-го уровня. Модели, использующие автоматы 0-го уровня будем называть моделями 0-го уровня.

Модель 0-го уровня поведения водителя в процессе управления транспортным средством:

$$\begin{aligned} Y_{педаль_газа}[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}], педаль_газа \in \{плавно, прерывисто, резко\}, \tilde{M}_{педаль_газа}^0[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}] \\ Y_{педаль_тормоза}[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}], педаль_тормоза \in \{плавно, прерывисто, резко\}, \tilde{M}_{педаль_тормоза}^0[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}] \\ Y_{сигнал}[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}], сигнал \in \{включен, прерывистый, выключен\}, \tilde{M}_{сигнал}^0[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}] \\ Y_{дальний_свет}[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}], дальний_свет \in \{включен, прерывистый, выключен\}, \tilde{M}_{дальний_свет}^0[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}] \\ Y_{указатель_поворота}[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}], указатель_поворота \in \{включен, выключен\}, \tilde{M}_{указатель_поворота}^0[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}] \\ Y_{переключатель_передач}[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}], переключатель_передач \in \{изменялся, не_изменялся\}, \tilde{M}_{переключатель_передач}^0[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}] \\ Y_{поворот_руля}[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}], поворот_руля \in \{незначительный, средний, значительный\}, \tilde{M}_{поворот_руля}^0[\theta_{t_s}^{вод}, \theta_{t_e}^{вод}] \end{aligned}$$

Модель 0-го уровня поведения транспортного средства в процессе движения:

$$\begin{aligned} Y_{старт}[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}], старт \in \{нормальный, быстрый, форсированный\}, \tilde{M}_{старт}^0[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}] \\ Y_{стиль}[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}], стиль \in \{нормальный, влияющий, экстраординарный\}, \tilde{M}_{стиль}^0[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}] \\ Y_{скорость}[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}], скорость \in \{маленькая, средняя, высокая\}, \tilde{M}_{скорость}^0[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}] \\ Y_{путь}[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}], путь \in \{маленький, средний, большой\}, \tilde{M}_{путь}^0[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}] \\ Y_{торможение}[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}], торможение \in \{нормальное, среднее, частое\}, \tilde{M}_{торможение}^0[\theta_{t_s}^{авт}, \theta_{t_e}^{авт}] \end{aligned}$$

Модель 0-го уровня поведения внешней среды в процессе движения:

$$\begin{aligned} Y_{пробка}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], пробка \in \{короткая, средняя, длинная\}, \tilde{M}_{пробка}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{время_в_пробке}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], время_в_пробке \in \{небольшое, среднее, длительное\}, \tilde{M}_{время_в_пробке}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{дорога}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], дорога \in \{плохая, средняя, хорошая\}, \tilde{M}_{дорога}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{сообщение}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], сообщение \in \{несущественное, интересное, важное\}, \tilde{M}_{сообщение}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{время_дня}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], время_дня \in \{утреннее, дневное, вечернее, ночное\}, \tilde{M}_{время_дня}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{место}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], место \in \{город, деревня, шоссе\}, \tilde{M}_{место}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{погода}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], погода \in \{пасмурная, солнечная, дождливая\}, \tilde{M}_{погода}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{время_года}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], время_года \in \{весна, осень, лето, зима\}, \tilde{M}_{время_года}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{светофор}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], светофор \in \{зеленый, желтый, красный\}, \tilde{M}_{светофор}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \\ Y_{знак_поворота}[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}], знак_поворота \in \{есть, нет\}, \tilde{M}_{знак_поворота}^0[\theta_{t_s}^{среда}, \theta_{t_e}^{среда}] \end{aligned}$$

Модель 0-го уровня поведения навигатора в процессе движения:

$$\begin{aligned}
&Y_{агрегируемость}[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}], агрегируемость \in \{высокая, средняя, низкая\}, \tilde{M}_{агрегируемость}^0[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}] \\
&Y_{наглядность}[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}], наглядность \in \{картографическая, фразеологическая, иконообразная\}, \tilde{M}_{наглядность}^0[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}] \\
&Y_{информационность}[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}], информационность \in \{высокая, средняя, низкая\}, \tilde{M}_{информационность}^0[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}] \\
&Y_{выразительность}[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}], выразительность \in \{паническая, тревожная, беспокойная, спокойная\}, \tilde{M}_{выразительность}^0[\Theta_{t_s}^{нав}, \Theta_{t_e}^{нав}]
\end{aligned}$$

Модели 1-го уровня психологического поведения водителя в процессе управления транспортным средством. В соответствии с изложенными выше принципами модели 0-го уровня могут быть использованы для построения моделей 1-го уровня, модели 1-го уровня – для построения моделей 2-го уровня и т.д. Ограничимся иллюстрацией построения только одной модели поведения 1-го уровня водителя, а именно модели его психологического поведения в зависимости от его моделей поведения 0-го уровня в процессе управления транспортным средством. Также, как и в случае построения моделей 0-го уровня поведения водителя, ограничимся перечислением трендов 1-го уровня водителя и соответствующих им нечетких автоматов 1-го уровня. В качестве верхних индексов нечетких отношений 1-го уровня будем использовать перечень имен объектов (водителя – *вод*, навигатора – *нав*, транспортного средства – *авт*, внешней среды – *среда*). Совокупности трендов 1-го уровня будем представлять в виде $Y_{L_1}[\Theta_{t_s}^{объекты}, \Theta_{t_e}^{объекты}], T(L_1), \tilde{M}_{L_1}^1[\Theta_{t_s}^{объекты}, \Theta_{t_e}^{объекты}]$, где L_1 – лингвистическая переменная, $T(L_1) = \{\tau^{1_{L_1}}, \tau^{2_{L_1}}, \dots, \tau^{p_{L_1}}\}$, – множество лингвистических значений переменной L_1 , $\tilde{M}_{L_1}^1[\Theta_{t_s}^{объекты}, \Theta_{t_e}^{объекты}]$ – нечеткий автомат 1-го уровня. Модели, использующие автоматы 1-го уровня будем называть моделями 1-го уровня.

Модель 1-го уровня психологического поведения водителя в зависимости от его поведения в процессе управления транспортным средством:

Ограничимся простейшим случаем описания психологического поведения водителя в зависимости от его поведения в процессе управления транспортным средством и поведения транспортного средства и среды в процессе движения (без учета модели поведения навигатора).

$$\begin{aligned}
&Y_{внимание}[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}], внимание \in \{отсутствующее, обычное, рассеяное, поглощающее, напряженное\}, \tilde{M}_{внимание}^1[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}] \\
&Y_{восприятие}[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}], восприятие \in \{спокойное, осторожное, тревожное, поглощающее, паническое\}, \tilde{M}_{восприятие}^1[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}] \\
&Y_{раздраженность}[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}], раздраженность \in \{спокоен, обеспокоен, нервен, рассержен\}, \tilde{M}_{раздраженность}^1[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}] \\
&Y_{усталость}[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}], усталость \in \{бодрый, утомленный, усталый, засыпающий\}, \tilde{M}_{усталость}^1[\Theta_{t_s}^{вод, авт, среда}, \Theta_{t_e}^{вод, авт, среда}]
\end{aligned}$$

Правила, используемые для анализа ситуаций. Правила, которые используются для анализа ситуаций анализатором ситуаций, могут формулироваться на различных языках. Наиболее приемлемым для нашего случая нечетких конечных автоматов является какой-либо из языков нечеткого модального исчисления, позволяющий формулировать правила на этом языке как формулы этого исчисления, например такого, который рассмотрен в работе [5].

Для иллюстрации воспользуемся некоторыми модальными операторами из списка, приведенного в таблице 1.

Таблица 1

Обозначение оператора	Значение оператора
$\bigcirc \xi$	ξ будет истинной в следующий момент времени
$\bullet \xi$	ξ была истинной в предыдущий момент времени
$\diamond \xi$	ξ станет истинной в некоторый следующий момент времени
$\square \xi$	ξ всегда истинна в следующие моменты времени
$\blacklozenge \xi$	ξ была истинной в некоторый предыдущий момент времени
$\blacksquare \xi$	ξ была всегда истинной в предыдущие моменты времени
$\sigma u \xi$	ξ будет истинной до тех пор, пока истинна σ
$\sigma s \xi$	ξ станет истинной, как только σ станет истинной
$\sigma w \xi$	ξ истинна тогда, когда σ истинна

Ситуации, которые подлежат выявлению с использованием формул нечеткого исчисления и приведенных выше нечетких автоматов 1-го уровня, определим как наборы максимальных лингвистических значений лингвистических переменных внимание, восприятие, раздраженность и усталость среди всех лингвистических значений этой переменной.

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{внимание}}[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}], \text{внимание} \in \{\text{отсутствующее, обычное, рассеяное, поглощающее, напряженное}\}, \tilde{M}_{\text{внимание}}^1[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}] \\
 Y_{\text{восприятие}}[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}], \text{восприятие} \in \{\text{спокойное, осторожное, тревожное, поглощающее, паническое}\}, \tilde{M}_{\text{восприятие}}^1[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}] \\
 Y_{\text{раздраженность}}[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}], \text{раздраженность} \in \{\text{спокоен, обеспокоен, нервен, рассержен}\}, \tilde{M}_{\text{раздраженность}}^1[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}] \\
 Y_{\text{усталость}}[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}], \text{усталость} \in \{\text{бодрый, утомленный, усталый, засыпающий}\}, \tilde{M}_{\text{усталость}}^1[\Theta_{t_s}^{\text{вод, авт, среда}}, \Theta_{t_e}^{\text{вод, авт, среда}}]
 \end{aligned}$$

Приведем примеры таких формул для четырех лингвистических переменных *внимание, восприятие, раздраженность и усталость*.

Лингвистическая переменная внимание:

$скорость=нулевая \supset внимание=отсутствующее$

$нажатие_педали_газа=плавное \vee торможение=плавное \vee$

$указатель_поворота=включен \wedge поворот_руля=плавный \supset внимание=обычное$

$\bullet(\bullet(\bullet(педаль_тормоза=плавно))) \vee знак_поворота=есть \wedge$

$указатель_поворота=выключен \supset внимание=рассеяное$

$педаль_тормоза=прерывисто \vee сигнал=включен \wedge знак_поворота=есть \supset$

$внимание=пристальное$

$педаль_тормоза=прерывисто \wedge поворот_руля=незначительный \supset$

$внимание=напряженное$

Лингвистическая переменная восприятие:

$\bullet(\bullet(\bullet(скорость=низкая \wedge педаль_газа=плавно \wedge сигнал=выключен) \supset$

$восприятие=спокойное$

$\bullet(\bullet(\bullet(руль=круто)) \supset восприятие=осторожное$

$сигнал=включен \wedge дальний_свет=прерывистый \wedge$

$педаль_тормоза=прерывисто \wedge поворот_руля=значительный \supset$

$восприятие=тревожное$

$\bullet(\bullet(\bullet(_сигнал=включен \wedge педаль_тормоза=резко \wedge скорость=высокая \wedge$

$переключатель_передач=не_изменялся))) \supset восприятие=паническое$

Лингвистическая переменная раздраженность:

$\bullet(\bullet(скорость=низкая \wedge педаль_газа=плавно \wedge сигнал=выключен \supset$

$раздраженность=спокоен))$

$\bullet(\bullet(поворот_руля=прерывисто \vee педаль_газа=прерывисто \vee$

$дальний_свет=прерывистый)) \supset раздраженность=обеспокоен$

$\bullet педаль_газа=резко \wedge педаль_тормоза=резко \vee \bullet(\bullet$

$(\bullet(дальний_свет=прерывистый \vee сигнал=прерывистый))) \supset раздраженность=нервен$

$\bullet(\bullet(\bullet(педаль_газа=резко \vee педаль_тормоза=резко \vee сигнал=включен))) \supset$

$раздраженность=рассержен$

Лингвистическая переменная усталость:

$\text{нажатие_педали_газа} = \text{плавное} \vee \text{торможение} = \text{плавное} \vee$
 $\text{указатель_поворота} = \text{включен} \wedge \text{поворот_руля} = \text{плавный} \supset \text{усталость} = \text{бодрый}$
 $\bullet(\bullet(\bullet(\text{поворот_руля} = \text{прерывисто} \vee \text{педаль_газа} = \text{прерывисто} \vee$
 $\text{указатель_поворота} = \text{выключен} \wedge \text{стрелка} = \text{есть})) \supset \text{усталость} = \text{утомленный}$
 $\bullet(\bullet(\bullet(\text{педаль_газа} = \text{плавно} \wedge \text{педаль_тормоза} = \text{резко}))) \vee \bullet(\bullet$
 $(\bullet(\text{скорость} = \text{скорость})) \vee \text{сигнал} = \text{прерывистый})) \vee \text{указатель_поворота} = \text{выключен}$
 $\wedge \text{стрелка} = \text{есть} \supset \text{усталость} = \text{усталый}$
засыпающий: $\bullet(\bullet(\bullet(\text{поворот_руля} = \text{плавный} \wedge (\bullet(\text{скорость} \neq \text{скорость})))) \vee \bullet(\bullet$
 $(\bullet(\text{поворот_руля} = \text{плавный} \wedge (\bullet(\text{скорость} \neq \text{скорость}) \wedge \text{педаль_тормоза} = \text{резко})) \vee$
 $\text{указатель_газа} = \text{резко} \wedge \text{светофор} = \text{зеленый} \vee \text{педаль_тормоза} = \text{резко} \vee$
 $\text{указатель_поворота} = \text{выключен} \wedge \text{стрелка} = \text{есть} \supset \text{усталость} = \text{засыпающий}$

Лингвистическая переменная раздраженность:

$\bullet(\bullet(\bullet((\text{пробка} = \text{короткая} \vee \text{пробка} = \text{средняя} \vee \text{пробка} = \text{длинная}) \wedge$
 $\text{время_в_пробке} = \text{небольшое}))) \supset \text{раздраженность} = \text{спокоен}$
 $\bullet(\bullet(\bullet((\text{пробка} = \text{короткая} \vee \text{пробка} = \text{средняя} \vee \text{пробка} = \text{длинная}) \wedge$
 $\text{время_в_пробке} = \text{среднее}))) \supset \text{раздраженность} = \text{обеспокоен}$
 $: \bullet(\bullet(\bullet((\text{пробка} = \text{короткая} \vee \text{пробка} = \text{средняя} \vee \text{пробка} = \text{длинная}) \wedge$
 $\text{время_в_пробке} = \text{длительное}))) \supset \text{раздраженность} = \text{нервен}$
 $\bullet(\bullet(\bullet(\text{пробка} = \text{короткая} \vee \text{пробка} = \text{средняя}) \wedge \text{время_в_пробке} = \text{длительное})) \supset$
 $\text{раздраженность} = \text{рассержен}$

Заключение. Представлена комплексная модель интеллектуального мультимодального взаимодействия водителя со средой (транспортным средством и внешней по отношению к нему среды), направленная на повышение уровня безопасности движения.

Многое еще предстоит сделать как в теоретическом, так прикладном плане. Вот только некоторые из задач, которые стоит рассмотреть.

- В работе рассматривались только линейные тренды (время в этих трендах линейно). Для многих сред это может быть неадекватно и неудобно. Может оказаться, что нелинейные (ветвящиеся тренды) более адекватно описывают среду. Потребуется модификация предложенного подхода.

- Любой автомат может быть представлен в виде множества правил или уравнений специального вида. Это потребует модификации предложенного подхода применительно к такому представлению.
- Для реализации предложенного подхода требуется разработки визуальных средств интеллектуального интерфейса, как для задания автоматов, так и для моделирования распознавания ситуаций.
- Наконец, конкретные среды имеют свои особенности. Требуется учет этих особенностей и разработка автоматных библиотек, которые могут быть использованы разработчиками как типовые.

Литература

1. Алфимцев А.Н., Девятков В.В. Интеллектуальные мультимодальные интерфейсы. Полиграф-Информ, Калуга, 2011. - 328 с.
2. Девятков В.В. Пространственно-временной анализ ситуаций на множестве движущихся объектов. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, № 3(84), стр. 88-112, 2011.
3. Brooks, R. A. Intelligence without reason. In Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91), Sydney, Australia, pp. 569-595, 1991.
4. Brooks, R. A. Intelligence without representation. Artificial Intelligence, 47, 139-159, 1991.
5. Девятков В.В., Румбешт В.В. Динамическое прогнозирование и распознавание ситуаций на основе аппарата нечеткой логики и конечно-автоматной модели представления временных последовательностей.-Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1/'95(18), стр 66-74, 1995.
6. Devyatkov V.V. Multiagent hierarchical recognition on the basis of fuzzy situation calculus. Vestnik (Journal of the Bauman Moscow State Technical University), Natural Science & Engineering, pp. 130-153, 2005.