

Научная статья
УДК 656.18

Методика применения программно-аппаратного комплекса для испытаний высокоавтоматизированных колесных транспортных средств

Виталий Валентинович Гаевский¹, Максим Иванович Алексеенков²

^{1,2} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹vit-life@rambler.ru

²alexeenkovmaxim@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются проблемы создания и апробирования методики применения программно-аппаратного комплекса разработки и проведения виртуальных испытаний. Методика удовлетворяет требованиям “New Automated Test Methods” (NATM): обнаруживать и реагировать на действия объекта; обеспечить валидацию систем безопасности; принимать во внимание разработки других рабочих групп WP.29; учитывать существующие данные, исследования и технические стандарты, то есть способной осуществлять имитационное/виртуальное тестирование с заданной степенью точности и сходимости (адекватности) результатов.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, высокоавтоматизированное колесное транспортное средство, безопасность, прогнозирование, адекватность, валидация.

Для цитирования: Гаевский В.В., Алексеенков М.И. Методика применения программно-аппаратного комплекса для испытаний высокоавтоматизированных колесных транспортных средств // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

Methodology of applicaton of software and hardware complex for testing of highly automated vehicles

Vitalij V. Gaevskij¹, Maksim I. Alexeenkov²

^{1,2} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹vit-life@rambler.ru

²alexeenkovmaxim@mail.ru

Abstract. This article discusses the problems of creating and testing a methodology for using a hardware-software complex for developing and conducting virtual tests that meet the requirements of “New Automated Test Methods” (NATM): detect and respond to object actions;

ensure the validation of security systems; take into account the developments of other working groups of WP.29; take into account existing data, research and technical standards, that is, capable of performing simulation / virtual testing with a given degree of accuracy and convergence (adequacy) of the results.

Keywords: software and hardware complex, highly automated wheeled vehicle, safety, forecasting, adequacy, validation.

For citation: Gaevskij V.V., Alexeenkov M.I. Methodology of application of software and hardware complex for testing of highly automated vehicles. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Введение

В 178-й сессии Европейской экономической комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) для согласования правил в области транспортных средств (WP.29), был принят рамочный документ по автоматизированным/автономным транспортным средствам (WP.29/2019/34/Rev. 2) по методам проверки для автоматизированного вождения – Validation Methods for Automated Driving (VMAD). Рамочный документ включал пункт "новый метод оценки/испытания автоматизированного вождения" (NATM) для рассмотрения в ходе 183-й (март 2021 года) сессии WP.29.

Согласно вышеуказанного документа VMAD должна:

- 1) обнаруживать и реагировать на действия объекта (оценивать);
- 2) обеспечить валидацию систем безопасности: изготовители транспортных средств должны продемонстрировать надежный процесс проектирования и валидации, основанный на системно-инженерном подходе, с целью разработки автоматизированных систем вождения ADS (Automatic Drive System);
- 3) принимать во внимание разработки других рабочих групп WP.29 и работать в полном сотрудничестве с ними;

4) учитывать существующие данные, исследования и технические стандарты (например, SAE, ISO), доступные при разработке его элементов действий.

В свою очередь цель NATM состоит в том, чтобы обеспечить основу для оценки ADS и ее способности демонстрировать безопасное поведение при работе в реальном мире.

Проверка этих возможностей является чрезвычайно сложной задачей, которая не может быть выполнена ни комплексно, ни эффективно с помощью одной только методологии проверки. В результате VMAD предложила NATM принять многоступенчатый подход к валидации ADS, состоящий из каталога сценариев и пяти методологий валидации (столпов):

Каталог сценариев, состоящий из описаний реальных дорожных ситуаций, которые возникают во время движения, будут инструментом используемым NATM для проверки безопасности ADS.

Имитационное/виртуальное тестирование, которое использует различные типы цепочек инструментов моделирования для оценки соответствия ADS требованиям безопасности в широком диапазоне виртуальных сценариев, включая некоторые из них, которые было бы чрезвычайно трудно, если не невозможно, протестировать в реальных условиях[1].

Для проверки функционирования и возможностей ADS на испытательном полигоне проводятся тесты с использованием различных сценариев;

Процедуры аудита/оценки, которые устанавливают каким образом производители будут обязаны продемонстрировать органам по сертификации возможности ADS при помощи документации, тест-трека и/или реального тестирования. Аудит проверит наличие надежных процессов/механизмов/стратегий (т. е. систем безопасности движения), обеспечивающих соответствие ADS требованиям безопасности на

протяжении всего срока эксплуатации транспортного средства. Также оценивается взаимодополняемость между различными основными элементами оценки и общим охватом сценариев;

Мониторинг и отчетность направлены на обеспечение безопасности ADS после её выхода на рынок для того, чтобы отслеживать работоспособность и в случае дорожно-транспортных происшествий можно было получить данных для улучшения ADS [2].

1. Создание методики применения программно-аппаратного комплекса разработки и проведения виртуальных испытаний

Программно-аппаратный комплекс (ПАК) представляет собой четырех ступенчатую структуру, включающую в себя: конструктор сценариев; систему моделирования датчиков и объектов (актеров); программу создания алгоритмов управления; комплекс моделирования и анализа результатов выполнения сценариев (рис. 1). Система ПАК должна работать циклично, с последовательным увеличением точности и сходимости результатов моделирования сценариев в сравнении с полигонными испытаниями.

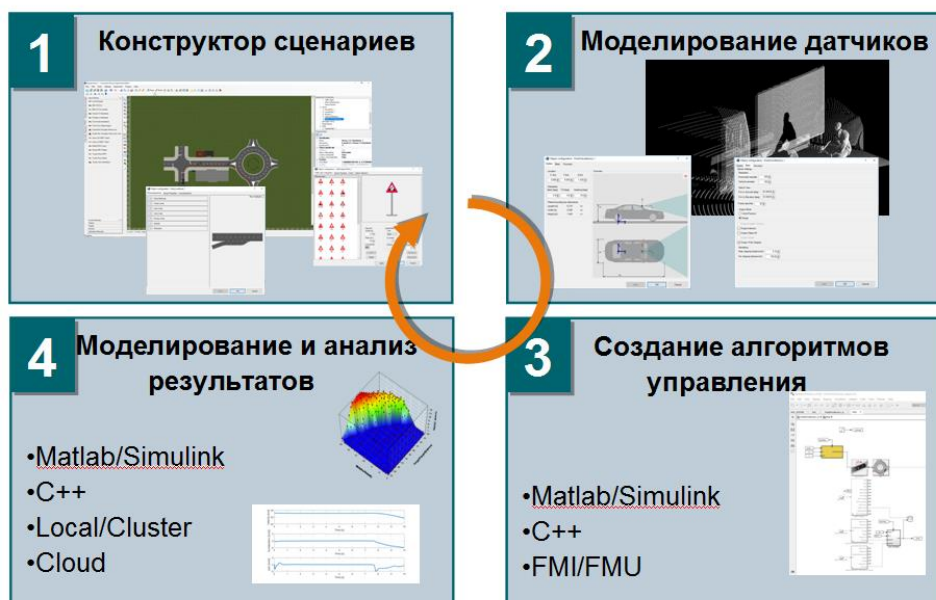


Рис. 1. Программно-аппаратный комплекс (ПАК)

2. Структура методики

Разработанную методику применения ПАК нагляднее всего представить в виде блок-схемы (рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм применения ПАК

Первый этап. Создается база "Библиотека элементов" – основа исходных данных всего ПАК. В данную базу должны входить все типы

объектов, участвующих в разрабатываемых сценариях, включая подвижные и неподвижные объекты, инфраструктуру, мишени, датчики и дополнительное оборудование и т. д. [3].

Основными требованиями к создаваемой библиотеке являются:

- 1) соответствие характеристик объектов к их физическим аналогам, то есть создание максимально реалистичного виртуального двойника реального физического объекта;
- 2) корректировка данных;
- 3) импорт новых объектов;
- 4) разбиение (классификация) объектов в библиотеке по степени достоверности.

Второй этап. Формируется каталог сценариев.

Ключевым моментом в методике применения ПАК является создание и использование сценариев, которые разбиваются на три этапа: функциональные, логические и конкретные сценарии.

Функциональный сценарий. Сценарии с наивысшим уровнем абстракции, описывающие основную концепцию сценария, такую как базовое описание действий исследуемого транспортного средства; взаимодействия исследуемого транспортного средства с другими участниками дорожного движения и объектами; геометрия проезжей части и другие элементы, составляющие сценарий (например, условия окружающей среды и т.д.). Этот подход использует доступный язык для описания ситуации и соответствующих ей элементов.

Логический сценарий. Разработчики, основываясь на элементах, идентифицированных в функциональном сценарии, генерируют логический сценарий, выбирая диапазоны значений или распределения вероятностей для каждого элемента в сценарии (например, возможную ширину полосы движения в метрах). Логическое описание сценария охватывает все элементы

и технические требования, необходимые для реализации системы, решающей эти сценарии.

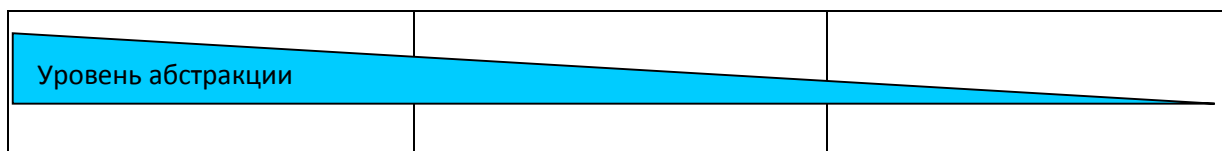
Конкретный сценарий. Конкретные сценарии устанавливаются путем выбора конкретных значений для каждого элемента. Этот шаг гарантирует воспроизводимость конкретного тестового сценария. Кроме того, для каждого логического сценария с непрерывными диапазонами можно разработать любое количество конкретных сценариев, способствующих тому, чтобы транспортное средство подвергалось воздействию самых разнообразных ситуаций.

Примеры функционального, логического и конкретного сценариев приведены в таблице 1.

Таблица 1

Примеры сценария на разных этапах его развития

Функциональный сценарий	Логический сценарий	Конкретный сценарий
Базовые дорожные условия: трехполосная дорога, криволинейная, ограничение скорости 100 км/ч согласно дорожным знакам	Базовые дорожные условия: Ширина полосы 2,5...3,5 м Радиус кривизны 0,6...0,9 км Положение дорожного знака 0...200 м	Базовые дорожные условия: Ширина полосы 3,2 м Радиус кривизны 0,7 км Положение дорожного знака 150 м
Стационарные объекты: -	Стационарные объекты: -	Стационарные объекты: припаркованный автомобиль Reno logan
Подвижные объекты: исследуемый автомобиль; пробка; взаимодействие: исследуемый автомобиль приближается к разделительной линии, пробка движется медленно	Подвижные объекты: Окончание пробки 10...200 м; Скорость пробки 0...30 км/ч Дистанция до пробки 50...300 м Скорость Эго 80...130 км/ч	Подвижные объекты: Окончание пробки 40 м; Скорость пробки 30 км/ч Дистанция Эго до пробки 200 м Скорость 100 км/ч
Окружающая среда: Лето, дождь	Окружающая среда: Температура 10...40 °C Размер капли 0,03...0,05 мл	Окружающая среда: Температура 20 °C Размер капли 0,035 мл



Каталог сценариев, кроме четырёх этапов содержит три группы испытаний:

- 1) испытания в реальном мире – любая реальная дорожная ситуация может быть занесена в каталог;
- 2) полигонные испытания – набор тестов согласно жестким требованиям проведения дорожных испытаний по Правилам ООН для advanced driver-assistance systems (ADAS). Количество тестов ограничено [4, 5];
- 3) виртуальные испытания – набор тестов для проверки работы систем ADAS в наиболее вероятностных дорожных условиях согласно статистическим данным [6]. Количество тестов может увеличиваться в зависимости от сбора статистических данных.

Виртуальные испытания расширяет сферу применения физического тестирования. Преимущество виртуальных испытаний заключается в их способности экономически эффективно оценивать производительность по диапазонам переменных и массивам сценариев, позволяет дополнять результаты ограниченных физических тестов поддающимися проверке данными, охватывающими вариации сценариев физических испытаний.

Виртуальные испытания позволяют охватить критические для безопасности сценарии на их логических уровнях абстракции, подтверждая, что ADS будет работать так, как задумано, во всех диапазонах параметров, эти преимущества снижают нагрузку на физические испытания. Для повышения эффективности общей оценки по всем основным направлениям виртуальных испытаний могут быть использованы для выявления и покрытия крайних случаев и других маловероятных сценариев для повышения уверенности в их эффективности.

Полигонные испытания нужны для проверки адекватности работы конкретной системы ADAS в заданных условиях проведения испытаний. Так как в этом случае виртуальные испытания должны полностью воспроизводить полигонные дорожные испытания, то и результаты проведения таких виртуальных экспериментов должны иметь высокую степень сходимости.

Для этого у исследователя должны быть на руках результаты дорожных полигонных испытаний конкретного автомобиля с конкретной системой ADAS и известными моделями датчиков (радара, лидара, видеокамеры и т.д.). Все эти объекты уже должны быть в библиотеке элементов и проверены на адекватность данных.

Третий этап. Проводится проверка на адекватность полученных результатов и при необходимости корректировка ранее загруженных исходных данных.

Для этого выбирается конкретный сценарий одного из полигонных испытаний, по которому уже имеются результаты дорожных испытаний для конкретного исследуемого автомобиля и конструкции ADAS установленной на этом автомобиле, включая точные данные по её компонентам: радара, лидара, камеры, датчиков и т.д.

После выбора сценария осуществляется процесс виртуальных испытаний выбранных исходных данных для конкретного автомобиля и системы ADAS [6].

На стадии получения результатов виртуального эксперимента происходит процесс их сравнения с данными от дорожных испытаний того же автомобиля по такому же сценарию на полигоне.

Если достигнута заданная точность сходимости результатов полигонного и виртуального испытания, принимается решение о предварительном соответствии математической модели выбранного автомобиля с конкретной системой ADAS реальному прототипу.

Учитывая большое количество сценариев, которые виртуальное тестирование может выполнять по сравнению с полигонным тестом, валидация, должна быть выполнена на меньшем, но все же достаточно репрезентативном подразделе соответствующих сценариев, чтобы обосновать любую экстраполяцию за пределы сценариев, используемых для валидации. Для более точного подтверждения необходимо провести несколько виртуальных испытаний по различным полигонным тестам с заданными исходными данными выбранного автомобиля и системы ADAS.

Если во всех проведенных виртуальных испытаний по полигонным тестам степень сходимости результатов с реальными полигонными тестами равна или более заданной, то принимается решение о полном соответствии цифрового двойника реальному прототипу.

Надо учитывать, что для точной оценки адекватности каждого элемента исследуемого объекта полигонные тесты должны быть сформированы от простого к сложному, позволяющие оценивать параметры как самого автомобиля, так и системы ADAS, установленной на нем. Например: экстренное торможение, перестроение, вход в поворот - оценка тормозных свойств и управляемости самого автомобиля; торможение перед внезапно возникшим препятствием, удержание полосы движения и т.д. - оценка работы системы ADAS [4].

Если в результате виртуальных испытаний степень сходимости оказывается ниже заданной, то производится поиск несоответствий и корректирование исходных данных. После этого процесс повторяется, циклически до достижения заданного уровня степени сходимости результатов.

На этом же этапе проверяется адекватность заложенных в ПАК дорожных, климатических и других параметров окружения исследуемого объекта, отличных от идеальных, например: дождь, снег, туман, колея, стертая разметка и т. д. [6, 9]. Для этого выбираются реальные полигонные

испытания в сложных дорожных условиях (например зимой, ночью, в дождь) и проводятся аналогичные виртуальные испытания по данным сценариям. Затем результаты сравниваются, и при необходимости, исходные данные корректируются в каталоге сценариев.

Четвертый этап. После того как убедились в адекватности цифрового двойника конкретного автомобиля с системой ADAS можно приступить к выполнению дорожных сценариев и дополнительных виртуальных сценариев с высокой степенью вероятности в том, что результаты этих виртуальных испытаний будут аналогичны таким же проведенным в реальных условиях [6].

При этом должно выполняться одно из условий: используемые в сценарии дополнительные объекты (мишени, другие автомобили, дорожная инфраструктура и т.д.) должны быть проверены на адекватность и соответствие физическим аналогам [5].

3. Практическое применение методики

На сегодняшний день уже имеется несколько ПАК, позволяющих проводить виртуальные испытания с высокой степенью адекватности. Наиболее подходящей и максимально отработанной системой является связка программ: Prescan GUI - Matlab/Simulink [7].

В данном ПАК присутствует большая база исходных данных (библиотеки элементов), которая проверена на адекватность и поэтому пользоваться элементами из библиотеки можно с уверенностью в валидации результатов виртуальных испытаний реальным.

Наравне с библиотекой элементов в ПАК присутствует стандартный набор сценариев проверки систем ADAS, также проверенный на адекватность результатов виртуальных испытаний - реальным.

Используя имеющиеся сценарии и корректируя их в ПАК на стадии конструктора, удалось получить информацию об ограничениях возможностей системы автоматического экстренного торможения (САЭТ), установленной на автомобиле Toyota RAV4.

При стандартных испытаниях системы САЭТ анализировалась её способность распознавать пешехода и велосипедиста и вовремя останавливаться перед ними. И дорожные испытания и виртуальные показали хорошие результаты распознавания как пешехода, так и велосипедиста [8]. Перед поперечно движущимся пешеходом система позволяет останавливаться: днем до скорости 80 км/ч, ночью – 30...40 км/ч [6].

Однако на сегодняшний день появилось много новых типов незащищенных участников движения, на распознавание которых система САЭТ не была проверена [7, 8, 9].

Для проверки работоспособности методики применения ПАК мы решили создать виртуальные сценарии распознавания новых незащищенных участников движения и параллельно провести полигонные испытания на аналогичном автомобиле с тестируемой системой САЭТ [1, 2, 9].

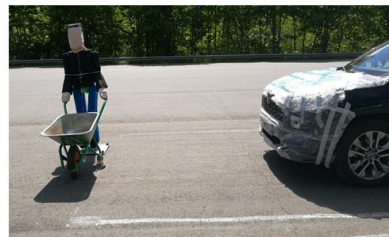
В качестве незащищенных участников движения выбрали (рис. 3): пешеход взрослый - как эталонный участник; пешеход взрослый с детской коляской; пешеход взрослый с тележкой из супермаркета; пешеход взрослый в инвалидном кресле; пешеход взрослый с тачкой [7, 8].

Из выбранных участников движения в библиотеке элементов не оказалось тачки. Поэтому было принято решение создать 3D модель тачки и импортировать её в библиотеку элементов Prescan. Для реальных испытаний взяли макет пешехода и реальную тачку (рис. 4).

Пешеход взрослый с детской коляской



Пешеход взрослый с тачкой



Пешеход взрослый с тележкой из супермаркета

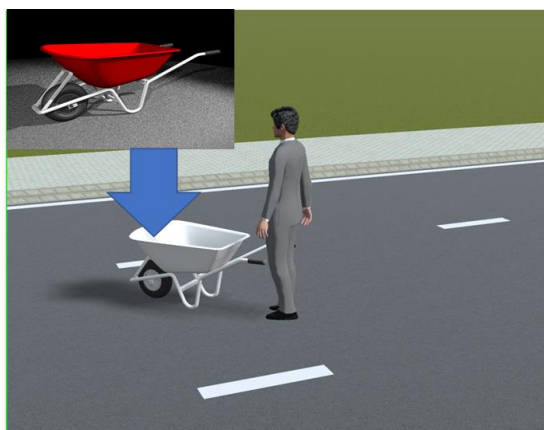


Пешеход взрослый в инвалидном кресле



Рис. 3. Новые незащищенные участники движения

3D модель тачки



Макет пешехода с тачкой



Рис. 4. 3D модель пешехода с ручной тележкой в системе ПАК и реальная тачка с макетом пешехода при полигонных испытаниях

На Дмитровском полигоне были проведены стандартные испытания САЭТ по распознаванию внезапно возникающего препятствия и остановки перед ним. Испытания проводились на автомобиле Toyota RAV4, днем на сухом асфальтобетоне. Автомобиль оборудован радаром и камерой “Mobileye”.

Результаты полигонных испытаний показали, что система САЭТ, установленная на Toyota RAV4, распознаёт и останавливается перед

стандартным препятствием (пешеход взрослый) и перед новыми участниками дорожного движения, кроме пешехода взрослого с тачкой (рис. 5).



Рис. 5. График результатов заезда автомобиля Toyota RAV4 с сообщением о виртуальном наезде на пешехода с тачкой

Анализ графика на рисунке 5 показывает, что САЭТ не реагирует на препятствие «пешеход с тачкой», из-за чего водителем–испытателем был произведён манёвр уклонения.

Заключение

Система САЭТ не смогла распознать пешехода с тачкой, во всех заездах приходилось применять маневр уклонения.

При проведении виртуальных испытаний с теми же исходными данными как при полигонных испытаниях результаты оказались идентичными. Виртуальная система САЭТ распознавала и заблаговременно останавливалась перед всеми препятствиями, кроме пешехода с тачкой. Его виртуальная система САЭТ не распознала и не среагировала.

Исследования показали, что методика применения ПАК позволяет прогнозировать опасности и нестандартные ситуации, которые могут встретиться в жизни и не были протестированы в реальных условиях. При этом валидация виртуальных испытаний имеет достаточно высокий уровень.

Список источников

1. Развитие интеллектуальных систем помощи водителю (ADAS) в Российской Федерации / С.В. Гайсин, С.В. Бахмутов, Д.В. Ендачев, Н.П. Мезенцев // Труды НАМИ. – 2016. – № 265. – С. 6-12.
2. Интеллектуальные автомобили: опыт Европейского союза и перспективы в России / С.В. Гайсин, Б.В. Кисуленко, А.В. Бочаров, В.В. Пугачев // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 2(103). – С. 6-10.
3. Локализация значимых интерфейсов "Человек - искусственный интеллект" применительно к безопасности человека / В.В. Гаевский, Н.В. Попов, А.М. Иванов, С.С. Шадрин // Интеллектуальные технологии и электронные устройства 2021 года в транспортных средствах и дорожно-транспортном комплексе TIRVED 2021: Материалы конференции, Москва, 2021. – 11. Код 175572.
4. Методики тестирования автоматизированных систем управления автомобилем / В.М. Приходько, А.М. Иванов, В.Б. Борисевич, С.С. Шадрин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 4(51). – С. 10-15.
5. Виртуальное и физическое тестирование современных систем помощи водителю с мягкими целями / А.М. Иванов, С.С. Шадрин, Н.В. Попов, В.В. Гаевский В., С.Р. Кристальный // Международная конференция по инженерии и телекоммуникациям: материалы конференции, 2019 – 2019. – 9030527.
6. Сидорова, П.А. Анализ новых типов испытаний САЭТ в рамках рейтинга Euro NCAP (2020 г.) / П.А. Сидорова, Н.В. Попов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2020. – № 2(24). – С. 1.
7. Опыт использования модели движущегося пешехода при испытаниях системы автоматического экстренного торможения / С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, В.В. Гаевский, А.Н. Андреев, М.А. Топорков. // Системы формирования и обработки сигналов 2021 в области бортового Коммуникации: материалы конференции, Москва, Россия, 16-18 марта 2021. – 2021, 9416109 (Дата добавления в IEEE Xplore: 07 мая 2021, DOI: 10.1109/IEEECONF51389.
8. Андреев, А.Н. Оценка распознаваемости перспективной модели «пешеход» современным автомобильным радаром / А.Н. Андреев, М.А. Топорков // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 4-9.
9. Кристальный, С.Р. Выбор параметров испытаний и методов оценки эффективности действия САЭТ в соответствии с RUNCAP / С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, А.К. Багров // Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации: материалы 106-й Международной научно-технической конференции, Иркутск, 23–26 апреля 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 12-19.

References

1. Gajsin S.V., Bahmutov S.V., Endachev D.V., Mezencev N.P. *Trudy NAMI*, 2016, no. 265, pp. 6-12.
2. Gajsin S.V., Kisulenko B.V., Bocharov A.V., Pugachev V.V. *ZHurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2017, no. 2(103), pp. 6-10.
3. Gaevskiy V.V., Popov N.V., Ivanov A.M., Shadrin S.S. *Intellectual'nyye tekhnologii i elektronnyye ustroystva 2021 goda v transportnykh sredstvakh i dorozhno-transportnom komplekse TIRVED 2021*, Moscow, 2021, 11, 175572.
4. Prihod'ko V.M., Ivanov A.M., Borisevich V.B., SHadrin S.S. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2017, no. 4(51). pp. 10-15.
5. Ivanov A.M., Shadrin S.S., Popov N.V., Gaevskiy V.V., Kristal'niy S.R. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po inzhenerii i telekommunikatsiyam*, 2019, 9030527.
6. Sidorova P.A., Popov N.V. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2020, no. 2(24), pp. 1.
7. Kristal'niy S.R., Popov N.V., Gaevskiy V.V., Andreev A.N., Toporkov M.A. *Sistemy formirovaniya i obrabotki signalov 2021 v oblasti bortovogo Kommunikatsii*, 2021, Moscow, 16-18 March, DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.
8. Andreev A.N., Toporkov M.A. *DSPA: Voprosy primeneniya cifrovoj obrabotki signalov*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 4-9.
9. Kristal'niy S.R., Popov N.V., Bagrov A.K. *Bezopasnost' kolosnykh transportnykh sredstv v usloviyakh ekspluatatsii: materialy 106-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Irkutsk, 2019, April 23-26, Irkutsk, Irkutskiy natsional'nyy issledovatel'skiy tekhnicheskii universitet, 2019, pp. 12-19.

Рецензент: Г.М. Розенблат, д-р физ.-мат. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Гаевский Виталий Валентинович, д-р техн. наук, проф., МАДИ.
Алексеев Максим Иванович, инженер, МАДИ.

Information about the authors

Gaevskij Vitalij V., Dr. Sc., professor, MADI.
Alexeenkov Maksim I., engineer, MADI.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023; одобрена после рецензирования 05.05.2023; принята к публикации 15.05.2023.

The article was submitted 11.04.2023; approved after reviewing 05.05.2023; accepted for publication 15.05.2023.