

УДК 004.93; 004.94

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИТУАЦИЙ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

**В.В. Девятков, И.И. Лычков**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: deviatkov@bmstu.ru; lychkovi@gmail.com

*Предложен метод анализа ситуаций на множестве движущихся объектов, основанный на сравнении эталонных моделей поведения с фактическим поведением, получаемым в результате наблюдения за движущимися объектами. Основное отличие предлагаемого метода от известных состоит в том, что формирование эталонных моделей осуществляется не только экспертно, но также с помощью моделирования ситуаций в виртуальной среде, в результате чего генерируются исходные последовательности значений признаков, используемых для построения эталонных моделей. На примере конкретной дорожно-транспортной ситуации описывается порядок воспроизведения ситуации в виртуальной среде, генерации трендов признаков и построения эталонной модели ситуации. Рассмотрен процесс распознавания ситуации путем сопоставления измеренных параметров движения транспортных средств во времени с эталонной моделью ситуации. В заключение даны выводы о преимуществах и недостатках предложенного метода, намечены направления дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** распознавание ситуаций, нечеткая логика, конечные автоматы, дорожное движение, компьютерное моделирование.

## MODELING AND ANALYSIS OF SITUATIONS IN VIRTUAL ENVIRONMENT OF MOVING OBJECTS

**V.V. Deviatkov, I.I. Lychkov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: deviatkov@bmstu.ru; lychkovi@gmail.com

*A method for analysis of situations on a set of moving objects is proposed. The method is based on comparison of standard behavior models with the actual behavior, obtained as a result of observation of moving objects. The main difference of the proposed method from the known ones consists in the following. In addition to composing standard behavior models manually by expert, computer modeling of situations in a virtual environment can be used to produce initial time series of feature values and compose behavior models using the time series. By the example of a distinct traffic situation, the process of virtual situation modeling, time series generation and standard behavior model creation is described. The situation recognition is considered which is based on comparing in time the measured parameters of the transport vehicle motion with the standard behavior model. Advantages and disadvantages of the proposed method are discussed, future research directions are outlined.*

**Keywords:** situations recognition, fuzzy logic, finite state machines, road traffic, computer modeling.

Настоящая работа посвящена решению задачи распознавания ситуаций в среде движущихся объектов. Исходным для распознавания является видеопоток данных, получаемый путем наблюдения за средой. Для создания и отладки систем распознавания ситуаций, возникающих при движении объектов в реальных средах, необходимо иметь видеопотоки, отражающие ситуации и подлежащие распознаванию. Получение таких видеопотоков, например с помощью видеокамер или других устройств непосредственно в реальных средах, является трудоемким процессом вследствие высокой стоимости требуемых ресурсов. Единственным выходом из этого положения является тот или иной вид моделирования ситуаций. В настоящей работе для моделирования используется виртуальная среда. Перечень движущихся объектов, в принципе, не ограничен и включает в себя как представителей живого мира, например людей, так и неживого (автомобили, поезда, самолеты, суда и т.д.). Ситуации, возникающие в среде движущихся объектов, могут быть самыми различными, зависящими от скорости, направления, расстояния и многих других параметров движущихся объектов. В настоящее время имеется довольно много отечественных и зарубежных организаций, занимающихся разработкой подобных концепций и технологий [1–9]. Доступны обширные обзоры по методам распознавания ситуаций [10, 11]. Большинству этих работ присущи два главных недостатка: сравнительно слабые возможности распознавания сложных ситуаций, особенно при большом числе движущихся объектов в реальном времени, и “ручное” распознавание сложных ситуаций человеком с помощью визуального наблюдения за поведением движущихся объектов. Настоящая работа направлена на устранение указанных недостатков путем развития концепции и технологии, позволяющих создавать эталонные реактивные модели для распознавания представляющих интерес ситуаций, порождать разнородную видеоинформацию путем моделирования возникающих ситуаций в виртуальной среде, распознавать ситуации, возникающие при движении объектов, на основе результатов использования видеопотоков, порождаемых виртуальным моделированием.

Настоящая работа соединяет конечно-автоматную парадигму Брукса [12] с элементами теории нечетких множеств Заде [13] для построения универсального метода представления и распознавания ситуаций с участием движущихся объектов.

Применение теории нечетких множеств для анализа движения объектов облегчает работу эксперта на этапе представления ситуации и обеспечивает надежность распознавания ситуации в условиях неполноты и зашумленности данных о положении объектов.

Представление ситуации в виде иерархии конечных автоматов [12] также облегчает работу эксперта, поскольку при описании каждого уровня он может принимать во внимание только те признаки и от-

ношения между объектами, которые важны на этом уровне. Кроме того, иерархическая структура обеспечивает расширяемость полученного представления, т. е. возможность добавления новых уровней без изменения существующих.

Важное преимущество предложенного метода представления ситуаций заключается в том, что он позволяет получить цифровую схему устройства для распознавания заданных ситуаций, готовую к реализации на ПЛИС или заказной СБИС. Поскольку все автоматы работают параллельно и одновременно, полученная схема может работать в реальном масштабе времени даже при низкой тактовой частоте, что открывает возможности для развертывания системы распознавания ситуаций на мобильных устройствах с низким энергопотреблением.

Настоящая работа также дает формальную методику построения автоматов по экспертным знаниям, которую не обеспечивают аналогичные работы по распознаванию ситуаций на основе конечных автоматов [3, 4, 6].

Работа в целом не ограничена одной предметной областью. Результаты, полученные в ней, могут быть применимы в различных областях, где имеет место движение объектов. Для проверки полученных результатов была выбрана среда уличного дорожного движения. Основное содержание работы изложено в трех разделах. В первом разделе описывается метод представления ситуаций, подлежащих распознаванию, в виде эталонных моделей, во втором разделе описывается методика порождения путем моделирования в виртуальной среде видеопотоков, используемых для построения эталонных моделей поведения и для анализа ситуаций, в третьем разделе описывается метод распознавания ситуаций на основе эталонных моделей и результатов виртуального моделирования. В заключение подводятся итоги работы.

**1. Представление эталонных ситуаций, подлежащих распознаванию.** В данном разделе рассматривается метод представления ситуаций с участием движущихся объектов в виде иерархии нечетких конечных автоматов. Следуя данному методу, эксперт задает признаки, лингвистические переменные, отношения между объектами и последовательности изменения этих отношений, характерные для распознаваемой ситуации. В результате представления ситуации получается эталонная модель ситуации, которая затем используется для распознавания похожих ситуаций без участия эксперта. Эталонная модель ситуации — это формализованное представление ситуации в виде иерархии нечетких конечных автоматов.

Теоретические основы предложенного метода представления ситуаций в виде иерархии нечетких конечных автоматов подробно изложены в работе [14]. Для демонстрации сути предлагаемого метода будем использовать примеры опасных ситуаций, возникающих при пересечении автомобилями перекрестка.

Модифицируем ряд понятий и обозначений, введенных в работе [14], применительно к нашей задаче. Введем дискретную шкалу виртуальных моментов времени  $T = \{t | t \in N\}$  такую, что разность  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  между двумя соседними отсчетами времени является константой. Определим на шкале  $T$  временной интервал  $[t_s, t_e] = \{t | t_s \leq t \leq t_e\}$ . Будем полагать, что каждый признак 0-го уровня (в нашем примере это расстояние и скорость) каждого движущегося объекта  $\theta$  из некоторого множества объектов  $\{\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^l\}$  в момент времени  $t$  может принимать значение  $y_{i_0}(\theta_t)$ ,  $i_0 \in \{1, \dots, m_0\}$ , которое называется *отсчетом*. Кортеж отсчетов  $Y_{i_0}[t_s, t_e] = \langle y_{i_0}(\theta_{t_s}), \dots, y_{i_0}(\theta_{t_e}) \rangle$ ,  $i_0 \in \{1, \dots, m_0\}$  одного признака 0-го уровня в течение нескольких подряд идущих моментов времени  $t_s, \dots, t_e$  (в течение временного интервала  $[t_s, t_e]$ ) называется *трендом*.

Рассмотрим аварийную ситуацию. Пусть имеется прямоугольный автодорожный перекресток. Автомобиль  $A$  движется по дороге в сторону перекрестка и приостанавливается, немного не доехав до него. Автомобиль  $B$  движется в сторону перекрестка по перпендикулярной дороге. Когда автомобиль  $B$  уже подъезжает к перекрестку, автомобиль  $A$  вдруг набирает скорость и сталкивается с автомобилем  $B$ .

Для задания эталонной ситуации поведения автомобилей прежде всего требуется выбрать необходимые признаки. Пусть автомобили  $A$  и  $B$  выезжают на перекресток, двигаясь по взаимно перпендикулярным прямым линиям, пересекающимся в точке  $O$  (рис. 1).

Свяжем с перекрестком прямоугольную декартову систему координат  $xOy$  так, чтобы ось  $Ox$  совпала с линией движения автомобиля

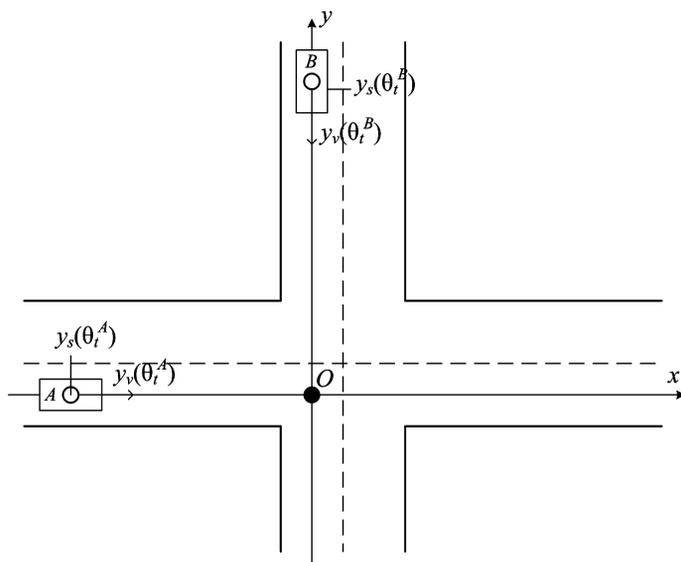


Рис. 1. Движение автомобилей в системе координат, связанной с перекрестком

$A$ , а ось  $Oy$  — с линией движения автомобиля  $B$  (см. рис. 1). Для простоты представим каждый автомобиль в виде прямоугольника и будем считать, что координаты местонахождения автомобилей совпадают с геометрическими центрами соответствующих прямоугольников. Поскольку автомобили двигаются строго вдоль координатных осей, для определения текущего местоположения автомобилей достаточно соответственно координат  $y_s(\theta_t^A)$ ,  $y_s(\theta_t^B)$ , отсчитываемых от центра координат (центра перекрестка) по соответствующим осям. Координаты местоположения  $y_s(\theta_t^A)$ ,  $y_s(\theta_t^B)$  являются первыми признаками. Вторыми признаками являются соответственно скорости движения автомобилей  $y_v(\theta_t^A)$  и  $y_v(\theta_t^B)$ .

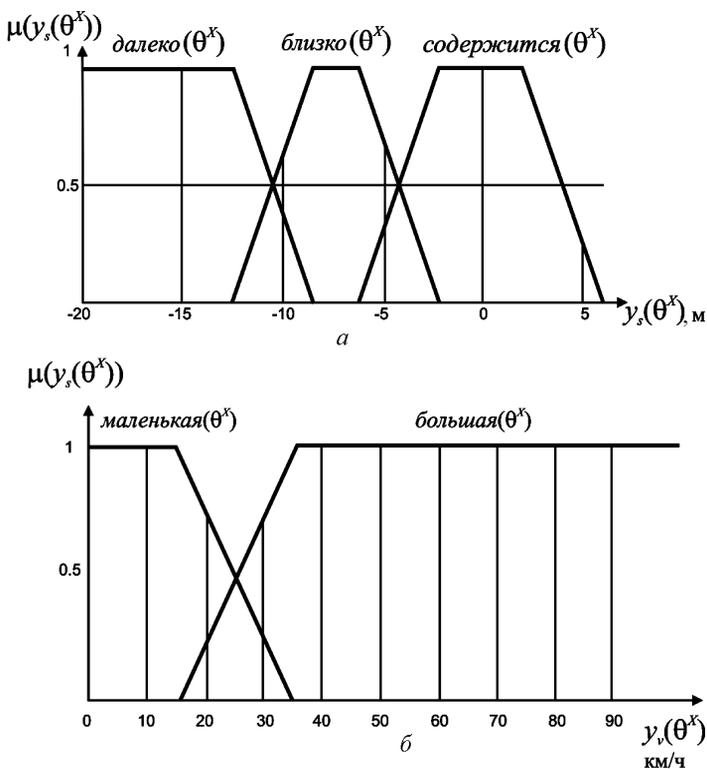
После выбора признаков необходимо задать интервал времени наблюдения  $[t_s, t_e] = \{t | t_s \leq t \leq t_e\}$ , а также моменты времени  $t = \{t | t_s \leq t \leq t_e\}$  внутри интервала  $[t_s, t_e]$ , когда осуществляются отсчеты. Обычно интервал определяется некоторыми физическими соображениями, например максимально возможным временем прохождения определенного участка дороги; моменты времени диктуются выбранной аппаратурой наблюдения, например видеокамерой. В настоящей статье конкретные значения этих параметров нас не интересуют. Будем считать, что как интервал времени наблюдения  $[t_s, t_e]$ , так и моменты времени  $t = \{t | t_s \leq t \leq t_e\}$  выбраны по некоторым соображениям.

После этого по аналогии с работой [14] вводятся лингвистические переменные и строятся эталонные модели поведения движущихся объектов. Для автомобилей  $A$  и  $B$  соответственно вводятся пары лингвистических переменных: *место*( $\theta^A$ ), *скорость*( $\theta^A$ ) и *место*( $\theta^B$ ), *скорость*( $\theta^B$ ), характеризующих местонахождение и скорость соответствующих автомобилей. Лингвистические переменные *место*( $\theta^A$ ) и *место*( $\theta^B$ ) принимают лингвистические значения *далеко*( $\theta^X$ ), *близко*( $\theta^X$ ) и *содержится*( $\theta^X$ ). Лингвистические переменные *скорость*( $\theta^A$ ) и *скорость*( $\theta^B$ ) принимают лингвистические значения *большая*( $\theta^X$ ) и *маленькая*( $\theta^X$ ).

Нечеткие множества, соответствующие лингвистическим значениям *далеко*( $\theta^X$ ), *близко*( $\theta^X$ ), *содержится*( $\theta^X$ ) и *большая*( $\theta^X$ ), *маленькая*( $\theta^X$ ), показаны соответственно на рис. 2.

Нечеткие множества, показанные на рис. 2, используются для построения эталонных нечетких автоматов  $M_{\text{место}(\theta_t^X)}[\theta_{t_s}^X, \theta_{t_e}^X]$ ,  $M_{\text{скорость}(\theta_t^A)}[\theta_{t_s}^A, \theta_{t_e}^A]$  и  $M_{\text{скорость}(\theta_t^B)}[\theta_{t_s}^B, \theta_{t_e}^B]$  1-го уровня, характеризующих местоположение и скорость автомобилей.

Автомат  $M_{\text{место}(\theta_t^X)}[\theta_{t_s}^X, \theta_{t_e}^X]$ , представленный графом на рис. 3, а, задает последовательность лингвистических значений [*далеко*( $\theta^X$ ), *близко*( $\theta^X$ ), *содержится*( $\theta^X$ )] лингвистической переменной *место*( $\theta_t^X$ ).

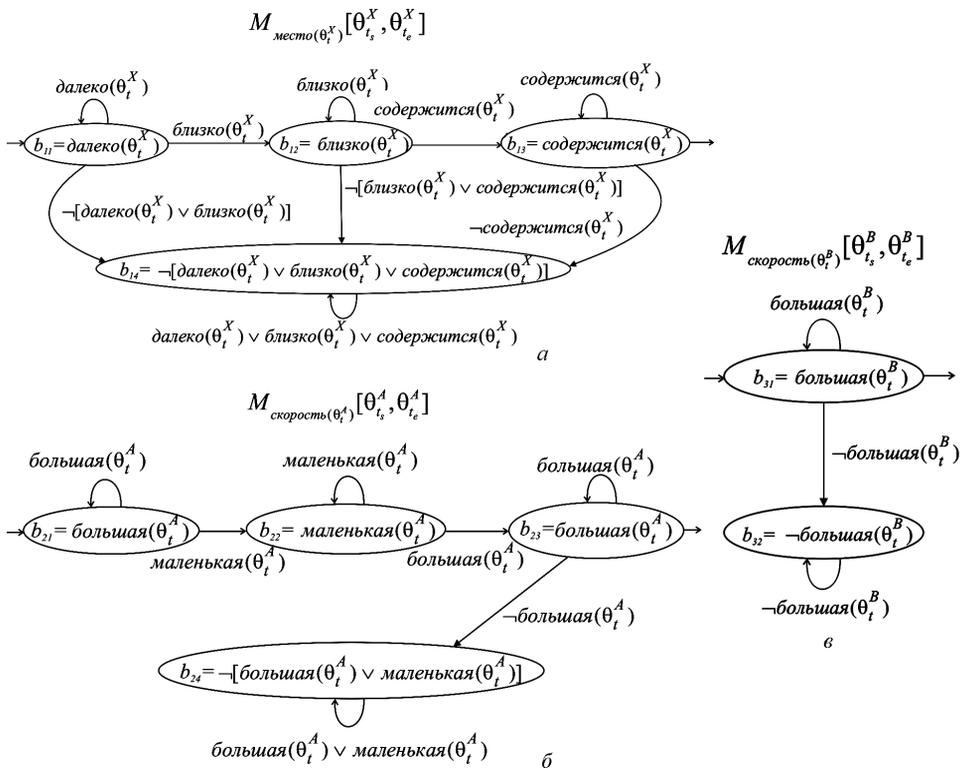


**Рис. 2. Нечеткие множества, соответствующие лингвистическим значениям:**  
*a* – далеко( $\theta^X$ ), близко( $\theta^X$ ), содержится( $\theta^X$ ); *б* – большая( $\theta^X$ ), маленькая( $\theta^X$ )

Состояния автомата  $b_{11}, b_{12}, b_{13}$  соответствуют лингвистическим значениям *далеко( $\theta^X$ )*, *близко( $\theta^X$ )*, *содержится( $\theta^X$ )*. Здесь  $b_{11}$  – начальное состояние автомата (помечено входящей стрелкой на рис. 3, *a*),  $b_{13}$  – конечное состояние автомата (помечено выходящей стрелкой на рис. 3, *a*). Условия переходов между состояниями автомата задаются следующим образом. При поступлении на вход автомата лингвистического значения, соответствующего текущему состоянию, автомат остается в этом состоянии. При поступлении на вход автомата лингвистического значения, отличного от того, которому соответствует данное состояние, автомат переходит в другое состояние, соответствующее этому новому лингвистическому значению. При поступлении на вход автомата лингвистического значения, не соответствующего ни одному из лингвистических значений, автомат переходит в запрещенное состояние  $b_{14}$ . Однажды попав в запрещенное состояние, автомат остается в этом состоянии при любых значениях на входе.

Графы автоматов  $M_{\text{скорость}(\theta_t^A)}[\theta_{t_s}^A, \theta_{t_e}^A]$  и  $M_{\text{скорость}(\theta_t^B)}[\theta_{t_s}^B, \theta_{t_e}^B]$  представлены на рис. 3, *б* и *в*. Графы различны, поскольку в рассматриваемой ситуации автомобили ведут себя по-разному.

Для задания опасной ситуации совместного поведения автомобилей построим эталонный автомат 2-го уровня. Для этого введем лин-



**Рис. 3. Граф автомата 1-го уровня:**

$a - M_{\text{место}(\theta_t^X)}[\theta_{t_s}^X, \theta_{t_e}^X]$ ;  $б - M_{\text{скорость}(\theta_t^A)}[\theta_{t_s}^A, \theta_{t_e}^A]$ ;  $в - M_{\text{скорость}(\theta_t^B)}[\theta_{t_s}^B, \theta_{t_e}^B]$

гвистическую переменную *обстановка*  $(\theta^A, \theta^B)$ , которая принимает лингвистические значения *безопасная* $(\theta^A, \theta^B)$ , *предварийная* $(\theta^A, \theta^B)$  и *аварийная* $(\theta^A, \theta^B)$ , заданные следующими отношениями:

$$\begin{aligned} \text{безопасная}(\theta^A, \theta^B) &= \\ &= [\text{место}(\theta^A) = \text{далеко}(\theta^A)] \wedge [\text{место}(\theta^B) = \text{далеко}(\theta^B)]; \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{предварийная}(\theta^A, \theta^B) &= \\ &= [\text{место}(\theta^A) = \text{близко}(\theta^A)] \wedge [\text{скорость}(\theta^B) = \text{большая}(\theta^B)] \vee \\ &\vee [\text{скорость}(\theta^A) = \text{большая}] \wedge [\text{место}(\theta^B) = \text{близко}]; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{аварийная}(\theta^A, \theta^B) &= [\text{место}(\theta^A) = \text{содержится}(\theta^A)] \wedge \\ &\wedge [\text{место}(\theta^B) = \text{содержится}(\theta^B)]. \quad (3) \end{aligned}$$

Каждому лингвистическому значению лингвистической переменной *обстановка* $(\theta^A, \theta^B)$  соответствует производное нечеткое множество, заданное на многомерном универсуме. Универсум производного

нечеткого множества получается в результате прямого декартова произведения универсумов нечетких множеств, входящих в задающее его отношение [15]. Например, с учетом формулы (1):

$$\text{dom} [\text{безопасно}(\theta^A, \theta^B)] = \text{dom} [\text{близко}(\theta^A)] \times \text{dom} [\text{далеко}(\theta^B)],$$

где  $\text{dom}(M)$  — универсум нечеткого множества  $M$ ;  $\times$  — прямое декартово произведение.

Функция принадлежности производного нечеткого множества выражается через функции принадлежности нечетких множеств, входящих в задающее его отношение, согласно следующим правилам выполнения операций над нечеткими множествами:

$$a = b \wedge c \Rightarrow R_a(y_b, y_c) = \min \{R_b(y_b), R_c(y_c)\}; \quad (4)$$

$$a = b \vee c \Rightarrow R_a(y_b, y_c) = \max \{R_b(y_b), R_c(y_c)\}; \quad (5)$$

$$a = \neg b \Rightarrow R_a(y_b) = 1 - R_b(y_b). \quad (6)$$

Здесь  $a, b, c$  — нечеткие множества;  $R_X$  — функция принадлежности нечеткого множества  $X$ , определенная на универсуме  $\text{dom}[X]$ ;  $y_b \in \text{dom}[b], y_c \in \text{dom}[c]$  — значения признаков, взятые из соответствующих универсумов.

Так, формула (4) означает, что функция принадлежности производного нечеткого множества, заданного в виде конъюнкции двух нечетких множеств, принимается равной наименьшей из функций принадлежности составляющих нечетких множеств.

Функция принадлежности позволяет количественно оценить степень соответствия текущих значений признаков конкретному значению лингвистической переменной.

Лингвистическая переменная  $\text{обстановка}(\theta^A, \theta^B)$  принимается равной тому лингвистическому значению, которое имеет наибольшую функцию принадлежности.

Нечеткий автомат 2-го уровня  $M_{\text{обстановка}(\theta^A, \theta^B)}[\Theta_{t_s}^{A,B}, \Theta_{t_e}^{A,B}], \Theta_t^{A,B} = \{\theta_t^A, \theta_t^B\}$ , характеризующий совместное поведение автомобилей, показан на рис. 4.

Эталонная модель ситуации приведена на рис. 5. Она состоит из пяти схем формирования и обработки лингвистических переменных, выстроенных в два уровня. Каждая схема вычисляет значение соответствующей лингвистической переменной и передает его на вход соответствующего автомата.

Распознавание ситуации осуществляется следующим образом. Сначала все автоматы 1-го и 2-го уровней выставляются в начальные состояния. Затем отсчеты признаков для последовательных моментов времени  $t \in [t_s, t_e]$  по очереди подаются на входы схем формирования и обработки значений лингвистических переменных 1-го уровня



обстановка( $\theta^A, \theta^B$ ). При этом состояния автоматов 1-го и 2-го уровней могут измениться. Если после обработки всех отсчетов автоматы 1-го и 2-го уровней перешли в конечные состояния, ситуация считается распознанной. Если хотя бы один из автоматов не перешел в конечное состояние, ситуация считается нераспознанной.

Процесс распознавания ситуации по трендам признаков и вычисления степени соответствия трендов эталонной модели будет подробно рассмотрен в третьем разделе настоящей статьи.

**2. Моделирование трендов в виртуальной среде.** В первом разделе был предложен подход к построению эталонных моделей для распознавания ситуаций на множестве движущихся объектов, позволяющий строить эти модели для целого класса однотипных ситуаций, различающихся длительностью интервалов, в течение которых лингвистические переменные сохраняют одно и то же значение, но задающих одинаковые отношения между лингвистическими переменными на этих интервалах. Эталонные модели могут формироваться экспертно. В этом случае эксперт, помимо выбора функций принадлежности, должен сам принять решение о том, какими должны быть отношения на интервалах, приводящие к ситуациям, требующим распознавания. Для этого необходимо априорно хорошо знать поведение объектов в таких ситуациях. Если экспертное построение эталонных моделей невозможно вследствие отсутствия требуемых для этого знаний, то выходом из этого положения является либо наблюдение за поведением реальных объектов в окружающей реальной среде, либо наблюдение за поведением виртуальных объектов в виртуальной среде. В процессе наблюдения формируются все необходимые тренды. Затем эти тренды используются для формирования эталонных моделей ситуаций, а также для распознавания ситуаций по эталонным моделям.

В настоящей работе в качестве виртуальной среды был выбран гоночный симулятор TORCS [16]. Гоночный симулятор позволяет визуально имитировать поведение автомобилей с помощью воздействия на него специальными командами и формировать видеозапись этого поведения. Полученная видеозапись поведения автомобилей обрабатывается специальным образом для получения трендов.

Например, пусть нашей задачей является формирование эталонной модели для анализа аварийной ситуации, рассмотренной ранее.

Тренды координат и скоростей автомобилей, полученные для нашего примера в графическом виде, приведены на рис. 6. Координата автомобиля *A* монотонно возрастает, поскольку он движется в направлении, совпадающем с направлением соответствующей координатной оси. Координата автомобиля *B* монотонно убывает, поскольку он движется в направлении, противоположном направлению соответствующей координатной оси. Полученные тренды используются для формирования эталонных автоматов следующим образом.

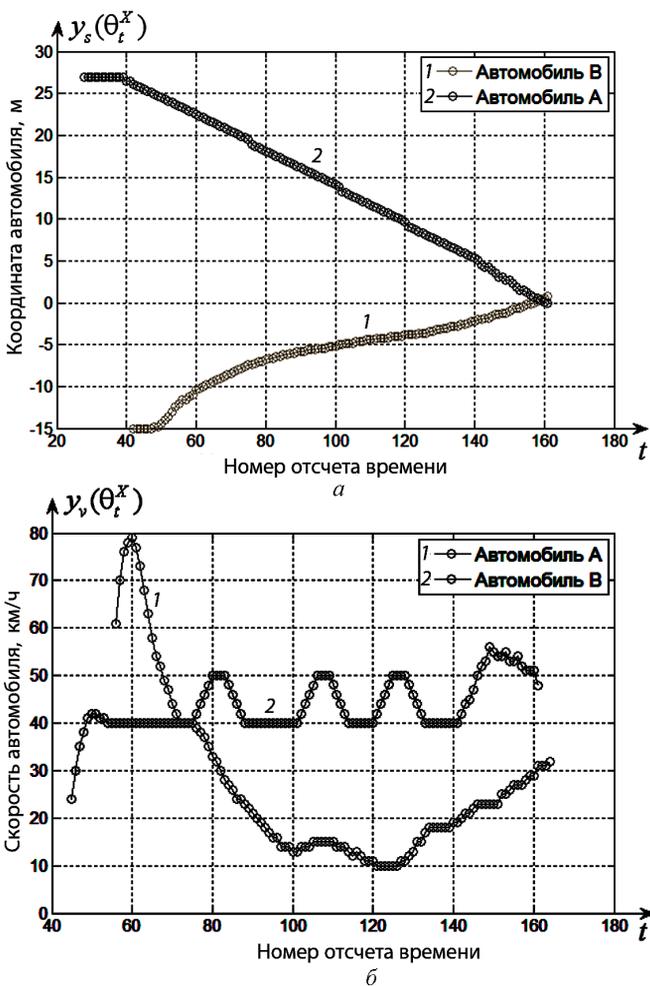
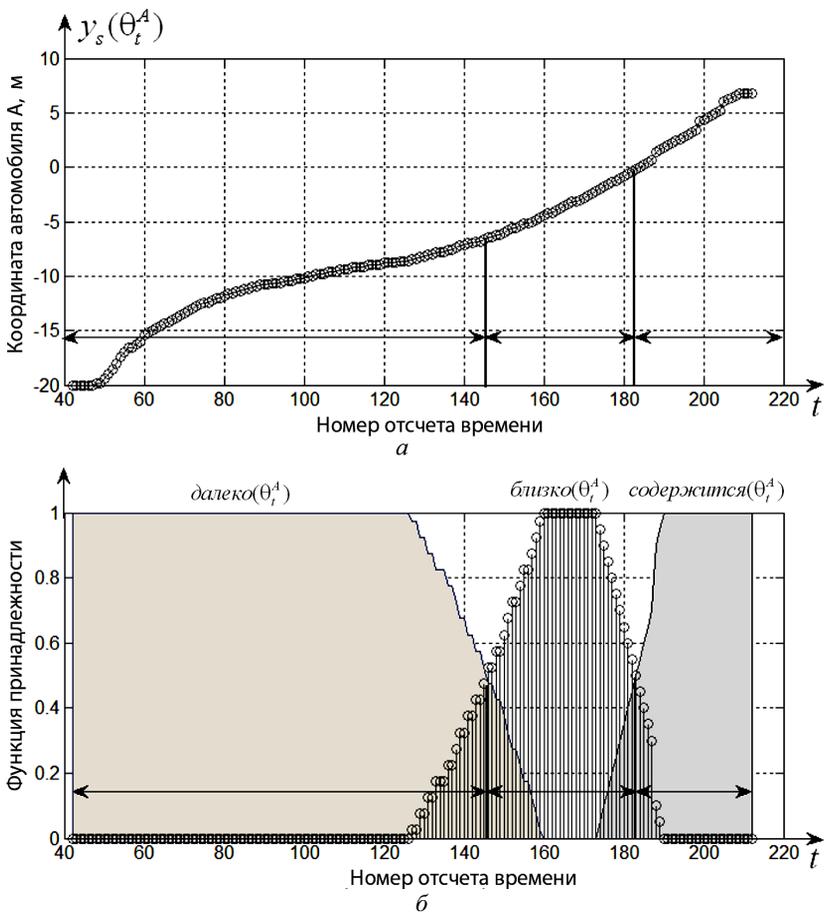


Рис. 6. Тренды координат (а) и скоростей (б) автомобилей

Эталонный автомат 1-го уровня  $M_{место}(\theta_t^A)[\theta_{t_s}^A, \theta_{t_e}^A]$  составляется по тренду координаты автомобиля А (см. рис. 6, а). Для каждого отсчета тренда определяется лингвистическое значение лингвистической переменной  $место(\theta_t^A)$ , которое имеет наибольшую функцию принадлежности. Затем тренд разбивается на участки с постоянными значениями лингвистической переменной (рис. 7). Последовательность значений лингвистической переменной, соответствующих полученным участкам тренда, дает цепочку разрешенных состояний автомата  $M_{место}(\theta_t^A)[\theta_{t_s}^A, \theta_{t_e}^A]$  (см. рис. 3, а).

Эталонный автомат 2-го уровня  $M_{место}(\theta_t^A, \theta_t^B)[\Theta_{t_s}^{A,B}, \Theta_{t_e}^{A,B}]$  составляется по результатам обработки трендов всех четырех признаков (см. рис. 6). Для каждого момента времени  $t \in [t_s, t_e]$  определяется лингвистическое значение лингвистической переменной  $обстановка(\theta_t^A, \theta_t^B)$ , которое имеет наибольшую функцию принадлежности. Расчет функ-



**Рис. 7. Результат обработки тренда координаты автомобиля А:**  
*a* — исходный тренд; *б* — значения функций принадлежности отсчетов тренда, соответствующих лингвистическим значениям переменной  $место(\theta_t^A)$

ций принадлежности ведется в соответствии с формулами (1)–(3) по правилам (4)–(6) с использованием функций принадлежности лингвистических переменных  $место(\theta_t^A)$ ,  $место(\theta_t^B)$ ,  $скорость(\theta_t^A)$  и  $скорость(\theta_t^B)$ , полученных при построении автоматов 1-го уровня. Затем интервал времени  $[t_s, t_e]$  разбивается на промежутки с постоянными значениями лингвистической переменной  $обстановка(\theta_t^A, \theta_t^B)$ . Последовательность значений лингвистической переменной, соответствующих полученным промежуткам времени, дает цепочку разрешенных состояний автомата  $M_{обстановка(\theta_t^A, \theta_t^B)}[\Theta_{t_s}^{A,B}, \Theta_{t_e}^{A,B}]$  (см. рис. 4).

**3. Распознавание ситуаций на основе эталонных моделей и результатов виртуального моделирования.** Рассмотрим процесс распознавания ситуации, заданной эталонной моделью (см. рис. 5), по трендам признаков (см. рис. 6).

Тренды признаков заданы на интервале времени  $t \in [t_0, t_{212}]$ ,  $t_0 = 0$  с,  $t_{212} = 7,07$  с (шаг дискретизации  $\Delta t = 0,03$  с). Эталонная мо-

дель включает в себя четыре автомата 1-го уровня  $M_{место(\theta_t^A)}[\theta_{t_0}^A, \theta_{t_{212}}^A]$ ,  $M_{скорость(\theta_t^A)}[\theta_{t_0}^A, \theta_{t_{212}}^A]$ ,  $M_{место(\theta_t^B)}[\theta_{t_0}^B, \theta_{t_{212}}^B]$ ,  $M_{скорость(\theta_t^B)}[\theta_{t_0}^B, \theta_{t_{212}}^B]$  и один автомат 2-го уровня  $M_{обстановка(\theta_t^A, \theta_t^B)}[\Theta_{t_0}^{A,B}, \Theta_{t_{212}}^{A,B}]$ . Перед началом обработки трендов все автоматы сбрасываются в начальные состояния.

Обработка трендов начинается с момента времени  $t = t_0$ . Соответствующие отсчеты признаков  $y_s(\theta_{t_0}^A) = -20$  м,  $y_v(\theta_{t_0}^A) = 60$  км/ч,  $y_s(\theta_{t_0}^B) = 10$  м,  $y_v(\theta_{t_0}^B) = 30$  км/ч подаются на входы схем формирования и обработки лингвистических переменных 1-го уровня (см. рис. 5). Отсчет координаты автомобиля  $A$   $y_s(\theta_{t_0}^A) = -20$  м подается на вход схемы формирования и обработки лингвистической переменной  $место(\theta_t^A)$ . Происходит вычисление значений функций принадлежности для всех возможных значений каждой лингвистической переменной (см. рис. 2, а). Лингвистическая переменная принимается равной тому лингвистическому значению, которое дает самую большую функцию принадлежности для текущего отсчета признака:

$$место(\theta_{t_0}^A) = далеко(\theta^A), R_{далеко(\theta^A)}(y_s(\theta_{t_0}^A)) = 1,0. \quad (7)$$

Полученное лингвистическое значение подается на вход автомата 1-го уровня  $M_{место(\theta_t^A)}[\theta_{t_0}^A, \theta_{t_{212}}^A]$ . На дугах графа (см. рис. 3, а) автомата указаны условия, которым должна удовлетворять лингвистическая переменная  $место(\theta_t^A)$  для активации соответствующих переходов. После сброса автомат находится в начальном состоянии  $b_{11}$ . При поступлении на вход значения лингвистической переменной  $место(\theta_{t_0}^A) = далеко(\theta^A)$  активизируется петлевой переход, и автомат остается в состоянии  $b_{11}$ . Аналогичным образом вычисляются и обрабатываются на автоматах 1-го уровня значения лингвистических переменных  $скорость(\theta_{t_0}^A)$ ,  $место(\theta_{t_0}^B)$  и  $скорость(\theta_{t_0}^B)$ :

$$скорость(\theta_{t_0}^A) = большая(\theta^A), R_{большая(\theta^A)}(y_v(\theta_{t_0}^A)) = 1,0; \quad (8)$$

$$место(\theta_{t_0}^B) = далеко(\theta^B), R_{далеко(\theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^B)) = 1,0; \quad (9)$$

$$скорость(\theta_{t_0}^B) = большая(\theta^B), R_{большая(\theta^B)}(y_v(\theta_{t_0}^B)) = 1,0. \quad (10)$$

Значения функций принадлежности всех возможных лингвистических значений переменных, полученные схемами формирования и обработки лингвистических переменных 1-го уровня, подаются на вход схемы формирования и обработки лингвистической переменной  $обстановка(\theta_t^A, \theta_t^B)$  2-го уровня. Функции принадлежности лингвистических значений лингвистической переменной  $обстановка(\theta_t^A, \theta_t^B)$  вычисляются в соответствии с формулами (1)–(3) по правилам (4)–(6):

$$\begin{aligned} R_{безопасная(\theta^A, \theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^A), y_s(\theta_{t_0}^B)) &= \\ &= \min\{R_{далеко(\theta^A)}(y_s(\theta_{t_0}^A)); R_{далеко(\theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^B))\} = 1,0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{предаварийная}(\theta^A, \theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^A), y_s(\theta_{t_0}^B)) &= \\
&= \max\{\min\{R_{\text{близко}(\theta^A)}(y_s(\theta_{t_0}^A)); R_{\text{большая}(\theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^B))\}; \\
&\quad \min\{R_{\text{большая}(\theta^A)}(y_s(\theta_{t_0}^A)); R_{\text{близко}(\theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^B))\}\} = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{\text{аварийная}(\theta^A, \theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^A), y_s(\theta_{t_0}^B)) &= \\
&= \min\{R_{\text{содержится}(\theta^A)}(y_s(\theta_{t_0}^A)); R_{\text{содержится}(\theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^B))\} = 0.
\end{aligned}$$

Лингвистическая переменная *обстановка* $(\theta_{t_0}^A, \theta_{t_0}^B)$  принимается равной тому лингвистическому значению, которое имеет наибольшее значение функции принадлежности:

$$\begin{aligned}
\text{обстановка}(\theta_{t_0}^A, \theta_{t_0}^B) &= \\
&= \text{безопасная}(\theta^A, \theta^B), R_{\text{безопасная}(\theta^A, \theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^A), y_s(\theta_{t_0}^B)) = 1, 0.
\end{aligned}$$

Полученное лингвистическое значение подается на вход автомата 2-го уровня  $M_{\text{обстановка}(\theta_t^A, \theta_t^B)}[\Theta_{t_0}^{A,B}, \Theta_{t_{212}}^{A,B}]$ . Граф автомата приведен ранее (см. рис. 4). После сброса автомат находится в начальном состоянии  $b_{41}$ . При поступлении на вход автомата лингвистического значения лингвистической переменной *обстановка* $(\theta_{t_0}^A, \theta_{t_0}^B) = \text{безопасная}(\theta^A, \theta^B)$  активизируется петлевой переход и автомат остается в состоянии  $b_{41}$ .

Итак, для момента времени  $t = t_0$  были вычислены лингвистические значения всех лингвистических переменных, а также значения функций принадлежности признаков, соответствующих лингвистическим значениям (7)–(10). Теперь необходимо оценить, насколько точно обработанные отсчеты признаков соответствуют эталонной модели ситуации. Для отдельного момента времени  $t = t_0$  искомая степень соответствия принимается равной значению наименьшей из полученных функций принадлежности:

$$\begin{aligned}
\eta_{t_0} = \min\{ &R_{\text{далеко}(\theta^A)}(y_s(\theta_{t_0}^A)); \\
&R_{\text{большая}(\theta^A)}(y_v(\theta_{t_0}^A)); \\
&R_{\text{далеко}(\theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^B)); \\
&R_{\text{большая}(\theta^B)}(y_v(\theta_{t_0}^B)); \\
&R_{\text{безопасная}(\theta^A, \theta^B)}(y_s(\theta_{t_0}^A), y_s(\theta_{t_0}^B))\} = 1, 0.
\end{aligned}$$

Далее аналогично обрабатываются отсчеты признаков для всех остальных моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_{212}$ . Промежутки времени пребывания автомата  $M_{\text{место}(\theta_t^A)}[\theta_{t_0}^A, \theta_{t_{212}}^A]$  в каждом состоянии приведены ранее (см. рис. 7). Поскольку в результате обработки трендов все автоматы перешли в конечные состояния, ситуация считается распознан-

ной. Степень соответствия обработанных трендов признаков эталонной модели ситуации вычисляется по формуле

$$\eta = \min_{t \in [t_s, t_e]} \eta_t = \min_{t \in [t_0, t_{149}]} \eta_t = 0,91.$$

Чем ближе показатель  $\eta$  к единице, тем точнее тренды признаков соответствуют эталонной модели ситуации и тем выше достоверность распознавания ситуации. Полученное значение  $\eta = 0,91$  свидетельствует о высокой достоверности распознавания ситуации.

**Заключение.** Настоящая работа представляет основы подхода для анализа ситуаций в среде движущихся объектов, начиная с описания анализируемых ситуаций, последующего моделирования трендов и заканчивая их распознаванием и визуализацией результатов. Разработана методика для формального представления ситуаций в виде двухуровневых иерархических нечетких конечных автоматов. Подготовлена и испытана платформа для моделирования ситуаций с участием движущихся объектов в виртуальной среде. Предложен подход к анализу ситуаций по траекториям движения объектов.

В дальнейшем планируется провести более полное тестирование предложенных подходов на виртуальных данных, их соответствия реальным данным, а также автоматизированное извлечение данных для построения эталонных трендов и соответствующих им автоматов по результатам виртуального моделирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ениколопов С.Н., Кузнецова Ю.М. Задача распознавания ситуаций насилия с применением автоматизированных систем и методов искусственного интеллекта. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://psyjournals.ru/psyandlaw>. Проверено 10.03.2013.
2. Бескид П.П. Алгоритмическое обеспечение информационной поддержки оценивания динамической ситуации в многосенсорных системах при автоматическом сопровождении надводных объектов. Дис. . . д-ра техн. наук. СПб., 2006.
3. Tumer M.B., Belfore L.A., Ropella K.M. A syntactic methodology for automatic diagnosis by analysis of continuous time measurements using hierarchical signal representations // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 2003. Vol. 33B, no. 6. P. 951–965.
4. Bailador G., Trivioo G. Pattern recognition using temporal fuzzy automata // Fuzzy Sets and Systems. 2010. Vol. 161, no. 1. P. 37–55.
5. Zhi-Qiang L., Bruton L.T., Bezdek J.C. Dynamic image sequence analysis using fuzzy measures // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2001. Vol. 31B, no. 4. P. 557–572.
6. Bai L., Lao S., Jones G.J., Smeaton A.F. A Semantic content analysis model for sports video based on perception concepts and finite state machines // ICME. 2007. P. 1407–1410.
7. Li X., Hu W., Zhang Z., Zhang X., Luo G. Trajectory-based video retrieval using Dirichlet process mixture models // BMVC. 2008.

8. *Reed J.* Intersection Kinematics: A pilot study of driver turning behavior with application to pedestrian obscuration by A-pillars // Technical Report No. UMTRI-2008-54. 2008.
9. *Meyer-Delius D., Sturm J., Burgard W.* Regression-based online situation recognition for vehicular traffic scenarios // Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ international conference on Intelligent robots and systems, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA. 2009. P. 1711–1716.
10. *Candamo J., Shreve M., Goldgof D.B., Sapper D.B., Kasturi R.* Understanding transit scenes: a survey on human behavior-recognition algorithms // Trans. Intell. Transport. Sys. 2010. Vol. 11, no. 1. P. 206–224.
11. *Ballan L., Bertini M., Bimbo A., Seidenari L., Serra G.* Event detection and recognition for semantic annotation of video // Multimedia Tools Applications. 2011. Vol. 51, no. 1. P. 279–302.
12. *Brooks R.A.* A robust layered control system for a mobile robot // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1986. Vol. 2, no. 1. P. 14–23.
13. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
14. *Десятков В.В.* Пространственно-временной анализ ситуаций на множестве движущихся объектов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 3. С. 88–112.
15. *Румбеит В.В.* Диагностика тепловых сетей на основе онтологии повреждений. Дис. ... канд. техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1999.
16. *Espire E., Guionneau C.* Torcs – the open racing car simulator [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://torcs.sourceforge.net>. Проверено 10.03.2013.

## REFERENCES

- [1] *Enikolopov S.N., Kuznetsova Yu.M.* Zadacha raspoznavaniya situatsiy nasiliya s primeneniem avtomatizirovannykh sistem i metodov iskusstvennogo intellekta [The problem of recognizing the situations of violence with the use of automated systems and artificial intelligence methods]. *Psikhol. i Pravo* [Psychol. Law], 2011, no. 2. Available at: <http://psyjournals.ru/psyandlaw> (accessed 16 July 2013).
- [2] *Beskid P.P.* Algoritmicheskoe obespechenie informatsionnoy podderzhki otsenivaniya dinamicheskoy situatsii v mnogosensornykh sistemakh pri avtomaticheskoy soprovozhdenii nadvodnykh ob'ektov. Diss. dokt. tekhn. nauk [Algorithmic maintenance of the information support for estimating dynamic situations in multisensory systems with automatic tracking of surface objects. Dr. tehn. sci. diss.]. St. Petersburg, 2006. 350 p.
- [3] *Tumer M.B., Belfore L.A., Ropella K.M.* A syntactic methodology for automatic diagnosis by analysis of continuous time measurements using hierarchical signal representations. *IEEE Trans. Syst. Man Cyber. B*, 2003, vol. 33, no. 6, pp. 951–965.
- [4] *Bailador G., Trivoo G.* Pattern recognition using temporal fuzzy automata. *Fuzzy Sets and Syst.*, 2010, vol. 161, no. 1, pp. 37–55.
- [5] *Zhi-Qiang L., Bruton L.T., Bezdek J.C.* Dynamic image sequence analysis using fuzzy measures. *IEEE Trans. Syst. Man Cyber. B*, 2001, vol. 31, no. 4, pp. 557–572.
- [6] *Bai L., Lao S., Jones G.J., Smeaton A.F.* A semantic content analysis model for sports video based on perception concepts and finite state machines. *ICME*, 2007, pp. 1407–1410.
- [7] *Li X., Hu W., Zhang Z., Zhang X., Luo G.* Trajectory-based video retrieval using dirichlet process mixture models. *BMVC*, 2008. doi:10.5244/C.22.106
- [8] *Reed J.* Intersection kinematics: a pilot study of driver turning behavior with application to pedestrian obscuration by A-pillars. Technical Report No. UMTRI-2008-54, 2008.
- [9] *Meyer-Delius D., Sturm J., Burgard W.* Regression-based online situation recognition for vehicular traffic scenarios. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, Piscataway, 2009, pp. 1711–1716.

- [10] Candamo J., Shreve M., Goldgof D.B., Sapper D.B., Kasturi R. Understanding transit scenes: a survey on human behavior-recognition algorithms. *Trans. Intell. Transport. Sys.*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 206–224.
- [11] Ballan L., Bertini M., Bimbo A., Seidenari L., Serra G. Event detection and recognition for semantic annotation of video. *Multimedia Tools Appl.*, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 279–302.
- [12] Brooks R.A. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE J. Robotics Autom.*, 1986, vol. 2, no. 1, pp. 14–23.
- [13] Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Inf. Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.
- [14] Devyatkov V.V. Spatiotemporal analysis of the set of moving objects. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2011, no. 3, pp. 88–112 (in Russ.).
- [15] Rumbesht V.V. Diagnostika teplovykh setey na osnove ontologii povrezhdeniy. Diss. kand. tekhn. nauk [Diagnosis of heating systems based on damage ontology. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1999. 186 p.
- [16] Espiè E., Guionneau C. TORCS, the open racing car simulator. Available at: <http://torcs.sourceforge.net> (accessed 16 July 2013).

Статья поступила в редакцию 19.04.2013

Владимир Валентинович Девятков — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 научных работ в области искусственного интеллекта, распознавания образов, принятия решений, логических исчислений, представления знаний, теории конечных автоматов, логического синтеза и анализа дискретных устройств и систем. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.V. Deviatkov — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 120 publications in the field of artificial intelligence, pattern recognition, decision making, logic calculi, knowledge representation, theory of finite state machines, logical synthesis and analysis of discrete devices and systems. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Игорь Игоревич Лычков — аспирант и ассистент кафедры “Информационные системы и телекоммуникации” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

I.I. Lychkov — post-graduate of “Information Systems and Telecommunications” department of the Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.