

УДК 629.067 + 004.89

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

**Бушуев Сергей Валентинович**, д.т.н., доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия, E-mail: SBushuev@usurt.ru

**Попов Антон Николаевич**, к.т.н., доцент, доцент кафедры Автоматики, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия, E-mail: ANPopov@usurt.ru

### АННОТАЦИЯ

Статья рассматривает перспективы внедрения беспилотного движения грузовых поездов, выделяя главные трудности и достижения в данной сфере. Отмечено, что несмотря на отдельные успешные проекты, массовые испытания пока невозможны из-за отсутствия единых стандартов оценки качества функционирования систем и процедур сертификации безопасности. Важнейшими проблемами являются обеспечение эффективной коммуникации между автоматизированными и традиционными элементами инфраструктуры, разработка унифицированных протоколов взаимодействия и совершенствование математических моделей движения поездов. Анализируются практические примеры реализации беспилотных систем, такие как параллельное перемещение контейнеров, применение беспилотных маневровых устройств и автоматизация грузовых перевозок. Статья подчеркивает необходимость дальнейшего изучения и разрешения ключевых аспектов безопасности и функциональности беспилотных технологий, которые позволят расширить масштабы их использования на транспорте.

**Ключевые слова:** беспилотное движение, грузовые поезда, техническое зрение, определение препятствий, железнодорожный транспорт.

## PROSPECTS FOR AUTONOMOUS OPERATION OF FREIGHT TRAINS

**Sergei V. Bushuev**, Dr.Sc. Eng., Assoc. Prof., Vice-Rector for Research, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia, E-mail: SBushuev@usurt.ru

**Anton N. Popov**, Ph.D., Assoc. Prof., Dept. of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia, E-mail: ANPopov@usurt.ru

### ABSTRACT

This paper explores the prospects for adopting autonomous operation of freight trains, focusing on key challenges and advancements in this area. Although particular success stories exist, widespread testing is currently hindered by the lack of unified standards for evaluating system performance quality and safety certification processes. Major issues involve ensuring reliable communication between automated and conventional infrastructure components, establishing standardized interaction protocols, and refining mathematical models of train dynamics. Illustrative case studies cover innovations like parallel container handling, unmanned yard equipment, and freight transport automation. Efforts emphasize resolving critical safety and functional aspects of autonomous technologies to extend their applicability in transportation.

**Keywords:** autonomous operation, freight trains, machine vision, obstacle detection, rail transport.

## Введение

Развитие технологий искусственного интеллекта, в том числе технического зрения, достигло уровня, достаточного для практического применения. Наиболее перспективным видится внедрение технического зрения в транспортной отрасли, особенно для организации беспилотного движения. Однако, уже сегодня очевидно, что широкое использование беспилотных транспортных средств требует решения ряда проблем, в том числе и научных, формулировка и уточнение которых является актуальной задачей, решению которой посвящена данная работа.

В мировой практике железнодорожные системы делятся на открытые и закрытые, а также по уровням автоматизации *GoA* [1]. В РФ ГОСТ Р 70059-2022 «Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении» разделяет системы управления и контроля, применяемых для организации безопасных железнодорожных пассажирских перевозок на пять уровней автоматизации: от УА0 до УА4, аналогично уровням *GoA*.

Закрытые системы характеризуются отсутствием транспортных пересечений в одном уровне, однотипностью подвижного состава, периодичностью и постоянством маршрутов и расписания. Препятствия для движения устраняются физической закрытостью системы. Примером закрытой железнодорожной системы является метрополитен.

Открытые железнодорожные системы характеризуются различными типами подвижного состава и широким разбросом параметров поездов, включая пассажирские и грузовые, сложным графиком движения, многочисленными транспортными пересечениями в одном уровне. Препятствия для движения детектируются оператором. Магистральная железнодорожная сеть – пример открытой железнодорожной системы.

В работе [2] железнодорожные системы разделены на автоматические, которые работают в структурированной и предсказуемой среде и автономные – работающие в открытой, неструктурированной, динамической среде. Под открытой средой для железнодорожного транспорта понимается часть пути, доступ к которой полностью не защищён и не контролируется. Беспилотные поезда разделены на автономные и автоматические, как работающие в открытой и закрытой среде соответственно. Автономный поезд – это поезд, способный выполнить назначенную полную транспортную миссию от одной железнодорожной станции до другой в открытой железнодорожной системе, он должен быть способен воспринимать, анализировать, принимать решения и действовать автономно, взаимодействуя с открытой окружающей средой.

Решения, позволяющие автоматизировать движение поездов в закрытых системах, применимы лишь частично к автоматизации движения в открытых системах.

На сегодняшний день реализовано несколько проектов по автоматизации открытых железнодорожных сетей.

## 1. Проекты организации беспилотного движения

Среди решений в области беспилотного движения железнодорожного транспорта следует отметить следующие проекты.

Технология компании *Parallel*, основанной в январе 2020 г, предлагает концепцию, предусматривающую использование беспилотных моторных тележек с тяговыми аккумуляторными батареями для транспортировки стандартных морских контейнеров.

Тележки обеспечивают перемещение контейнеров на расстояние до 800 км без подзарядки. Тележки оборудованы системами управления и машинного зрения для обнаружения препятствий и позиционирования.

Контейнеры опираются непосредственно на тележки, грузоподъемность одной пары тележек составляет 58 т и рассчитаны на движение со скоростью до 100 км/ч. Индивидуальный тяговый привод в каждой тележке позволяет обеспечить остановку на расстоянии прямой видимости – тормозной путь примерно в 10 раз меньше, чем у обычного грузового поезда.

Возможно объединение от 10 до 50 беспилотных рельсовых экипажей при помощи виртуальной сцепки в одну колонну, что способствует уменьшению аэродинамического сопротивления движению и более эффективному использованию пропускной способности железнодорожной инфраструктуры [3, 4].



**Рис. 1** – Моторные тележки *Parallel* для перемещения контейнеров [3]

Проект *Autohaul* горнодобывающей компании *Rio Tinto*, объявленный в июне 2019 года успешно завершённым, предусматривает автоведение тяжёловесных поездов с уровнем автоматизации *Go44* – без машиниста на борту, на железнодорожной сети протяженностью 1700 км. По этой сети осуществляется перевозка железной руды из 16 шахт в 4 терминала двух портов на западном побережье Австралии. На сети курсирует до 50 беспилотных поездов длиной 2,4 км, массой 28 тыс. т., каждый поезд включает в себя 240 вагонов и от двух до трех локомотивов. Каждый поезд оборачивается в среднем за 40 часов, включая время погрузки и выгрузки, преодолевая в среднем расстояние 800 км. Погрузка и разгрузка выполняется в автоматическом режиме, ручное управление с участием машиниста используется только при следовании по территории порта [5-7].

Робот *VLEX* на комбинированном ходу, разработанный компанией *Volert*, предназначен для выполнения маневровых работ с составом массой до 600 т, со скоростью до 6 км/ч. Робот имеет полный привод с четырьмя колёсами с электродвигателями постоянного тока мощностью до 12,5 кВт. Электропитание осуществляется от аккумулятора.



**Рис. 2** – Маневровые работы с помощью робота VLEX [8]

В рамках программы цифровизации железных дорог Германии *Digitale Schiene Deutschland* (DSD) по проекту *AutomatedTrain* [9] переоборудовано три моторвагонных пассажирских поезда *Alstom BR 430* для беспилотного движения, которые в автоматическом режиме осуществляют трогание с места, разгон, торможение и остановку. Поезда эксплуатируются на одной линии совместно с поездами, управляемыми машинистами [10].

Отечественный опыт организации беспилотного движения грузовых поездов представлен проектами беспилотных маневровых локомотивов на станции Лужская и беспилотного электропоезда ласточка.

На станции Лужская в 2015 году стартовал проект по автоматизации движения маневровых локомотивов. В ноябре 2017 года на локомотивы установили первый прототип системы технического зрения на маневровые локомотивы, состоящий из радаров, лидара и камер.

Впервые беспилотный электропоезд «Ласточка» представлен в августе 2019 года, демонстрация состоялась на испытательном кольце в Щербинке. В 2024 году беспилотная ласточка принята в эксплуатацию на Московском центральном кольце. Движение поезда осуществляется в беспилотном режиме, но машинист находится в кабине для контроля, а также открывает и закрывает двери (уровень автоматизации *GoA3*) [11].

Таким образом, беспилотное движение поездов представлено единичными проектами, широко не тиражируемыми на сетях железных дорог. Скорость развития беспилотного движения поездов связано с количеством и качеством получаемых от него эффектов, от соотношения затрат на организацию беспилотного движения и получаемых выгод.

## 2. Эффективность внедрения движения беспилотных поездов

В работе [12] показано, что эффективность проектов беспилотного движения может определяться по отношению к превращению открытого участка железной дороги в закрытый для механического исключения возможных препятствий движению поездов. Показано, что эффект от беспилотного движения увеличивается с ростом протяженности участка. Однако, эффекты от беспилотного движения не ограничиваются лишь возможностью обнаружения препятствий.

Все имеющиеся эффекты от беспилотного движения можно разделить на две группы: новые эффекты, которые могут быть получены только за счет беспилотного движения, а также улучшение показателей для имеющихся эффектов.

Новые эффекты, связанные с исключением человека из кабины локомотива:

- Уменьшение габаритов и массы транспортных средств из-за возможностей для изменения конструкций в результате пересмотра требований к конструкции подвижного состава;
- Изменение технологии управления за счет появления возможностей эксплуатации транспортных средств в условиях, недопустимых или нежелательных для нахождения человека, а также исключения физиологических возможностей человеческого организма из числа факторов, ограничивающих продолжительность безостановочного движения транспортных средств.

Улучшение существующих эффектов:

- Высвобождение трудовых ресурсов, требуемых для перемещения грузов и пассажиров;
- Повышение пропускной способности транспортной инфраструктуры за счет задействования имеющихся резервов, в результате увеличения скорости и точности принятия решений, выполнения технологических операций за счет учета большего количества влияющих факторов;
- Повышение безопасности транспортных операций вследствие более высокой чувствительности датчиков по сравнению с органами чувств человека;
- Улучшение условий труда, снижение вредных и опасных факторов.



### 3. Проблемы внедрения беспилотного движения на железнодорожном транспорте

Кроме того, широкое внедрение беспилотного транспорта предполагает решения ряда научных проблем.

#### 3.1 Реакция беспилотного поезда на обнаруженное препятствие

Наиболее значимая проблема массового внедрения беспилотных поездов, в том числе и грузовых – отсутствие общепринятого порядка действий (реакции) системы управления автономного поезда при обнаружении препятствия.

Основной функцией автономной бортовой системы технического зрения является обнаружение и классификация объектов на определенном расстоянии для предотвращения столкновений и определения потенциально опасных ситуаций во время движения поезда. Объекты, представляющие опасность для движения, находятся на рельсах или в габарите приближения. Поэтому автономная бортовая система должна включать функции:

- Обнаружения рельсов;
- Обнаружения объектов на рельсах и в габарите приближения;
- Оценки расстояния между обнаруженным объектом и поездом [13].

В работе [14] функции системы управления автономным поездом расширены: обнаружение препятствий, оценка расстояния, определение области интереса (ROI – Region Of Interest), прогнозирование траектории движения препятствия, распознавания намерений пешеходов.

Препятствиями в открытой среде, кроме железнодорожного подвижного состава и тупиковых упоров, могут быть люди, автомобили, крупные животные, деревья, камни, неправильно установленные тормозные колодки, наводнения, пожары и т.п. Препятствия могут не только появляться на земле, но и висеть на контактной сети или парить в воздухе. Искривления и выбросы рельсов, нарушения их целостности, разрушение балластной призмы, обрывы и повреждения контактных проводов. Обобщая, препятствие для движения железнодорожного подвижного состава, можно определить как объект, требующий реакции (остановки или снижения скорости) системы управления, не предусмотренной графиком движения.

Авторы работ [12, 14, 15] отмечают отсутствие общепризнанных метрик производительности технических систем в части обнаружения препятствий. Показано, что производительность систем следует определять, основываясь на производительности машиниста. Предлагаются непрерывные метрики для определения производительности:

- Расстояние до препятствия в момент его обнаружения;
- Время до препятствия в момент его обнаружения;
- Время реакции, то есть разница между временем появления препятствия и временем его обнаружения.

Эталонных значений для оценки расстояния и определения железнодорожного пути человеком не существует. Получены только некоторые значения для эффективности обнаружения препятствий. Обобщенные результаты приводятся в работе [14], машинист способен заметить объекты на расстоянии не более 750 м в зависимости от их размера, формы, цвета, контрастности с окружающей средой. Кроме того, способность обнаруживать объекты снижается с увеличением скорости движения.

Ввиду непрерывной работы технического зрения при движении поезда предпочтительнее определять долю объектов, обнаруженных на некотором приемлемом расстоянии, чем количественные значения обнаруженных препятствий. Обсуждается противоречие между приемлемым расстоянием для обнаружения определенной доли объектов и допустимым числом ложного включения торможения.

Результаты исследований возможностей систем технического зрения по определению препятствий и прогнозированию столкновений содержатся в работах [16-20].

Необходимость обнаружения препятствий автономными поездами не ограничивается визуальным каналом, необходимо обнаруживать возникновение физического контакта

поезда с различными объектами, а также различные звуковые сигналы [21]. Однако, данное направление – обеспечение мультимодальности систем управления автономными поездами находится на начальной стадии исследований.

Важно не только обнаружить объект, но и правильно отреагировать на его появление – снизить скорость до необходимой величины или выполнить полную остановку до препятствия. Тормозной путь грузовых поездов может составлять несколько километров, что не позволяет гарантировать полной остановки. Согласно исследованию [22], выполненному на основе статистического анализа данных о несчастных случаях из нераскрытого европейского региона с января 2022 года по январь 2024 года, машинисты могут избежать около 28,43% (95% доверительный интервал между 15,70% и 39,80%) столкновений в условиях хорошей видимости, только 11,81% можно было бы избежать при любой видимости.

Аварийная ситуация может возникнуть не только из-за медленной реакции и неправильных действий машиниста, либо автономной системы управления, возможность предотвращения аварии определяется соотношением расстояния (времени) до препятствия и инерционностью процесса остановки поезда.

Особая роль изучения соотношений между моментом определения препятствия и тормозным путем поезда при беспилотном движении подчеркивается в работах [23-25]. Длинный тормозной путь обычно позволяет лишь уменьшить ущерб, а не предотвратить столкновения [26].

Основными направлениями решения проблемы реакции на появление препятствия видятся – сокращение тормозных путей грузовых поездов и увеличение расстояния обнаружения препятствия.

Сокращение тормозных путей для существующих способов торможения возможно за счет уменьшения массы грузовых поездов на основе новых подходов к их формированию. Например, поезда из моторных тележек, рассмотренных в разделе 1 данной работы или аналогичный подвижной состав, либо решения с локомотивами облегченной конструкции. Сокращение тормозного пути менее расстояния обнаружения препятствий системой технического зрения позволит обеспечить своевременную остановку.

Другое решение – увеличение расстояния, на котором определяются препятствия. Концепция системы SMART2, представленная в работе [27], включает три типа подсистем обнаружения: бортовые, путевые и установленные на дронах. Все три подсистемы интегрированы в целостную систему обнаружения препятствий и несанкционированного доступа и объединены с различными железнодорожными системами, что позволяет полностью контролировать участок движения поездов.

В работе [28] приведено описание отечественного стационарного комплекса обнаружения препятствий (СКОП) для контроля зон ограниченной видимости.

В целом, несмотря на наличие путей решений и проработку отдельных вопросов, требования к реакции автономного поезда на обнаруженные препятствия в рассмотренных работах окончательно не сформулированы.

### **3.2 Взаимодействие беспилотных поездов с существующей инфраструктурой и подвижным составом**

Внедрение беспилотного движения требует решения вопросов обеспечения интероперабельности существующего подвижного состава и инфраструктуры с беспилотными поездами, а также беспилотных поездов между собой. Под интероперабельностью понимается способность нескольких информационных систем или компонентов к обмену информацией и использованию информации, полученной в результате обмена. Интероперабельность – свойство различных компонентов системы беспрепятственно обмениваться информацией между собой, правильно интерпретировать полученную информацию и эффективно ее использовать для решения целевых задач [29].

В существующих железнодорожных системах обмен, интерпретация и эффективное использование информации возложены на машиниста. При широком внедрении беспилотного движения потребуются решение вопросов интероперабельности. Существующая модель интероперабельности, представленная в стандарте ГОСТ 55062 «Информационные технологии (ИТ). Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения» предполагает взаимодействие информационных систем формализуется на трех иерархических уровнях:

- Техническом (способность к обмену данными между участвующими в обмене системами с использованием технических средств);
- Семантическом (способность взаимодействующих систем одинаковым образом интерпретировать смысл информации, которой они обмениваются);
- Организационном (совместимость или совместность целей, а также единство или эквивалентность нормативно-правовой базы, регламентирующей процессы информационного взаимодействия) [29].

Для решения задач технического уровня обеспечения интероперабельности особую актуальность представляют каналы и системы цифровой связи. Задачи семантического уровня предполагают одинаковую интерпретацию передаваемой информации, в том числе системами искусственного интеллекта и технического зрения. Задачи организационного уровня – согласование по целям беспилотного подвижного состава с железнодорожной инфраструктурой и с подвижными единицами под управлением машиниста.

На техническом уровне основной принцип взаимодействия бортовой и стационарной аппаратуры управления движением поездов на железных дорогах РФ – передача сигналов через рельсы. На основе этого принципа функционируют системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и система автоматического управления торможением (САУТ). Организация движения автономных поездов требует двухстороннего канала передачи информации (не только к локомотиву, но и от локомотива на объекты инфраструктуры), для обеспечения непрерывного взаимодействия с открытой средой не только за счет системы технического зрения. Единственная возможность обеспечить двунаправленную передачу между локомотивным оборудованием и стационарными объектами – применение радиоканала.

Семантический уровень интероперабельности требует обеспечения возможности правильной интерпретации данных и команд от машинистов подвижного состава, объектов инфраструктуры и информационно-управляющих систем, что можно обеспечить путем разработки стандартизованных протоколов и автоматических алгоритмов управления движением.

Организационный уровень не реализуем без корректировки существующей и разработки новой нормативной документации для подвижного состава и систем инфраструктуры, управляемых человеком.

### 3.3 Стандартизация и сертификация автономных поездов

Представляет интерес вопрос отсутствия методов сертификации безопасности беспилотных систем поездов по причине слабой верифицируемости и отсутствия строгих методов доказательства безопасности систем искусственного интеллекта, в том числе технического зрения [30]. На текущий момент концепция обеспечения безопасности состоит в комплексном подходе к безопасности, взаимодействию подсистем, основанных на разных принципах. Развиваются новые направления:

- XAI (explainable artificial intelligence) – объяснимый или интерпретируемый искусственный интеллект;
- Контролируемые нейронные сети;
- Метод многопараметрической или векторной оптимизации обучения глубоких сверточных сетей [31, 32].

Для широкого внедрения технологии беспилотного движения отмечается необходимость построения цифровой модели пути [33, 34], а также цифровых полигонов и моделей для тестирования беспилотных систем [35-37].

Стандартизация систем технического зрения требует наличия открытых эталонных наборов данных для обучения и подтверждения правильности функционирования систем. В источниках описано несколько существующих наборов данных RailSem19, FRSign, RAWPED, Rail-DB, RailSet, GERALD, OSDaR23 – отображающих зарубежную инфраструктуру. Набор RailDataSets состоит из изображений небольшого участка пути с российских железных дорог [38]. Сформированный набор данных авторами работы [38] не доступен открыто.

Кроме того, для массового внедрения автономных поездов требуется разработка новых и адаптация существующих математических моделей движения и взаимодействия поездов, а также методов и алгоритмов на основе таких моделей. В основе алгоритмов работы систем железнодорожной автоматики используются методы дискретной математики, бортовых комплексов – методы теории автоматического управления, каналов взаимодействия – методы теории случайных процессов. Широкое внедрение беспилотного движения в практику требует объединения цифровых и аналоговых компонентов, интеграцию вычислений и абстрактных моделей с физическими процессами в единую систему, что невозможно без специального математического аппарата.

## Заключение

На сегодняшний день, беспилотное движение поездов представлено единичными проектами, широко не тиражируемыми на сетях железных дорог. Широкое внедрение беспилотного транспорта предполагает решения ряда проблем:

- Сомнения в наличии и величине положительных эффектов от внедрения беспилотного движения;
- Отсутствие общепризнанных метрик и показателей оценки производительности систем технического зрения для определения препятствий;
- Отсутствие требований к реакции автономного поезда на обнаруженное препятствие;
- Сложность верификации и доказательства безопасности систем на основе искусственного интеллекта;
- Недостаточная обеспеченность цифровыми моделями пути и цифровыми испытательными полигонами;
- Нерешенность вопросов интероперабельности – способности информационных систем беспилотного подвижного состава к обмену информацией и использованию информации, полученной в результате обмена с подвижным составом, управляемым машинистом и информационными системами инфраструктуры;
- Недостаточная разработанность математических моделей движения и взаимодействия поездов, а также методов и алгоритмов на основе таких моделей.

## Список использованной литературы

1. R. C. Ramírez, I. Adin, J. Goya, U. Alvarado, A. Brazalez and J. Mendizabal, “Freight Train in the Age of Self-Driving Vehicles. A Taxonomy Review,” in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 9750-9762, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144602.
2. D. Trentesaux et al., “The Autonomous Train,” in *2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, Paris, France, 2018, pp. 514-520, doi: 10.1109/SYSE.2018.8428771.
3. Сайт компании Parallel. Электронный ресурс. URL: <https://www.moveparallel.com> (дата обращения: 03.09.2025).
4. Ефремов, А. Беспилотные рельсовые экипажи для контейнерных перевозок / А. Ефремов // *Железные дороги мира*. – 2022. – № 3. – С. 57-59.
5. Ефремов, А. Беспилотные тяжеловесные поезда на сети компании Rio Tinto в Австралии / А. Ефремов // *Железные дороги мира*. – 2020. – №1. – С. 61-66.
6. Презентация системы AutoHaul. Электронный ресурс. URL: <https://social-innovation.hitachi/-/media/project/hitachi/sib/en-au/events/pdf/Roslyn-Stuart-slide.pdf> (дата обращения: 01.09.2025).
7. M. Yusuf, A. MacDonald, R. Stuart, and H. Miyazaki, “Heavy haul freight transportation system: AutoHaul – Autonomous heavy haul freight train achieved in Australia,” *Hitachi Review*, vol. 69, no. 6, pp. 790-791, 2020.
8. Сайт компании Volert. Электронный ресурс. URL: <https://www.vlex-robot.de/ru/novyi-vlex-robot> (дата обращения: 03.09.2025).
9. Сайт проекта Digitale Schiene Deutschland. Электронный ресурс. URL: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/projects/AutomatedTrain> (дата обращения: 26.09.2025).



10. D. Spenneberg, M. Bauer, M. Ghee, and S. Krönke, “Teststrategie zur Vermeidung von Feldtests bei der Entwicklung vollautomatisiert fahrender Züge,” *SIGNAL+DRAHT*, № 11, pp. 67-76, 2024.
11. Попов, П. А. Применение передовых технологий для работы в автоматическом режиме на МЦК / П. А. Попов // *Железнодорожный транспорт*. – 2020. – № 11. – С. 17-21.
12. R. Tagiew, T. Buder, and M. Fietze, “Überblick zur fahrzeugseitigen Kollisionsvorhersage für Eisenbahnen,” *ZEVrail*, № 174, pp. 122-127, 2023.
13. D. Ristić-Durrant, M. Franke, and K. Michels, “A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways,” *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3452, 2021, doi: 10.3390/s21103452.
14. R. Tagiew and C. Klotz, “Performance Metric for Horn and Brake Automation on Mainline Trains,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems - VEHITS*, 2024, pp. 212-219, doi: 10.5220/0012553100003702.
15. R. Tagiew, T. Buder, K. Hofmann, C. Klotz, and R. Tilly, “Towards Nucleation of GoA3+ Approval Process,” in *Proceedings of the 2021 5th High Performance Computing and Cluster Technologies Conference (HPCCT '21)*, New York, NY, USA, 2021, pp. 41–47, doi: 10.1145/3497737.3497742.
16. Попов, П. А. Переход к беспилотным поездам: текущие вызовы и пути решения / П. А. Попов, С. В. Кудряшов // *Автоматика, связь, информатика*. – 2021. – № 11. – С. 18-20.
17. Попов, П. А. Требования к системе технического зрения / П. А. Попов, С. В. Кудряшов // *Железнодорожный транспорт*. – 2024. – № 7. – С. 33-35.
18. R. Nakasone, N. Nagamine, M. Ukai, H. Mukojima, and D. Deguchi, “Frontal Obstacle Detection Using Background Subtraction and Frame Registration,” *Quarterly Report of RTRI*, vol. 58, no. 4, pp. 298-302, 2017, doi: 10.2219/rtriqr.58.4\_298.
19. W. Zhangyu, Y. Guizhen, W. Xinkai, L. Haoran and L. Da, “A Camera and LiDAR Data Fusion Method for Railway Object Detection,” in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 12, pp. 13442-13454, 15 June 15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3066714.
20. R. Tagiew, D. Leinhos, H. von der Haar et al., “Sensor system for development of perception systems for ATO,” *Discov Artif Intell*, vol. 3, p. 22, 2023, doi: 10.1007/s44163-023-00066-4.
21. T. Herrmann, B. Noethlichs, M. Schischkoff, T. Hanisch, D. Lauer, M. Koppel, and K. U. Wolter, “Auf dem Weg zum vollautomatischen Fahren— ein erstes Forschungsprojekt zur Erkennung von Überfahreignissen,” *ZEVrail*, vol. 03, no. 2, 2023.
22. O. Lahneche, A. Haag, P. Dendorfer, V. Aravantinos, M. Guilbert, and M. Sallak, “Analysing railway accidents : a statistical approach to evaluating human performance in obstacle detection,” in *Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance*, 2024.
23. Баранов, Л. А. Обеспечение безопасности движения поездов в беспилотных транспортных системах / Л. А. Баранов // \*XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019\*. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 1995-1999.
24. Баранов, Л.А. Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов / Баранов Л. А., Бестемьянов П. Ф., Балакина Е. П., Охотников А. Л. // *Мир транспорта*. – 2021. – Т. 19. – № 6 (97). – С. 6-12.
25. Попов, П. А. Сопоставление возможностей человека и машины в восприятии окружающего мира / Попов П. А., Дашонок В. Л. // *Железнодорожный транспорт*. – 2019. – № 8. – С. 44-46.
26. R. Tagiew, T. Buder, K. Hofmann, and C. Klotz, “Risikoanalyse der Schnellbremsung bei frontaler Kollisionsgefahr,” *Elektrische Bahnen*, № 6-7, 2022.
27. Hyde P, Ulianov C, Liu J, Banic M, Simonovic M, Ristic-Durrant D. “Use cases for obstacle detection and track intrusion detection systems in the context of new generation of railway traffic management systems,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 236, no. 2, pp. 149-158, 2021, doi:10.1177/09544097211041020.
28. Попов, П.А. Инфраструктура для внедрения систем автоматического управления электропоездами / Попов П.А. // *Железнодорожный транспорт*. – 2022. – № 10. – С. 20-23.
29. Макаренко, С. И. Интероперабельность организационно-технических систем. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2024. – 313 с.

30. Розенберг, Е.Н. Общие подходы к доказательству безопасности автономных систем / Е. Н. Розенберг, П. А. Попов, Д. В. Талалаев, А. М. Олышанский, Н. А. Бояринова // *Автоматика, связь, информатика*. – 2022. – № 1. – С. 2-9.
31. Розенберг, Е. Н. О применении нейронных сетей в ответственных системах / Е. Н. Розенберг, Д. В. Талалаев // *Интеллектуальные транспортные системы. материалы Международной научно-практической конференции*. – Москва, 2022. – С. 451-453.
32. Шебе, Х. Различные подходы к автономному вождению для железных дорог / Х. Шебе, И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг // *Надежность*. – 2025. – Т. 25. – № 1. – С. 4-10.
33. Якушев, Д.А. Цифровая модель пути для беспилотного управления движением поездов / Д. А. Якушев // *Автоматика, связь, информатика*. – 2021. – № 4. – С. 35-39.
34. Иванов, В.Ф. Высокоточная система позиционирования железнодорожного подвижного состава / В. Ф. Иванов, П. А. Попов // *Труды АО «НИИАС». Сборник статей*. – Москва, 2021. – С. 179-189.
35. B. Thomas-Friedrich, E. Bosch, B. Cogan, H. Wasle, and A. Naumann, “Menschliche Wahrnehmung als Maßstab für zukünftige ATO-Systeme,” *EI-DEREISENBAHNINGENIEUR*, № 09, pp. 62-66, 2023.
36. B. Milius, B. Cogan, B. Thomas-Friedrich, H. L. Esther Bosch, U. Metzger, and D. Leinhos, “Funktionale Anforderungen an Sensorik und Logik einer ATO-Einheit,” Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, 2024. [Электронный ресурс]. DOI: 10.48755/dzsf.250002.01.
37. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), “RailSiTe® (Rail Simulation and Testing),” *Journal of large-scale research facilities*, vol. 2, p. A88, 2016, doi: 10.17815/jlsrf-2-144.
38. Федоров В. А. Сегментация объектов техническим зрением в автоматизированных системах управления железнодорожным подвижным составом / В. А. Федоров, О. М. Огородникова // *Автоматика на транспорте*. – 2025. – Том 11. – № 3. – С. 239-249.