

# ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВОДИТЕЛЯ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

## APPROACH TO DEVELOPMENT OF DRIVER'S DIGITAL TWIN MODEL OF HIGHLY AUTOMATED VEHICLE BASED ON HYBRID INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM

**D. Aladin  
B. Goryachkin  
O. Varlamov  
G. Afanasyev  
V. Timofeev**

*Summary.* The article proposes an approach to the development of a driver's digital twin model of a highly automated vehicle based on the superimposition of the processes of information perception and solving control problems in the subject area on the structure of a hybrid intelligent information system. In particular, the issue of presenting the driver's operational thinking in information models is considered. The proposed approach can be used in the development of a human operator's digital twins in industries undergoing the process of digital transformation.

*Keywords:* information model, digital twin, decision support system, hybrid intelligent information system, cyber-physical system, mivar approach, mivar nets.

**Аладин Дмитрий Владимирович**

Аспирант, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)  
aladin.dv@yandex.ru

**Горячкин Борис Сергеевич**

К.т.н., доцент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)  
bsgor@mail.ru

**Варламов Олег Олегович**

Д.т.н., профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)  
ovar@yandex.ru

**Афанасьев Геннадий Иванович**

К.т.н., доцент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)  
gaipcs@bmstu.ru

**Тимофеев Виктор Борисович**

Доцент, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)  
vbtimofeev@yandex.ru

*Аннотация.* В статье предложен подход к разработке модели цифрового двойника водителя высокоавтоматизированного транспортного средства, основанный на наложении процессов восприятия информации и решении задач управления в предметной области на структуру гибридной интеллектуальной информационной системы. В частности, рассматривается вопрос представления оперативного мышления водителя в информационных моделях. Предлагаемый подход может использоваться при разработке цифровых двойников человека-оператора в отраслях производства, подвергающихся процессу цифровой трансформации.

*Ключевые слова:* информационная модель, цифровой двойник, система поддержки принятия решений, гибридная интеллектуальная информационная система, киберфизическая система, миварный подход, миварные сети.

## Введение

**Н**абирающий темп цифровизации делает все более достижимым массовое внедрение киберфизических систем в производство и обслуживание человеческих потребностей, тем самым приближая четвертую промышленную революцию (Индустрия 4.0). Развитие информационных технологий в настоящее время способствует широкому распространению интеллектуальных и автономных систем во всех отраслях производства. Это помимо экономического эффекта оказывает влияние на безопасность в таких сферах, как транспортная. Автономное интеллектуальное транспортное средство (АИТС) рассматривается как достижимая цель для будущего автомобилестроения. Однако, вопросы безопасности участников дорожного движения при использовании интеллектуальных транспортных систем по-прежнему остаются ключевыми проблемами для их создания и коммерциализации. Обеспечение комплексной безопасности вызывает потребность в принятии новых средств при разработке и тестировании АИТС. Одним из важных средств при создании интеллектуальных транспортных систем стали цифровые двойники. Цифровой двойник является программным представлением физического объекта с абстракциями, необходимыми для моделирования его поведения в реальном мире. Работа с цифровым двойником позволяет выявлять проблемы отказоустойчивости и безопасности на ранних стадиях создания информационных систем транспортного средства [1]. Также цифровые двойники позволяют рассматривать взаимодействие с окружающей инфраструктурой [2].

Переход к полному автономному вождению без какого-либо участия человека во всех транспортных средствах не произойдет мгновенно. Поэтому АИТС будут в первое время взаимодействовать на дороге с другими транспортными средствами, управляемые человеком-водителем. В тоже время, в транспортные средства постепенно внедряются интеллектуальные и высокоавтоматизированные системы. Поэтому при управлении современным автомобильным транспортом человека можно рассматривать как оператора высокоавтоматизированного транспортного средства (ОВТС). Для составления полной картины взаимодействия АИТС с другими транспортными средствами требуется брать во внимание цифровые двойники ОВТС.

Целью данного исследования является разработка подхода к разработке модели цифрового двойника водителя высокоавтоматизированного транспортного средства. Для этого предлагается определить схему восприятия информации и решения задач управления в условиях функционирования интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и информационные потоки,

в рамках которого осуществляется управленческая деятельность ОВТС. На их основе строится модель ОВТС как гибридная интеллектуальная информационная система (ГИИС). Полученное представление будет моделью цифрового двойника водителя-оператора. В работе также исследуется вопрос представления сложно-формализуемых процессов, таких как оперативное мышление в структуре управления автомобилем.

### 1. Схема восприятия информации и решения задач управления в условиях функционирования высокоавтоматизированных систем

Управление автомобильным транспортным средством (ТС) является очень сложным процессом, включающим выполнение многочисленных интеллектуальных задач. Данная сложность обусловлена многочисленными взаимосвязями структурных единиц предметной области и динамически меняющейся средой, в которой работает транспорт. Иными словами, задача управления транспортом решается в контуре сверхбольшой эргатической системы (СБЭС). Для СБЭС характерными являются многоуровневость, централизация, непрерывное участие человека и высокая степень организации составляющих элементов [3]. Все это приводит к тому, что человек находится в состоянии высоконапряженной трудовой деятельности, которая непосредственно влияет на безопасность всех участников дорожного движения. Применение интеллектуальных систем снимает с человека часть управленческих функций, тем самым уменьшая напряженность трудовой деятельности без снижения требований к безопасности. Важно отметить, что при всем этом повышается технологическая сложность принятия решений и информационная насыщенность контура управления ТС. Составляющие элементы в схеме восприятия информации и принятия решений управления в автомобиле человеком, такие, как зрение, слух, память и мышление, постепенно дополняются интеллектуальными системами, комплексное развитие которых создает основу для АИТС.

Модель цифрового двойника ОВТС относится к классу информационных моделей. В информационной модели отображаются наиболее существенные взаимосвязи в системе «человек — машина». По этой причине для ее описания требуется определить то, каким образом взаимодействуют ИТС современного автомобиля с человеком.

Водитель-оператор в рамках СБЭС ТС участвует в восприятии информации и решении задач управления. Процесс обротки информации и принятия решений представлен на рис. 1. Схема представляет оператора в виде системы управления, на вход которой

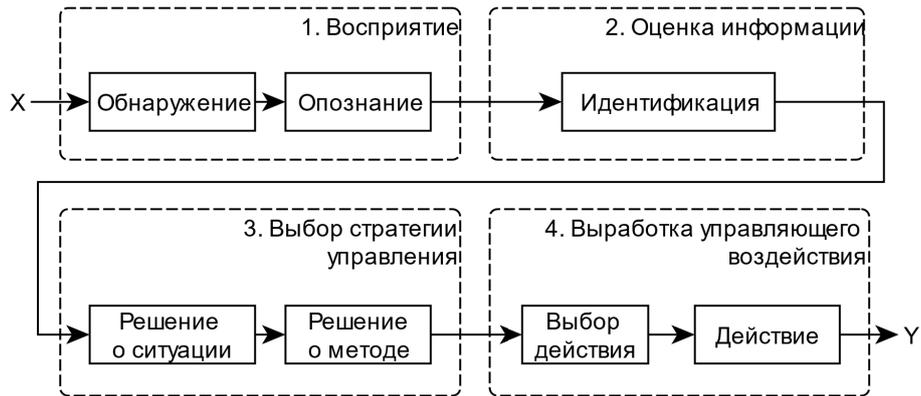


Рис. 1. Схема восприятия информации и решения задач управления

поступают данные об окружающей среде, на выходе — управленческие действия. Процесс управления можно разделить на 4 стадии: стадия 1 — восприятие, стадия 2 — оценка информации, стадия 3 — выбор стратегии управления, стадия 4 — выработка управляющего воздействия. Стадии 1 и 2 описывают собой перцептивное восприятие окружающего мира. На данных стадиях строится субъективный образ объектов, входящих в домен решения задачи оператора, который формируется через совокупность ощущений, воздействующих на анализатор и/или систему анализаторов. Перцептивное восприятие условно можно распределить на три этапа: обнаружение объектов внимания, опознание (выделение) информационных признаков и идентификация их внутри предметной области. На 3-ей стадии по полученным данным анализируется возможность решения задачи в текущей ситуации, выявляется необходимость в действиях и выбирается метод управления. Стадия 4 готовит набор действий и применяет их на объекте управления домена задачи.

Приведенная выше схема позволяет перейти к рассмотрению роли ИТС в процессах принятия решения по управлению автомобилем. Для этого из общего числа данных систем требуется выделить те, которые выполняют интеллектуально информационные функции в принятии решения, иными словами, выделить системы интеллектуальной информационной поддержки принятия решений (СИИППР). В работе [4] приведена классификация данных средств, а именно: 1 — информационные; 2 — информационно-советующие; 3 — автоматизированные управляющие; 4 — полностью автоматические управляющие. Особое внимание акцентируем на информационно-советующие СИИППР. Данные системы собирают информацию о текущем состоянии предметной области. Собранную информацию подвергают оценке и анализу, на основе которых формируется перечень рекомендаций по управлению.

Полученная оценка и проведенный анализ предоставляется в удобном для восприятия формате оператору.

Представленная классификация не связана с конкретной сферой применения СИИППР. Поэтому её можно применить для описания СИИППР в контуре управления транспортным средством, о которой далее пойдет речь.

## 2. Адаптивные системы поддержки водителя в контуре управления автомобилем

В автомобилях СИИППР представлены в составе адаптивных систем поддержки водителя (англ. Advanced Driver-Assistance Systems, ADAS), которые в разной степени помогают человеку в оперативном принятии решений для безопасного и легкого управления транспортным средством. ADAS также выполняют информационную функцию и позволяют водителю получить данные о возможных опасностях и предотвращать аварийные ситуации.

В работе [5] исследована семантически бинарная информация для водителя и ее источники. Под семантически бинарной информацией понимается информационное сообщение водителю, различимое по модальности, значимое в текущей дорожной ситуации и предписывающие рекомендации по управлению автомобилем. В этой же работе представлена классификация подсистем ADAS по модальности.

Данные системы осуществляют свое взаимодействие с водителем через визуальные, звуковые и тактильные уведомления и их можно классифицировать как информационно-советующие СИИППР. Водитель по своей сути является оператором СБЭС «Водитель — автомобиль — дорога — среда» (ВАДС) [6], где его тру-

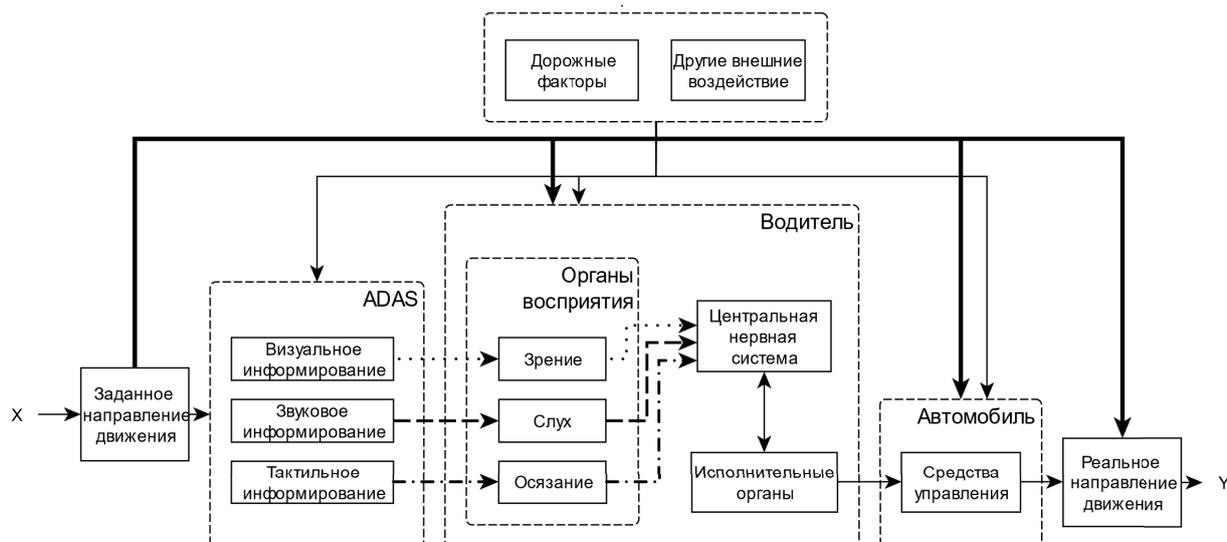


Рис. 2. Информационные потоки в СБЭС ВАДС

довая деятельность сводится к приему оперативной информации о текущей дорожной ситуации, ее обработке, принятию решений и выполнения управляющих воздействий, а также контролю за их исполнением.

Рассмотрим информационные потоки в процессе принятия решений по управлению автомобилем с учетом функционирования систем ADAS (рис. 2). В представленной схеме необходимо отметить, что органы восприятия человека входят в состав подсистемы центральной нервной системы, именуемой как «Анализатор», которая обеспечивает прием и первичный анализ информационных сигналов (рис. 1 стадия 1). Перечень органов анализатора на рисунке выбран в соответствии с типом поступающей семантически бинарной информацией от ADAS к человеку.

В соответствии с системным подходом в СБЭС ВАДС водителя и автомобиль можно представить в виде отдельных подсистем, в рамках каждой из которых функционируют свои собственные системы управления.

Таким образом, мы описали внешнюю среду, в рамках которой функционирует ОБТС. Далее сосредоточимся на рассмотрении водителя как интеллектуальной системы и алгоритме принятия решений в этой системе.

### 3. Водитель как гибридная интеллектуальная информационная система

Процесс принятия решений по управлению автомобилем раскладывается на некоторые интеллектуальные

функции, такие, как планирование, рассуждение, решение проблем и т.д., которые обеспечиваются органами человека, например, глазами, ушами и центральной нервной системой. Доподлинно неизвестно как функционируют органы человека, однако при разработке эргатических систем [3] их можно моделировать. Например, моделировать с помощью программно-прагматического подхода или применять бионический подход. В программно-прагматическом подходе неважно как устроено устройство, а важно, как оно реагирует на входные данные. При использовании бионического подхода устройство строится по образу и подобию органов человека. Необходимо отметить, что моделирование каждого отдельного органа может происходить с использованием различных интеллектуальных методов: продукционные правила, нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы и т.д. Взаимодействие данных модулей представляет собой работу ГИИС [7]. Отметим, что составляющие модули ГИИС могут быть представлены в виде миварных систем [8], многоуровневых наборов правил [9], метаграфов [10] и нейросетевых алгоритмов [11].

Далее рассмотрим вопрос распределения интеллектуальных систем водителя по группам. Для этого воспользуемся результатом системного анализа 3-х уровней исследований в области создания систем искусственного интеллекта [12], а именно: ДО-интеллектуальный уровень — SMART, интеллектуальный уровень — WISDOM, НАД-интеллектуальный уровень — SOCIAL. К уровню SMART относятся нейронные сети, эволюционные и другие методы, подобные рефлексам и реакциям. На данном уровне требуется мгновенно выполнить некоторое действие или обработать информа-

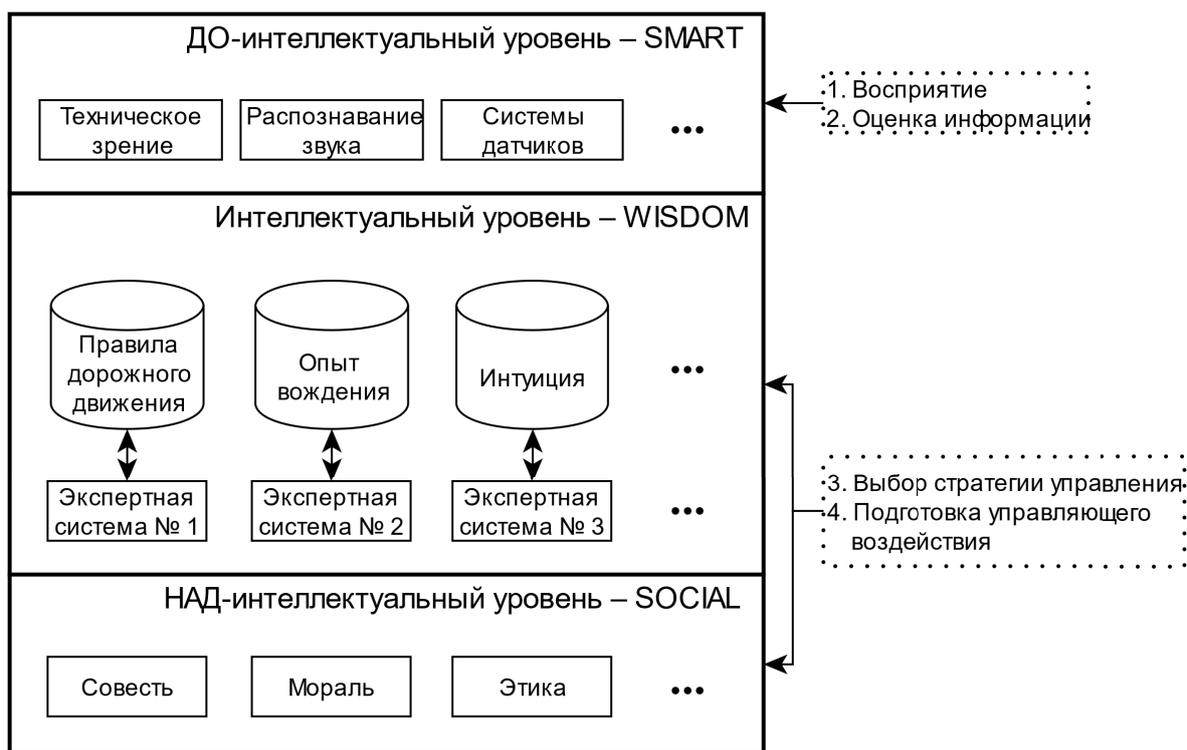


Рис. 3. Наложение схемы восприятия информации и решения задач управления на структуру ГИИС водителя

цию. Слою WISDOM присуще логические рассуждения и осознанное мышление. К нему можно отнести миварный логический интеллект [13] и метаграфы [10]. Важная отличительная особенность заключается в том, что системы данного уровня должны быть способны обосновать ответ на задачу, предъявив алгоритм решения. Уровень SOCIAL описывает задачи, которые неформализуемые или сложно формализуемые. Такие задачи выходят за логическое осознанное мышление, т.к. даже человек не осознает их процесс (эмоции, чувства, мораль и т.п.). На каждом таком уровне функционируют свои интеллектуальные системы. Если мы пока не знаем как действует НАД-интеллектуальный уровень, то текущее состояние научных исследований в области искусственного интеллекта позволяет нам составить упрощённую структуру слоев WISDOM и SMART.

Если применить программно-прагматический подход, то человек-водитель в контуре автомобиля представляет собой некую ГИИС, которая выполняет процесс восприятия информации и задачи управления (рис. 2). Для нашей модели цифрового двойника ОБТС была предложена структура ГИИС водителя, представленная на рис. 3. Данная схема отражает модель водителя и распределение ее составляющих в соответствии со схемой восприятия информации и принятия решения оператором (рис. 2).

На рис. 3 отображены лишь примеры возможных интеллектуальных систем. Однако, концептуально понятно какие должны выполняться этапы процесса восприятия и принятия решения на каждом уровне. Например, на слое SMART должны располагаться системы, отвечающие за удержание безопасного расстояния от впереди идущего автомобиля и контроль скорости ТС. Также на данном уровне необходимо расположить средства технического зрения, в состав которых, к примеру, входят полносвязанные нейронных сетей с двумя скрытыми слоями [14]. В состав группы WISDOM можно включить экспертные системы, на вход которых поступает информация о текущей информации, а на выходе строится логический вывод. Стоит отметить, что на конечное принятие решения влияет уровень SOCIAL, в которую входят подсистема «Этика», «Мораль», «Совесь» и т.д. Вопросы разработки систем «Этика» для интеллектуальных систем рассматриваются в работе [15].

Мы рассмотрели окружающую среду водителя, его взаимодействие с другими элементами в системе ВАДС, представили упрощённую формальную модель водителя как ГИИС и теперь для комплексного описания модели цифрового двойника ОБТС требуется представить подход к описанию процесса принятия решений в условиях дорожной обстановки. Для этого воспользуемся миварным подходом.

#### 4. Миварный подход в представлении оперативного мышления

Под оперативным мышлением понимается процесс решения практических задач, в результате которого формируется субъективная модель предполагаемой совокупности действий (плана операций), обеспечивающих решение поставленной задачи. При использовании миварного подхода для решения задач в предметной области строится логический вывод, позволяющий построить алгоритм действий по входным данным. Логический вывод строится по логическим правилам в базе знаний. В качестве источников таких правил в модели водителя как ГИИС (рис. 3) являются такие знания, как правила дорожного движения, реальный опыт вождения, интуиция и т.д. Под интуицией понимается некая форма непосредственного интеллектуального знания.

С примером работы оперативного мышления с точки зрения миварного подхода к логическому выводу при совершении маневра на перекрестке дорог можно ознакомиться в исследовании [8].

#### Заключение

Переход к транспортным средствам, управляемым интеллектуальными системами, связан с концепцией цифрового двойника, особенно в контексте проектирования автономных транспортных средств. Это вызывает необходимость принятия новых подходов по раз-

работке и тестированию транспортных средств с целью повышения безопасности всех участников дорожного движения и обеспечения требуемого уровня отказоустойчивости информационных систем. Для комплексной проверки взаимодействия интеллектуальных транспортных систем помимо цифровых двойников транспортных средств требуется разрабатывать цифровые двойники водителей.

Предложенный подход создания модели цифрового двойника водителя на основе гибридной интеллектуальной информационной системы содержит эволюционный механизм обновления. Поскольку он основан на программно-прагматическом моделировании, то цифровая модель водителя будет иметь структурную схожесть с цифровой моделью интеллектуальной транспортной системы автономного вождения. Поэтому с каждым обновлением программного обеспечения транспортное средство становится немного ближе к следующему уровню автономности, а наше представление о процессах управления оператором-водителем совершенствуется.

За счет модульности модели на базе гибридной интеллектуальной информационной системы, отдельные компоненты цифрового двойника водителя-оператора могут заменяться системами, которые будут уместны для конкретной предметной области. Благодаря этому представленный подход можно применять при разработке цифровых двойников человека-оператора в отраслях производства, в которых происходит процесс цифровой трансформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Digital Twin Analysis to Promote Safety and Security in Autonomous Vehicles / S. Almeaibed, S. Al-Rubaye, A. Tsourdos, N.P. Avdelidis // IEEE Communications Standards Magazine. — 2021. — Т. 5. — № 1. — С. 40–46.
2. Enabling and supporting car-as-a-service by digital twin modeling and deployment / C. Steinmetz, G.N. Schroeder, A. Rettberg [и др.] // 2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). — Grenoble, France: IEEE, 2021. — С. 428–433.
3. Горячкин Б.С. Эргономические проблемы в автоматизированной системе обработки информации и управления / Б.С. Горячкин // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2016. — Т. 14. — № 12. — С. 38–47.
4. Башлыков А.А. Концепция модели оперативного мышления для интеллектуального управления энергоснабжением в трубопроводных системах / А.А. Башлыков // Трубопроводный транспорт: теория и практика. — 2013. — Т. 37. — № 3. — С. 48–53.
5. Savchenko V.V. Classification of tablesemantically binary relevant information for drivers in highly automated vehicles / V.V. Savchenko, V.V. Litarovich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Т. 819. — С. 012042.
6. Dubovsky A.V. Conceptual model of the driver-car-road-environment system / A.V. Dubovsky, V.V. Savchenko // Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus. — 2019. — Т. 63. — № 1. — С. 112–120.
7. Черненький В.М. Структура гибридной интеллектуальной информационной системы на основе метаграфов / В.М. Черненький, В.И. Терехов, Ю.Е. Гапанюк // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2016. — № 9. — С. 3–13.
8. Варламов О.О. О создании миварных систем контроля за соблюдением правил дорожного движения на основе «Разуматоров» и экспертных систем / О.О. Варламов, Д.В. Аладин // Радиопромышленность. — 2018. — Т. 28. — № 2. — С. 25–35.
9. Самохвалов Э.Н. Генерация исходного кода программного обеспечения на основе многоуровневого набора правил / Э.Н. Самохвалов, Г.И. Ревунков, Ю.Е. Гапанюк // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. — 2014. — Т. 98. — № 5. — С. 77–87.

10. Гапанюк Ю.Е. Предикатное описание метаграфовой модели данных / Ю.Е. Гапанюк, Г.И. Ревунков, Ю.С. Федоренко // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2016. — Т. 14. — № 12. — С. 122–131.
11. Терехов В.И. О реализации нейросетевого алгоритма распознавания лиц на графических процессорах / В.И. Терехов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2013. — Т. 12. — С. 367–374.
12. Анализ возможностей миварного подхода для систем искусственного интеллекта и современной робототехники / Т.Л. Давыдова, О.О. Варламов, А.В. Остроух, М.Н. Краснянский // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2011. — Т. 17. — № 3. — С. 687–694.
13. Варламов О.О. Миварный подход как основа качественного перехода на новый уровень в области искусственного интеллекта / О.О. Варламов // Радиопромышленность. — 2017. — Т. 27. — № 4. — С. 13–25.
14. Применение метода обучения с расщеплением нейронов к полносвязной нейронной сети с двумя скрытыми слоями / В.И. Терехов, И.М. Черненко, С.В. Минакова, Ю.Е. Гапанюк // XIX Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2017». — 2017. — С. 19–28.
15. Варламов О.О. О необходимости разработки программной подсистемы «ЭТИКА» для автономных интеллектуальных роботов / О.О. Варламов // Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем (ММИУС-2018). — Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2018. — С. 166–173.

---

© Аладин Дмитрий Владимирович ( aladin.dv@yandex.ru ), Горячкин Борис Сергеевич ( bsgor@mail.ru ),  
Варламов Олег Олегович ( ovar@yandex.ru ), Афанасьев Геннадий Иванович ( gaipcs@bmstu.ru ),  
Тимофеев Виктор Борисович ( vbtimofeev@yandex.ru ).  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана