

Научная статья
УДК 629.3.018.7

Подход к обеспечению и комплексной оценке уровня безопасности автоматизированных транспортных средств в процессе эксплуатации на дорогах общего пользования

Дарья Алексеевна Макарова¹, Андрей Михайлович Иванов²,
Сергей Сергеевич Шадрин³ Юрий Михайлович Фурлетов⁴

^{1,2,3,4} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹makarovadaria.madi@gmail.com

²ivanov-am@madi.ru

³shadrin@madi.ru

⁴furletov93@gmail.com

Аннотация. Ключевым фактором, определяющим дальнейшее развитие и сроки полноценного внедрения автономных транспортных средств, является уверенность в том, что такие транспортные средства будут в полной мере обеспечивать безопасность дорожного движения. Проблема безопасности для автоматизированных систем вождения является довольно сложной и на сегодняшний день нерешенной. В статье описаны аспекты безопасности и разобрана классификация ошибок автоматизированных транспортных средств, вызывающих угрозу безопасности. Приведен выявленный на основании анализа применяемых ведущими разработчиками методов перечень основных механизмов обеспечения безопасности автоматизированных транспортных средств, необходимых для обеспечения максимально возможного на текущем уровне развития технологий автоматизированного вождения уровня безопасности. Приведена составленная авторами концепция оценки, обеспечения и эффективного повышения уровня безопасности автоматизированных транспортных средств на этапах жизненного цикла. Приведен предлагаемый авторами метод результирующей оценки показателей безопасности автоматизированных транспортных средств в процессе эксплуатации на дорогах общего пользования.

Ключевые слова: высокоавтоматизированные транспортные средства, автономные транспортные средства, автоматизированная система вождения, оценка безопасности, эксплуатация на дорогах общего пользования.

Для цитирования: Макарова Д.А., Иванов А.М., Шадрин С.С., Фурлетов Ю.М. Подход к обеспечению и комплексной оценке уровня безопасности автоматизированных транспортных средств в процессе эксплуатации на дорогах общего пользования // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

An approach to ensuring and comprehensive assessment of the safety level of automated vehicles during operation on public roads

Daria A. Makarova¹, Andrey M. Ivanov², Sergey S. Shadrin³, Yury M. Furletov⁴

^{1,2,3,4} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹makarovadaria.madi@gmail.com

²ivanov-am@madi.ru

³shadrin@madi.ru

⁴furletov93@gmail.com

Abstract. The key factor determining the further development and timing of the full implementation of autonomous vehicles is the confidence that such vehicles will fully ensure road safety. The problem of safety for automated driving systems is quite complex and unsolved today. The article describes the safety aspects and analyzes the classification of errors of automated vehicles that cause a security threat. The list of the main mechanisms for ensuring the safety of automated vehicles necessary to ensure the maximum possible level of safety at the current level of development of automated driving technologies, identified on the basis of the analysis of methods used by leading developers, is given. The authors' concept of assessing, ensuring and effectively improving the safety level of automated vehicles at the stages of the life cycle is presented. The method proposed by the authors for the resulting assessment of safety indicators of automated vehicles during operation on public roads is given.

Keywords: highly automated vehicles, autonomous vehicles, automated driving system, safety assessment, operation on public roads.

For citation: Makarova D.A., Ivanov A.M., Shadrin S.S., Furletov Yu.M. An approach to ensuring and comprehensive assessment of the safety level of automated vehicles during operation on public roads. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Введение. Внедрение автономных транспортных средств (далее – ТС) в транспортную и промышленную инфраструктуру является неизбежным этапом развития интеллектуальных транспортных систем. К преимуществам внедрения беспилотных ТС относятся: снижение дорожно-транспортных происшествий со смертельным исходом; эффективная эксплуатация дорог, благодаря централизованному управлению потоком транспорта; расширение возможностей передвижения для людей, не имеющих водительских прав,

инвалидов, несовершеннолетних; экономия личного времени за счет возможности заниматься делами во время поездки; исключение человеческого фактора при перевозке особо опасных грузов, выполнении заданий в местах боевых действий и катастроф. Сегодня крупнейшие производители в сфере автомобильной промышленности совместно с ИТ разработчиками, а также ряд иных заинтересованных организаций по всему миру, активно разрабатывают ТС с автоматизированным управлением [1, 2].

Стоит отметить, что на сегодняшний день в мире нет автомобилей пятого уровня автоматизации по шкале SAE J3016, то есть полностью автономных (беспилотных) ТС, которые могут эксплуатироваться в любых условиях и не требуют вмешательства водителя или оператора. В настоящее время во многих странах мира проводятся испытания высокоавтоматизированных ТС (далее – ВАТС) третьего и четвертого уровней автоматизации на дорогах общего пользования. Эксплуатация ВАТС при этом осуществляется в ограниченных условиях, называемых *operational design domains (ODD)* или среда штатной эксплуатации, и требует присутствия водителя с возможностью переключения управления в ручной режим или, как это единично практикуется с недавнего времени, колонны сопровождающих автомобилей с возможностью передачи управления в дистанционный режим.

Однако, несмотря на очевидные преимущества внедрения автоматизированных ТС (термин «автоматизированные ТС» используется для обобщенного обозначения ТС с 3, 4, и 5 уровнем автоматизации по SAE) оно сопряжено с рядом сложных проблем, главной из которых является обеспечение безопасности дорожного движения, что свою очередь является ключевым фактором, определяющим дальнейшее развитие и сроки полноценного внедрения [3].

Безопасность автоматизированных ТС определяется поведенческими параметрами управления и связанной с ними надежностью аппаратного и

программного обеспечения. Таким образом, чтобы была обеспечена безопасность, необходимо своевременно выявлять и устранять все возможные риски безопасности на этапе разработки и в процессе эксплуатации.

Целью данной статьи является разработка концепции обеспечения и оценки безопасности автоматизированных ТС на основании анализа типов ошибок и методов обеспечения безопасности, применяемых ведущими разработчиками.

Типы ошибок автоматизированных транспортных средств

1. Ошибки на уровне восприятия и обработки данных. Система технического зрения осуществляет мониторинг окружающей дорожно-транспортной обстановки для принятия решений в режиме реального времени. Разработка автоматизированных ТС в первую очередь определяется сложностью, надежностью, исправностью и степенью развития технологий систем технического зрения. В состав системы технического зрения могут входить следующие датчики и сенсоры: радары, лидары, моно и стереокамеры, ультразвуковые датчики, датчики одометрии, датчики ускорения и угловых скоростей, гиростабилизатор, система геолокации и навигации, датчики взаимодействия с интеллектуальной инфраструктурой и другими ТС. Очевидно, что любые ошибки мониторинга состояния, местоположения, движение других участников дорожного движения, сигналов светофора или других опасностей, возникающих на дороге, могут привести к фатальным последствиям [4,5].

Возникновение ошибок восприятия дорожно-транспортной обстановки может быть обусловлено функциональностью сенсоров, проблемами в программной части или проблемами в коммуникации данных.

Снижение работоспособности или отказ сенсоров, вызванные внешними факторами или недостаточной заданной функциональностью

сенсоров, могут привести к ошибкам в процессах вычислений, сбить с толку систему принятия решений и привести к опасному управлению.

Например, в условиях недостаточной видимости ввиду дождя, снега или тумана, камера может не распознать и не классифицировать объект должным образом, не распознать дорожный знак, сигнал светофора или разметку, аналогично лидару, который может классифицировать снегопад или выхлопные газы как опасный динамический объект. Проблема радаров заключается в регистрации множества помех ввиду наложения сигналов от других источников радиоизлучения.

Для решения данных проблем разработчики осуществляют слияние данных сенсоров, что позволяет компенсировать недостаточную функциональность каждого отдельного датчика. Поэтому на текущем этапе развития систем технического зрения основной задачей разработчиков автоматизированных систем управления является установка приоритетности получаемых данных в различных условиях и калибровка сенсоров таким образом, чтобы идентифицировать все потенциально опасные объекты и, при этом, максимально исключить возможные помехи.

2. Ошибки на уровне принятия решений. Ошибки в части принятия решения могут быть обусловлены неправильным прогнозированием поведения других участников движения ввиду возникших проблем на уровне получения и обработки данных системы технического зрения.

Прогнозирование действий других участников дорожного движения при этом, вероятно, для сегодняшних систем автоматизированного вождения является наиболее сложной задачей, так как действия живых людей далеко не всегда поддается логике, которой можно обучить систему.

Система принятия решений интерпретирует все обработанные данные, полученные от системы технического зрения, принимает решения о дальнейших действиях автоматизированного ТС и генерирует данные для исполнительных систем. Ситуационная осведомленность служит входным

сигналом системы принятия решений для краткосрочного и долгосрочного планирования. Краткосрочное планирование включает в себя формирование траектории, предотвращение наезда на препятствия и управление событиями и маневрами, в то время как долгосрочное планирование включает в себя планирование достижения динамической транспортной задачи и планирование маршрута.

Ошибки системы принятия решений также могут быть обусловлены системными сбоями вычислителей или коммутационного оборудования, или несовершенством алгоритмов управления.

Для совершенствования алгоритмов принятия решения в ПО автоматизированной системы должны быть заложены алгоритмы реагирования на множество различных дорожных ситуаций, что достигается путем обучения системы посредством проведения виртуальных испытаний, с генерацией множества сценариев и валидацией параметров.

3. Ошибки исполнительных систем. После получения команды от системы принятия решения, блок управления исполнительными системами (плата нижнего уровня) направляет управляющие команды на осуществление поворота колес, ускорение или торможение. Исполнительными механизмами служат: электромотор электроусилителя рулевого управления, насос обратной подачи и клапаны тормозных механизмов, электродвигатель дроссельной заслонки, электромагнитные клапаны АКПП и т.п.

Для формирования новых решений отслеживается реакция и параметры исполнительных систем. Подобно традиционным системам вождения, ошибки исполнительных систем из-за сбоев исполнительных механизмов или неисправности трансмиссии, системы управления, системы охлаждения или выхлопной системы могут привести к проблемам с безопасностью. Поэтому такие сбои необходимо своевременно идентифицировать и внедрять алгоритмы реагирования.

Методы обеспечения безопасности автоматизированных ТС.

Процесс разработки автоматизированного ТС включает в себя проведение оценки рисков безопасности и разработку методов борьбы с ними, полигонные и виртуальные тестирования конструктивных и программных решений. В процессе эксплуатации отказоустойчивость достигается путем внедрения системы безопасности, способной выявлять сбои и отказы ключевых систем и внедрением резервных систем для критически важных функций [6,7].

На основании анализа методов обеспечения безопасности ведущих разработчиков автоматизированных систем управления выявлено, что для достижения высокого уровня безопасности автоматизированных ТС на текущем уровне развития систем технического зрения и искусственного интеллекта необходимо применение следующих конструктивных решений:

- на этапе разработки должно быть проведена оценка всех рисков функциональной и эксплуатационной безопасности, проработаны методы борьбы с рисками, внедрены алгоритмы реагирования на все возможное системные и функциональные сбои;
- в автоматизированное ТС должна быть интегрирована система безопасности, выявляющая все возможные сбои и отказы ключевых агрегатов и узлов как автоматизированной системы вождения, так и штатных систем;
- для обеспечения безопасности в процессе безопасности должен быть реализован функционал перехода в режим минимального риска и отправки запроса водителю на перевод управления в ручной режим (для ВАТС);
- должна быть внедрена понятная индикация состояний автоматизированной системы вождения для водителя (для ВАТС);

- должно быть интегрировано резервирование всех ключевых функций (вычислители, сенсоры, коммутация, питание, сетевое оборудование).

Концепция оценки и эффективного повышения уровня безопасности автоматизированных ТС на этапах жизненного цикла. На основании анализа возможных ошибок автоматизированных систем управления и методов выявления и реагирования на угрозы безопасности, применяемых ведущими разработчиками автоматизированных ТС, составлена схема мероприятий, которые целесообразно проводить в процессе разработки и тестирования с целью обеспечения безопасности автоматизированных ТС (рис. 1).

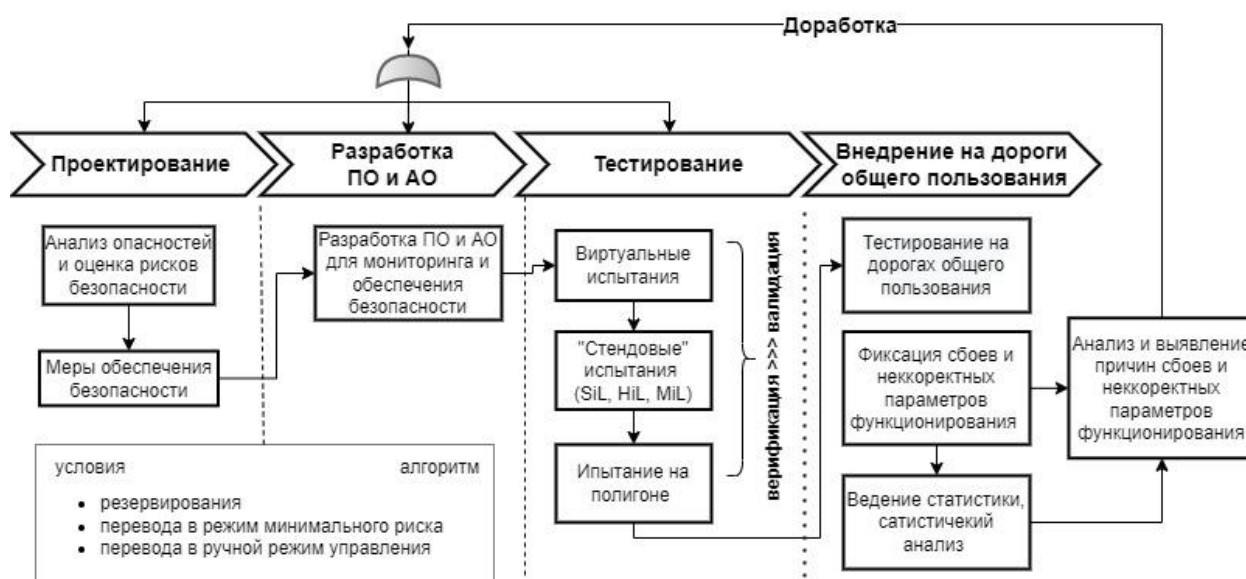


Рис. 1. Цикл мероприятий, необходимых для оценки обеспечения и повышения уровня безопасности автоматизированного ТС на этапах жизненного цикла

Таким образом, процесс повышения безопасности автоматизированных ТС представляет собой замкнутый цикл мероприятий, проводимых на этапах жизненного цикла.

В процессе эксплуатации на дорогах общего пользования необходимо собирать и структурировать данные о столкновениях, случаях нарушения ДТП, случаях вмешательства водителя в управление, вести статистику и

структурировать данные о сбоях, проводить анализ причин их возникновения.

Для лучшей структуризации данных процесс тестирования на дорогах общего пользования целесообразно разделять на этапы (для упрощения сравнения результатов по этапам целесообразно будет разделение по заданному пробегу или прохождению идентичных расстояний на каждом заданном временном этапе). По завершении каждого этапа для оценки текущего уровня безопасности автоматизированных ТС необходимо проводить комплексный анализ полученных в процессе эксплуатации данных о сбоях и некорректных параметров функционирования, выявлять причины столкновений и случаев вмешательства водителя в управление.

Результирующая оценка безопасности в процессе эксплуатации. В качестве основного показателя надежности функционирования автоматизированных ТС предлагается ввести параметр, отражающий отношение «чистого пробега» (расстояния, пройденные в автоматизированном режиме управления без вмешательства водителя в управления по причине сбоя или некорректного поведения ТС на дороге) к «плановому пробегу» (расстояние соответствующие длине заданного перед испытаниями маршрута). Данный показатель также будет являться количественной характеристикой эффективности работы автоматизированной системы вождения:

$$\sigma_{\text{надежности ВАТС}} = \frac{S_{\text{АРУ}}}{S_{\text{плановый}}} \cdot 100 \%$$

Для оценки текущего уровня разработанной системы безопасности предлагается ввести показатель, отражающий отношение количества выявленных системой безопасности неисправностей к количеству всех зафиксированных неисправностей:

$$\sigma_{\text{конт.события}} = \frac{N_{\text{перевод в РРУ}}}{N_{\text{всего}}} \cdot 100 \%$$

Также уровень надежности и безопасности автоматизированных ТС можно определить по показателю, отображающему отношение некорректной реакции на контактные события, когда водителю приходилось взять управление на себя чтобы избежать аварийную ситуацию, к общему количеству контактных событий (случаи, требующие изменения направления и/или скорости движения автоматизированного ТС из-за действий других участников дорожного движения):

$$\sigma_{\text{конт.события}} = \frac{N_{\text{перевод в РРУ}}}{N_{\text{всего}}} \cdot 100 \%$$

Данный показатель, в частности, будет отображать надежность системы технического зрения и алгоритмов принятия решения на основании данных сенсоров.

Заключение. Составленная авторами концепция оценки обеспечения и повышения безопасности автоматизированных ТС дает возможность своевременно выявлять и оперативно устранять проблемы применяемых методов и конструктивных программных решений, способствуя развитию автоматизированных систем вождения.

На основании анализа данных, полученных в процессе каждого этапа эксплуатации, и в зависимости от его результатов, разработчиками могут быть сформированы запросы на доработку имеющихся или выработку новых конструктивных и/или программных решений для повышения надежности функционирования и безопасности автоматизированных ТС.

Кроме того, применение разработанного подхода к результирующей оценке безопасности для всех эксплуатируемых автоматизированных транспортных средств позволит лучше понимать уровень их готовности к развертыванию на частном и национальном уровне.

Список источников

1. Тарасов, А.Ю. Перспективы и преимущества использования автономных транспортных средств / А.Ю. Тарасов, И.А. Тарасова // Пробелы в российском законодательстве. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 16-19.
2. Шадрин, С.С. Радикальное повышение безопасности дорожного движения интегрированием автономных колесных транспортных средств в интеллектуальную транспортную среду / С.С. Шадрин, А.М. Иванов, К.Е. Карпухин // Вестник машиностроения. – 2018. – № 1. – С. 85-88.
3. Фомин, П.С. Беспилотные грузоперевозки на территории России в условиях цифровизации / П.С. Фомин // Синергия Наук. – 2021. – № 59. – С. 519-534.
4. Развитие интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации: определение требований и организация создания полигонов тестирования информационной безопасности / О.М. Писарева, В.А. Алексеев, Д.Н. Медников, А.В. Стариковский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2020. – Т. 13. – № 5. – С. 7-23. – DOI 10.18721/JE.13501.
5. Dygalo V., Keller A., Evtiukov S., «Monitoring of vehicles' active safety systems in operation», Transportation Research Procedia : 14, Saint Petersburg, 2020, pp. 113-120, DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.014
6. Repin, S.A method for quantitative assessment of vehicle reliability impact on road safety / S. Repin, S. Evtiukov, S. Maksimov // Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, 27–29 сентября 2018 года. Vol. 36. – Saint Petersburg: Elsevier B.V., 2018. – P. 661-668. – DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.128. – EDN WUSWRS.
7. Меренков, А.О. Беспилотный автотранспорт: разработки, практический опыт и перспективы / А.О. Меренков, М.С. Тимашева, А.В. Зорова // Вестник транспорта. – 2020. – № 4. – С. 41-44.

References

1. Tarasov A.Y., Tarasova I.A. *Probely v rossijskom zakonodatel'stve*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 16-19.
2. Shadrin S.S., Ivanov A.M., Karpuhin K.E. *Vestnik mashinostroeniya*, 2018, no. 1, pp. 85-88.
3. Fomin P.S. *Sinergiya Nauk*, 2021, no. 59, pp. 519-534.
4. Pisareva O.M., Alekseev V.A., Mednikov D.N., Starikovskij A.V. *Nauchno-tekhicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki*, 2020, no. 5, pp. 7-23.

5. Dygalo V., Keller A., Evtiukov S., *Monitoring of vehicles' active safety systems in operation*, Transportation Research Procedia: 14, Saint Petersburg, 2020, pp. 113-120, DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.014
6. Repin S., Evtiukov S., Maksimov S., *A method for quantitative assessment of vehicle reliability impact on road safety*, Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, Saint Petersburg: Elsevier B.V., 2018, vol. 36, pp. 661-668.
7. Merenkov A.O., Timasheva M.S., Zorova A.V. *Vestnik transporta*, 2020, no. 4, pp. 41-44.

Рецензент: В.В. Гаевский, д-р техн. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Макарова Дарья Алексеевна, соискатель ученой степени канд. техн. наук, МАДИ.

Иванов Андрей Михайлович, д-р техн. наук, проф., МАДИ.

Шадрин Сергей Сергеевич, д-р техн. наук, проф., МАДИ.

Фурлетов Юрий Михайлович, канд. наук, ст. преподаватель, МАДИ.

Information about the authors

Makarova Daria A., candidate of scientific degree Ph. D., MADI.

Ivanov Andrey M., Dr. Sc., professor, MADI.

Shadrin Sergey S., Dr. Sc., professor, MADI.

Furletov Yury M., Ph. D, senior lecturer, MADI.

Статья поступила в редакцию 20.04.2023; одобрена после рецензирования 10.05.2023; принята к публикации 18.05.2023.

The article was submitted 20.04.2023; approved after reviewing 10.05.2023; accepted for publication 18.05.2023.