

УДК 629.4.053:004.896

ПЕРСПЕКТИВЫ И РИСКИ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Бочков А.В., д.т.н., АО «НИИАС», Москва, Россия
E-mail: a.bochkov@vniias.ru

Аннотация

В статье приведён критический обзор широкого спектра современных публикаций отечественных и зарубежных авторов в области развития и внедрения интеллектуальных систем управления и интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на железнодорожном транспорте. Отмечено, что перспективы внедрения разумных систем управления на железнодорожном транспорте являются многообещающими, особенно с точки зрения повышения безопасности, надежности и операционной эффективности. Эти системы объединяют искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение и предиктивную аналитику данных для оптимизации операций, управления трафиком и улучшения протоколов обслуживания. Вместе с тем, показано, что существуют риски увлечения «модным» течением цифровизации без системного анализа такой необходимости и возможности в прикладных областях его применения, т.е. без концептуального проектирования среды функционирования ИТС. В статью даны практические рекомендации снижения данных рисков на основе базовых принципов сквозной концептуальной технологии цифровизации.

Ключевые слова: искусственный интеллект, предиктивная аналитика, железнодорожные системы, риск, интеллектуальные транспортные системы, концептуальное проектирование.

PROSPECTS AND RISKS OF IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS IN RAILWAY TRANSPORT

Bochkov A.V., Doctor of Technical Sciences, JSC "NIIAS", Moscow, Russia
E-mail: a.bochkov@vniias.ru

Abstract

The article provides a critical review of a wide range of modern publications by domestic and foreign authors in the field of development and implementation of intelligent control systems and intelligent transportation systems (ITS) in railway transportation. It is noted, that the prospects for the introduction of intelligent control systems in railway transportation are promising, especially in terms of improving safety, reliability, and operational efficiency. These systems combine artificial intelligence (AI), machine learning, and predictive data analysis to optimize operations, manage traffic, and improve service protocols. At the same time, it is shown that there is a risk of being carried away by the "fashionable" trend of digitalization without a systems analysis of its necessity and possibilities in the application areas, i.e. without a conceptual design of the ITS operating environment. The article gives practical recommendations on how to reduce these risks based on the basic principles of end-to-end conceptual technology of digitization.

Keywords: artificial intelligence, predictive analytics, railway systems, risk, intelligent transport systems, conceptual design.

Введение

Железнодорожная отрасль обладает весомым потенциалом развития транспортной доступности регионов стран, для реализации которого необходимо решить сложные технологические и социальные проблемы, а также разработать современные методики, полностью отвечающие специфическим потребностям самых разных типов и условий железнодорожной инфраструктуры. Методы ИИ все чаще и успешнее применяются для решения практических задач в области железнодорожной инфраструктуры. Методы ИИ применяются для оптимизации сложных железнодорожных систем, проактивного обнаружения неисправностей и повреждений инфраструктуры, повышения безопасности городских железнодорожных сетей и улучшения качества обслуживания пассажиров [1]. Ожидают [2], что ИИ в обозримом будущем станет привычным инструментом, используемым во всей железнодорожной отрасли.

Несомненно, ИИ окажет значительное влияние на железнодорожный транспорт, революционизируя такие области, как управление пропускной способностью, техническое обслуживание, прогнозирование пассажиропотока и снижение зависимости от человеческого фактора. Это позволит создать высокоавтоматизированные и самоадаптирующиеся системы. Например, Toshiba разработала ИИ-систему для оптимизации расписания поездов компании Greater Anglia (Великобритания) [3], а французский оператор SNCF внедрил предиктивное обслуживание на основе ИИ для пригородных поездов Transilien в Париже [4].

ОАО «РЖД» по состоянию на сентябрь 2024 года реализованы 28 систем, в которых задействованы технологии ИИ. Одной из ключевых сфер применения таких алгоритмов являются речевые сервисы, которые позволяют обрабатывать около 50% всех обращений клиентов без участия человека [5].

1. Уточнение терминологии

В первую очередь уточним само определение широко применяемого в настоящее время понятия «искусственный интеллект». В английском языке AI (artificial intelligence) слово *intelligence* переводится как «умение рассуждать разумно», а вовсе не «интеллект» (для которого есть соответствующий английский аналог – *intellect*). Следствием неверного перевода термина, впервые предложенного Джоном Маккарти¹ ещё в 1956 году, являются необоснованные страхи и опасения, активно нагнетаемые журналистами и т.н. «нейроучеными» в общественном сознании о близкой отмене «искусственным интеллект» человека как вида вообще. Кроме того, отсутствие чётко формализованного определения используемого понятия вносит хаос в обсуждения как самого явления, получившего название «искусственный интеллект», так и областей его возможного и наиболее эффективного практического применения.

Первичное определение связывает ИИ с любыми машинами, действующими таким образом, который воспринимается сторонним наблюдателем как разумное поведение [6] или демонстрирующими типичные для человеческого мышления характеристики.

¹ **Джон Маккарти** (англ. *John McCarthy*; 4 сентября 1927, Бостон - 24 октября 2011, Стэнфорд) – в американский информатик, автор термина «искусственный интеллект» (1956), изобретатель языка Лисп (1958), основоположник функционального программирования, лауреат премии Тьюринга (1971) за огромный вклад в область исследований искусственного интеллекта.

Согласно тесту Тьюринга [7] машину можно считать разумной, если в процессе диалога с беспристрастным наблюдателем, последний не сможет отличить её поведение и ответы от человека.

Словари определяют интеллект (от лат. *intellectus* «восприятие»; «разумение», «понимание»; «понятие», «рассудок») или ум как качество психики, состоящее из способности осознать новые ситуации, способности к обучению и запоминанию на основе опыта, пониманию и применению абстрактных концепций, и использованию своих знаний для управления окружающей человека средой. Общая способность к познанию и решению проблем, которая объединяет познавательные способности: ощущение, восприятие, память, представление, мышление, воображение.

То есть, интеллект – это способность субъекта к обучению и адаптации в ответ на возникающие изменения внешней среды. Способность – одно из свойств субъекта. Машина в настоящее время не обладает субъектностью, поскольку она не определяет самостоятельно цель своей деятельности. Она способна функционировать только в рамках заданной человеком цели оптимальным образом выбирая лучший из заданных алгоритмов в условиях всевозможных ограничений, демонстрируя при этом элементы самообучения и совершенствуя алгоритмы выбора для повышения результативности и эффективности деятельности.

Путаница с определением термина привела в настоящее время к хаосу в программах развития ИИ, а также в стандартах. Например, Стратегия развития ИИ определяет [8] ИИ как комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Близкое определение дает ГОСТ Р 59277-2020, в котором [9] ИИ – это комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека².

В то же время ГОСТ Р 59276-2020 определяет [10] ИИ как способность технической системы имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека.

ИИ определяется также как компьютеризированная система, способная выполнять физические задачи и имитирующая когнитивные функции, решать различные проблемы или принимать решения без явных инструкций от оператора [11].

К настоящему времени введены более структурированные и подробные определения, например, определения Европейской комиссии, 2018 [12], Европейской комиссии и Объединенного исследовательского центра, 2019 [13] и, наконец, определение Британской энциклопедии [14]. Эти определения, пытаясь охватить широкую природу ИИ и его потенциальную область практического применения, являются слишком абстрактными для некоторых областей применения и, следовательно, с меньшей вероятностью будут широко приняты. В целом же, такие общие

² Примечание — Комплекс технологических решений включает в себя информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных, анализу и синтезу решений.

определения, как правило, снижают понимание, что приводит к отсутствию общего согласия относительно того, что на самом деле представляет собой ИИ.

В качестве рабочего для железнодорожного транспорта можно принять определение ИИ, данное в работе [15]. ИИ определен авторами как дисциплина, позволяющая системе обучаться на основе наблюдений, взаимодействия с окружающей средой и конкуренции или обмена информацией с другими субъектами. Это определение подчеркивает ключевые аспекты ИИ, важные для железнодорожной сферы:

1. Способность обучаться на примерах, а не следовать жестко заданным алгоритмам.
2. Умение работать в среде с другими субъектами, не теряя фокуса на задаче.
3. Выполнение задач, требующих интеллекта в человеческом понимании.
4. Отсутствие тривиальной автоматизации.
5. Универсальность реализации (аппаратная, программная или гибридная).

ИИ включает также такие, несомненно перспективные, направления, как машинное обучение (ML) и глубокое обучение (DL). Оба направления связаны с обучением нейронных сетей на данных без явного программирования. Обсуждение данного направления оставляем за пределами настоящей статьи, однако заметим, что в последние годы уровень технологий позволил инженерам создавать все более сложные нейросетевые модели, способные автоматически извлекать признаки из данных, что обеспечивают глубокое обучение, позволяющее «вычислительным моделям, состоящим из нескольких слоев обработки, изучать представления данных с несколькими уровнями абстракции» [16]. Развитием данного направления заняты и отечественные исследователи. Например, в статье [17] представлен разрабатываемый авторами агент-наставник — система ИИ для обучения профессиональным навыкам с использованием технического оборудования, например тренажеров. Агент моделирует деятельность опытного наставника и использует рассуждения на основе здравого смысла. Его реализация основана на событийном исчислении как расширении логики первого порядка. Рассмотрена архитектура обучающего комплекса с агентом-тьютором, включая его применение для подготовки персонала сортировочного парка железнодорожной станции.

Предложенное выше определение, тем не менее, остается дискуссионным и обсуждается во многих работах современных авторов [16, 18].

2. Области применения интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте

В литературе имеется ряд обзорных статей, посвященных применению ИИ на железных дорогах. В работе [19] проведён обзор применения аналитики больших данных в железнодорожном машиностроении и транспорте. В [20] рассмотрено текущее и потенциальное использование ИИ в железнодорожных активах, а в [21] представлен обзор подходов, основанных на данных, для управления диспетчеризацией поездов, включая статистические методы, графические модели и машинное обучение (МО). Chenariyan Nakhaee et al. (2019) [22] проанализировали применение МО в обслуживании железнодорожных путей, предложив таксономию для классификации литературы, выявив недостатки методов и предложив направления для исследований. Лю и др. (2020) [23] рассмотрели технологии визуального контроля на основе обработки изображений в железнодорожной отрасли. В [24] систематически изучен прогноз городского потока на основе пространственно-временных данных, а также обсуждаются методы МО, их ограничения и перспективы.

Обзор устойчивости железнодорожной системы с упором на количественные подходы был представлен в работе [25]. В этом обзоре также обсуждаются метрики оценки устойчивости, содержащие подходы, основанные на данных и оптимизации.

Корман и Мэн (2015) представили [26] обзор последних подходов к проблемам перепланирования онлайн-железнодорожных перевозок, с учетом как динамических, так и стохастических аспектов. Авторы пришли к выводу, что наиболее распространёнными подходами являются модели, основанные на оптимизации.

Однако в литературе, посвящённой применению ИИ на железных дорогах, отсутствует комплексный обзор, который, желательнее, с одной стороны, принимал бы широкую перспективу ИИ, а с другой стороны, рассматривал бы железнодорожную систему в целом, т.е. учитывал взаимосвязи различных областей железнодорожной отрасли.

Чтобы понять текущее положение с применением ИИ на железных дорогах, рассмотрим ключевые подбласти его применения.

2.1. Повышение уровня безопасности и надежности железнодорожного транспорта

Системы непрерывного мониторинга могут интегрироваться с управлением движением поездов для управления надежностью железнодорожной инфраструктуры и обеспечения более безопасных эксплуатаций [27]. Системы непрерывного мониторинга на железнодорожном транспорте необходимы для повышения безопасности, надежности и операционной эффективности. В этих системах используются передовые технологии для постоянной оценки состояния железнодорожной инфраструктуры и параметров поездов, что позволяет своевременно принимать меры и проводить техническое обслуживание.

Системы непрерывного мониторинга могут интегрироваться с системой управления движением поездов для оценки надежности железнодорожной инфраструктуры, что позволяет упреждающе управлять рисками безопасности [28].

Автоматизированные системы могут непрерывно отслеживать шунтирующее воздействие рельсовых цепей, что крайне важно для предотвращения аварий из-за сбоев в системах сигнализации [29].

Инновационные системы, использующие датчики Интернета вещей и периферийные вычисления, обеспечивают мониторинг параметров поездов, таких как скорость и загрузка, в реальном времени, повышая эксплуатационную безопасность без использования ресурсов рельсов [30].

Обнаружение гофрированных рельсов: непрерывный мониторинг рифленности рельсов с помощью измерений ускорения в буксовых коробках помогает выявлять потребности в техническом обслуживании, снижать уровень вибраций и количество жалоб от жителей близлежащих местностей [31].

Новые методологии с использованием стохастических сетей Петри со стохастическим временем P позволяют отслеживать эффективное время пребывания в железнодорожных системах, облегчая обнаружение и диагностику эксплуатационных неисправностей [32].

Статья [33] посвящена оценке функциональной безопасности (ФБ) интеллектуальных систем управления (ИСУ). Традиционные методы недостаточно эффективны для ИСУ из-за их нечёткой архитектуры и динамических связей между элементами. Для обоснования ФБ ИСУ необходимо использовать комплекс методов, рекомендованных ГОСТ 33432-2015, включая организационные меры, аналитиче-

ские, экспериментальные, экспертные и технологические подходы, а также имитационное моделирование. В качестве перспективного предложен эвристический графовый полумарковский метод, который рекомендуется сочетать с технологическим методом, описанным в ГОСТ Р МЭК 61508. Такой комплексный подход позволит не только уверенно оценить ФБ ИСУ, но и разработать рекомендации для достижения приемлемых уровней безопасности.

Технологии ИИ способствуют повышению безопасности, предоставляя возможности анализа данных и прогнозирования в реальном времени, которые помогают выявлять потенциальные опасности до их возрастания. Интеграция ИИ с технологиями Интернета вещей (IoT) и цифровых двойников (Digital Twin) позволяет осуществлять интеллектуальное планирование и управление, что еще больше усиливает меры безопасности [34].

ИИ значительно повышает надежность железнодорожной инфраструктуры за счет использования алгоритмов глубокого обучения для анализа обширных наборов данных (как оперативных, так и архивных). В результате интеграция ИИ не только продлевает срок службы железнодорожных активов, но и повышает безопасность и надежность обслуживания, в конечном итоге сокращая время простоя в эксплуатации и расходы, связанные с непредвиденными отказами [35]. В статье представлена комплексная структура, использующая алгоритмы машинного обучения для анализа больших наборов данных, поступающих с датчиков, архивных записей о техническом обслуживании и эксплуатационных показателей, что позволяет выявлять закономерности и прогнозировать потенциальные сбои до их возникновения. Такой подход оптимизирует графики технического обслуживания и продлевает срок службы железнодорожных активов. Тематические исследования, обобщенные в статье, демонстрируют эффективность методологий, основанных на ИИ, в реальных сценариях. Они свидетельствуют о снижении затрат, усилении мер безопасности и повышении надежности обслуживания, подчеркивая тем самым преобразующий потенциал ИИ и глубокого обучения в управлении железнодорожной инфраструктурой.

В статье [36] рассмотрен опыт применения нейронных сетей для автоматизации движения поездов в части использования технического зрения для обнаружения препятствий и распознавания железнодорожных знаков и сигналов через обучение нейронных сетей.

Работа [37] посвящена анализу механизмов формирования рекомендаций и оценки реакции на них в интерактивном режиме работы пользователя с геоинформационной системой. Рекомендательные системы играют важную роль в поиске и принятии решений в пространственных ситуациях, где часто присутствует неопределенность и неоднозначность. Пользователи сталкиваются с нечетко сформулированными проблемами, что требует выбора направления поиска и последовательности задач с ясными входными и выходными данными. В данной работе исследуется интеллектуальная рекомендательная система, которая использует диалоговое взаимодействие для изучения проблем. Предлагается модель адаптации к ментальному образу проблемы, учитывающая ситуационную осведомленность и когнитивную нагрузку пользователя. Модель включает визуальные картографические объекты как индикаторы ментального состояния. Рекомендации представлены в виде объектов для картографического анализа, что способствует повышению осведомленности. Также предложен критерий удовлетворенности рекомендациями и диаграмма состояний системы, описывающая подбор контекста для решения задач. Контексты рассматриваются как прецеденты опыта, а их последовательности оцениваются по показателям тренда и ритма, что позволяет ускорить адаптацию.

В статье [38] ИИ рассмотрен как система взаимодействия «человек-компьютер». Обозначены ключевые задачи Стратегии цифровой трансформации

ОАО «РЖД», связанные с ИИ. Описаны разработки и применения ИИ в железнодорожной отрасли, включая управление движением, диагностику инфраструктуры, безопасность, обучение персонала и экологию. Также приведён обзор решений в области анализа больших данных, обнаружения объектов, видеоаналитики и поддержки принятия решений.

2.2. Диагностика и мониторинг в режиме реального времени

Системы ИИ, использующие нечеткую логику и нейронные сети, обеспечивают диагностику железнодорожных путей в реальном времени, повышая эксплуатационную надежность и безопасность [39]. В статье представлено инновационное решение, использующее ИИ, в частности нечеткую логику и метаэвристику, для исследования состояния железнодорожных путей в реальном времени, повышая эксплуатационную надежность и безопасность в железнодорожном секторе.

Разработанная технология применима не только для диагностики инфраструктуры традиционных железных дорог, но и для городских железнодорожных систем, таких как трамваи и метро, обеспечивая тем самым высокий уровень безопасности пассажиров и способствуя модернизации и повышению эффективности железнодорожной отрасли. Эти системы применимы к городским железным дорогам, таким как трамваи и метро, и обеспечивают высокий уровень безопасности пассажиров.

Системы мониторинга на базе ИИ объединяют алгоритмы машинного обучения и компьютерное зрение, чтобы революционизировать традиционные методы мониторинга железных дорог [40]. В статье представлена усовершенствованная система мониторинга железных дорог на основе ИИ, которая интегрирует различные алгоритмы машинного обучения, такие как метод опорных векторов, случайный лес и рекуррентные нейронные сети. Эта система решает задачи анализа и профилактического обслуживания в реальном времени для традиционных железнодорожных систем. С применением компьютерного зрения и аналитики данных, она направлена на трансформацию методов мониторинга, что в итоге должно повысить безопасность, надежность эксплуатации и оптимизацию ресурсов транспортной инфраструктуры.

Системы мониторинга на основе ИИ используют алгоритмы машинного обучения для анализа в реальном времени и профилактического обслуживания, что значительно сокращает время простоя [41]. Технологии компьютерного зрения улучшают обнаружение неисправностей и оптимизацию ресурсов, обеспечивая эксплуатационную надежность.

При принятии решений о возможности использования систем ИИ для решения ответственных задач обработки данных и управления обязательным условием является понимание потребителем и другими заинтересованными сторонами функциональных характеристик этих систем в предусмотренных условиях эксплуатации. В [41] предпринята попытка формулировки и интерпретации задачи оценки функциональных характеристик систем ИИ с позиций метрологии. Показано, что в метрологическом контексте задача оценивания функциональных характеристик систем ИИ может быть рассмотрена по аналогии с оценкой соответствия средств измерений. Последние представляют собой в этом случае тестовые наборы данных, от репрезентативности которых зависит погрешность измерений функциональных характеристик. Рассмотрен механизм формирования погрешности измерений. В качестве моделей измерений предложены модели с использованием эталонных наборов данных, оценкой репрезентативности тестовых наборов данных и с использованием эталонных алгоритмов машинного обучения.

В статье [42] представлен инновационный метод формирования показателей работы грузовой сортировочной станции, использующий информацию от считывающих устройств и датчиков, установленных на путях (т.н. «данные от колеса»). Подчеркнуты актуальность и достоверность предлагаемого подхода, который позволяет получать точные данные о работе станции. Метод реализован с использованием системы мониторинга перемещений вагонов и локомотивов в режиме реального времени. Обнаружены расхождения между результатами, полученными с помощью этого метода, и данными, содержащимися в отчетах ОАО «РЖД», предложены гипотезы, объясняющие эти различия.

В статье [43] представлена новая технология интеллектуального мониторинга железнодорожных перевозок на основе динамического метода главных компонент. Метод включает рекурсивный алгоритм для вычисления ключевых признаков и три статистических критерия для принятия решений. Демонстрируется эффективность рекурсивных алгоритмов адаптивного мониторинга слабоформализованных процессов в режиме реального времени. Учитывая медленные изменения в технологических процессах (старение оборудования, дрейфы датчиков, обслуживание и модернизация), предложенная схема мониторинга может широко применяться на железнодорожном транспорте.

В статье [44] рассмотрены методы повышения точности прогнозирования и классификации несбалансированных данных, с акцентом на редкие события. При использовании машинного обучения для прогнозирования редких событий возникает проблема, когда качество моделей не соответствует их реальной способности предсказывать такие события. Исследуются подходы к обучению моделей на несбалансированных данных, в частности, на примере данных об инцидентах и опасных событиях на объектах железнодорожного электроснабжения. Несбалансированность данных выражается в значительном дисбалансе между классами событий. Для улучшения качества моделей классификации и прогнозирования применяются различные методы, такие как FAST³, нечёткие классификаторы, GridSearchCV⁴, а также методы сэмпинга данных, включая NearMiss⁵, который позволяет экспериментировать с пропорциями классов. Проблема дисбаланса классов в анализе инцидентов на железнодорожном транспорте сохраняется с 2015 года. Несмотря на снижение доли опасных событий с 2018 года, их рост возможен. Статистика указывает на отсутствие устойчивого снижения и периодические пики. Проведен анализ методов работы с несбалансированными данными, изучены их сильные и слабые стороны, а также уточнена терминология, связанная с дисбалансом классов. В результате экспериментов с методом NearMiss удалось повысить точность классификации редких опасных событий с 0 до 70-90%.

³ Методика системного анализа функций - Function Analysis System Technique - является одним из наиболее сильных и простых механизмов анализа и классификации функций. FAST позволяет найти взаимозависимости между функциями, на основе которых формируется структура модели, т.е. субъективный подход сведен к минимуму. Цель FAST - раскрытие выраженных в функциональной форме значительных черт и признаков рассматриваемой проблемы, а также расположение их в какой-либо логической последовательности и стимулирование поиска наиболее эффективных способов осуществления функций.

⁴ Алгоритм поиска по сетке – это метод подбора оптимальных гиперпараметров для модели путем перебора всех возможных комбинаций значений гиперпараметров из заданного набора. Гиперпараметры – это параметры модели, которые не оптимизируются во время процесса обучения, а задаются до его начала.

⁵ Метод NearMiss – это метод недостаточной выборки. Он пробует сбалансировать распределение классов путём случайного исключения наблюдений из больших классов. Если экземпляры из двух разных классов очень похожи между собой, метод удаляет наблюдение из мажоритарного класса.

2.3. Системы управления на железнодорожном транспорте

Системы управления играют ключевую роль в обеспечении безопасных расстояний между поездами и предотвращении столкновений, что значительно повышает эксплуатационную безопасность [45]. Для обработки неопределенных данных разрабатываются интеллектуальные транспортные системы, что существенно увеличивает надежность и эксплуатационную эффективность [46]. Технологии ИИ также вносят свой вклад, обеспечивая глобальную оптимальную диспетчеризацию без участия оператора, что дополнительно повышает эффективность эксплуатации [47]. Интегрированные системы, в свою очередь, создают условия для синергетической транспортировки с использованием нескольких видов транспорта, обеспечивая бесперебойную связь и координацию [48]. Кроме того, высокоскоростные системы автоматического управления способствуют повышению пунктуальности и безопасности, устраняя сложности, связанные с современными железнодорожными сетями. В совокупности эти технологии и системы способствуют созданию более безопасной, надежной и эффективной транспортной инфраструктуры.

Интеллектуальные технологии, такие как сигнализация в кабине и системы помощи водителю, решают проблемы безопасности и уменьшают человеческий фактор в высокоскоростных железнодорожных системах. Эти технологии обеспечивают высокий уровень автоматизации, улучшают управление движением и связь в железнодорожной сети. Интеллектуальные технологии трансформируют высокоскоростные железные дороги (HSR), повышая безопасность, эффективность и оперативное управление. Интеграция ИИ и машинного обучения в различные аспекты систем HSR решает такие проблемы, как пробки на дорогах и человеческий фактор, что в конечном итоге приводит к повышению качества обслуживания и удовлетворенности пассажиров. Системы ИИ способствуют оптимальной глобальной диспетчеризации без участия оператора, обеспечивая эффективное планирование движения поездов и распределение ресурсов [49]. Эти системы обеспечивают синергетическую транспортировку несколькими видами транспорта и повышают общую эффективность сети.

Децентрализованные механизмы управления, такие как системы на основе токенов, предлагают экономичные решения в области безопасности, предотвращая движение нескольких поездов по одному и тому же маршруту [50].

Стратегии устранения перебоев в железнодорожном сообщении позволяют свести к минимуму влияние на пассажиров за счет изменения расписания перевозок на основе исторических моделей использования [51].

Такие технологии, как камеры линейного сканирования и LiDAR, позволяют проводить комплексные проверки, повышать точность обнаружения дефектов и снижать затраты на техническое обслуживание [52]. В статье освещается интеграция передовых технологий, таких как камеры линейного сканирования, LiDAR и датчики Интернета вещей, которые позволяют проводить комплексные 360-градусные проверки железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, значительно повышая точность обнаружения дефектов и снижая затраты на техническое обслуживание. В статье также обсуждается переход от реактивных к упреждающим стратегиям технического обслуживания, чему способствует непрерывный мониторинг и анализ на основе ИИ, что обещает повысить безопасность и эффективность железнодорожного транспорта за счет предотвращения аварий и обеспечения целостности конструкций.

В работе [53] рассматривается анализ системы управления движением поездов и предлагается реализовать адаптивную систему управления с использованием су-

ществующих цифровых систем на базе развертывания виртуального вычислительного комплекса на сервере централизации, вопросы безопасности каналов связи с учетом возможных кибератак и использования сетей Петри для моделирования надежности. Приведена диаграмма и результаты расчетов, показывающие, что управление хостом является наиболее эффективной мерой безопасности. Исследована структура управления движением поездов. На базе существующих цифровых систем предложено внедрение адаптивного управления локомотивами, которое оптимизирует режим движения в условиях неопределённости. Для этого требуется развернуть виртуальный вычислительный комплекс на сервере диспетчерской централизации, передав ему расчёт параметров движения.

В статье [54] рассмотрена ситуация регулирования движения отцепов на сортировочной горке, реализована задача контроля отцепов в сортировочном парке, предложен частный алгоритм ее решения, а также проведен расчет времени прохода первым отцепом участка первой тормозной позиции и межпозиционного участка. Описана схема размещения оборудования компьютерного зрения на станции Инская. Приведены результаты контроля занятости сортировочных путей, включая график распределения отцепов и аффинные преобразования кадров видеонаблюдения. Также рассмотрены перспективные направления внедрения систем компьютерного зрения для автоматизации контроля сортировочных процессов на железной дороге.

Одной из важнейших проблем синтеза интеллектуальных динамических систем является проблема идентификации структур стохастических объектов, наблюдаемых в условиях различных возмущающих воздействий. В [55] исследованы методы стохастической идентификации многоструктурных нелинейных динамических объектов, наблюдаемых в условиях негауссовских помех. Для решения задачи структурной идентификации дискретных объектов со случайной сменой структуры разработан принципиально новый подход, основанный на использовании нелинейных вероятностных критериев. Приведен пример идентификации нелинейного объекта с негауссовскими возмущениями.

2.4. Комфорт пассажиров и надежность инфраструктуры

Технологии ИИ находят широкое применение не только для повышения эксплуатационной эффективности, но и для обеспечения максимального комфорта пассажиров и надежности железнодорожной инфраструктуры. Одним из ключевых направлений является использование ИИ для автоматизированного выявления дефектов путей, таких как трещины, износ рельсов или отклонения геометрии пути. С помощью компьютерного зрения и анализа данных, полученных от датчиков и камер, установленных на подвижном составе или вдоль путей, системы на основе ИИ способны оперативно обнаруживать даже незначительные повреждения, которые могут привести к серьезным последствиям. Это позволяет своевременно планировать и проводить ремонтные работы, минимизируя риски аварий и простоев.

Кроме того, ИИ применяется для оптимизации мероприятий по техническому обслуживанию. Анализируя большие объемы данных о состоянии инфраструктуры, погодных условиях, интенсивности движения и других факторах, ИИ помогает прогнозировать износ оборудования и планировать профилактические работы с учетом реальной нагрузки. Это не только снижает затраты на обслуживание, но и повышает общую надежность системы, предотвращая внеплановые остановки и задержки.

Для пассажиров такие технологии означают повышение комфорта и безопасности поездок. Благодаря своевременному устранению дефектов и оптимизации графика технического обслуживания, поезда становятся более пунктуальными, а путешествия — более предсказуемыми. В перспективе интеграция ИИ в управление железнодорожным транспортом может привести к созданию полностью автономных систем, которые будут обеспечивать высочайший уровень безопасности и комфорта при минимальном вмешательстве человека [56].

Такой подход повышает пропускную способность, эффективность и удовлетворенность пассажиров за счет снижения эксплуатационных расходов и задержек в поездках. В рамках упомянутого исследования разработана интегрированная модель выявления дефектов путей и оптимального распределения работ по техническому обслуживанию, направленная на снижение эксплуатационных расходов, управляющих инфраструктурой при одновременном повышении пропускной способности и эффективности городских железнодорожных систем. Применение предложенного подхода к реальной городской железнодорожной линии демонстрирует его эффективность в повышении комфорта пассажиров и сокращении задержек в пути за счет устранения влияния технического обслуживания путей на качество движения и скорость движения поездов.

Своевременную доставку информации о пассажирах и эксплуатационных данных, что крайне важно для безопасности и эффективности обеспечивают усовершенствованные системы связи на основе ИИ, оптимизирующие связь в высокоскоростных средах, сокращая затраты на измерения на 50% при сохранении производительности [57].

Графы знаний на основе ИИ используются для оценки передовых технологий в области HSR, что позволяет получить представление об их полезности и эффективности [58]. Эта система оценки помогает выявлять и приоритизировать технологии, расширяющие эксплуатационные возможности. Стоит отметить, что, хотя интеллектуальные технологии значительно улучшают системы HSR, опасения по поводу чрезмерной зависимости от автоматизации и потенциальных угроз кибербезопасности сохраняются. Баланс между технологическим прогрессом и надежными протоколами безопасности необходим для устойчивого развития высокоскоростных железных дорог [59].

Оптимизация графиков движения поездов и сокращение задержек за счет глобальной диспетчеризации без участия оператора могут быть достигнуты с помощью передовых алгоритмов и моделей. Недавние исследования посвящены различным методологиям, использующим автоматизацию и данные в реальном времени для улучшения работы поездов, в конечном итоге минимизации задержек и повышения эффективности. Так, модель динамического планирования, разработанная Янгом и др., использует алгоритм глубокого детерминированного градиента политики (DDPG) для минимизации общих задержек и потребления энергии в высокоскоростных поездах [60].

Чжоу и др. предлагают комплексный подход к оптимизации, сочетающий выбор скоростной траектории с оптимизацией расписания, что позволяет эффективно сокращать задержки и потребление энергии во время возмущений [61].

Ван и др. внедряют подход к изменению расписания движения поездов, основанный на оптимизации движения нескольких поездов, благодаря чему общая задержка поездов сократилась на 60,60% по сравнению с традиционными методами [62]. Этот метод использует взаимную пространственно-временную информацию для составления расписаний с минимальным временем и тем самым снижает нагрузку на диспетчеров.

Ли и др. представляют глобальный метод оптимизации управления, который предотвращает тупиковые состояния при движении поездов, обеспечивает бесперебойный поток и сокращение задержек в сети [63]. Метод повышает общую эксплуатационную эффективность железнодорожной системы за счет корректировки макрорежима работы поездов.

Похожие исследования активно проводятся в России [64-66]. Это т.н. виртуальная сцепка – технология, которая позволяет управлять несколькими транспортными средствами как единой системой без физического соединения между ними. Это достигается за счет использования современных технологий, таких как GPS, беспроводная связь, системы автоматического управления и датчики. Виртуальная сцепка обеспечивает синхронизацию движения, повышает эффективность транспортировки, снижает затраты на топливо и улучшает безопасность за счет автоматизированного контроля расстояния и скорости между транспортными средствами. В условиях текущих инфраструктурных ограничений и роста грузооборота технологии, способные повысить пропускную и провозную способность, становятся особенно актуальными. Наиболее перспективным решением на сегодняшний день является интервальное регулирование с использованием технологии виртуальной сцепки. Согласно расчётам, это позволяет увеличить пропускную и провозную способность до 20 % по сравнению с традиционной жёсткой сцепкой. Однако до сих пор отсутствуют методики, позволяющие определить оптимальные варианты применения виртуальной сцепки для конкретных участков железной дороги, подкреплённые математическими обоснованиями.

Заключение

Как можно видеть, спектр применения ИИ на железнодорожном транспорте чрезвычайно широк. Однако при внедрении систем, содержащих элементы ИИ, в практику (так называемую «цифровую трансформацию») высокие риски могут возникнуть вследствие невозможности на сложившихся системах организовать безошибочный ввод-вывод и передачу информации между вычислительными и управляющими подсистемами, что будет приводить к ошибкам и сбоям, которые, в свою очередь, могут стать причиной аварий и снижения общего уровня безопасности. Локальные платформы плодят вторичные проблемы стыковки, унификации данных и десятки других. Любые попытки улучшить функционирование сложившихся систем ведут, как правило, к ликвидации последних рациональных подсистем и элементов в их составе.

Крупные организации, подобные ОАО «РЖД» складывались годами, многократно менялось регулирование их сферы деятельности, менялись оргструктура, расширялся перечень полномочий и/или менялось их распределение по оргструктуре, менялись формы документов, отчетность, персонал, цели и показатели деятельности. Парк эксплуатируемой техники и инфраструктура также, как правило, очень разнородны и, можно даже сказать, находятся на разных этапах технологического развития и зрелости.

То есть необходима сквозная концептуальная технология цифровизации, с применением которой цифровая трансформация может стать целостной, прозрачной и управляемой. Об этом давно и безуспешно говорят специалисты в области концептуального проектирования [67, 68].

Вместе с тем, концептуальная технология с самого начала исходит из следующих базовых принципов:

- цифровизируется непосредственно деятельность, а не её элементы;

- цифровизированная деятельность проектируется на основе системно полных концептуальных моделей, сквозным образом охватывающих целеполагание, управление, учет, показатели, модели данных, документооборот и информационные системы, то есть на базе проектирования единой цифровой платформы;
- проектируется вся система «снизу-вверх», включая постановку системы согласованных между собой и сбалансированных по ресурсам целей, в результате чего создается комплекс моделей, системно, концептуально целостно генерирующий модели данных локальных сервисов и платформ;
- модель стратегического планирования, входящая в указанную сквозную технологию, позволяет решать двуединую задачу: постановки целей в бизнес- или госкомпании и постановке целей цифровой трансформации без потери управляемости, без приостановки или замедления бизнеса.

Кроме того, следует отметить, что несмотря на то, что системы ИИ призваны значительно повысить безопасность и эффективность железнодорожного транспорта, сохраняются проблемы интеграции этих технологий в различные железнодорожные сети и обеспечения точности и надежности данных, а также возникают проблемы конфиденциальности данных, стандартизацией протоколов безопасности на разных железнодорожных предприятиях, совместимости систем и необходимости значительных инвестиций в инфраструктуру, которые во многом определяют перспективы будущего развития ИИ в железнодорожной отрасли.

Конечная цель внедрения интеллектуальных систем управления на железнодорожном транспорте заключается в интеллектуализации системы управления производственными (физическими) активами железнодорожной отрасли в целом, построении рациональной и эффективной системы их технического содержания, приобретения, использования и отчуждения путем взвешенного, на основе оценки рисков, разумного управления имеющимися ресурсами для достижения требуемых уровней функциональной безопасности и надёжности, а также достаточных уровней их производительности и функциональности при обеспечении приемлемой стоимости жизненного цикла объекта.

Список использованной литературы

1. Burroughs D. The future of intelligence is artificial (2019) URL: https://www.railjournal.com/in_depth/future-intelligence-artificial.
2. Gibert X., Patel V.M., Chellappa R. Deep multitask learning for railway track inspection IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 18 (1) (2017), pp. 153-164, 10.1109/TITS.2016.2568758.
3. Fragnelli V., Sanguineti S. A game theoretic model for re-optimizing a railway timetable Eur. Transp. Res. Rev., 6 (2) (2014), pp. 113-125, 10.1007/s12544-013-0116-y.
4. SNCF Making your rail journey better with predictive maintenance (2020). URL: <https://www.sncf.com/en/network-expertise/rolling-stock-division/how-predictive-maintenance-improves-rail-travel>.
5. Как РЖД используют искусственный интеллект. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Искусственный_интеллект_в_РЖД?ysclid=m5tihqo1vk843029763
6. Przegalinska A. State of the art and future of artificial intelligence (2019) URL: <https://policycommons.net/artifacts/1335360/state-of-the-art-and-future-of-artificial-intelligence/1941822/>.
7. Turing A.M. Computing machinery and intelligence. Parsing the Turing Test, Springer (2009), pp. 23-65.
8. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490.
9. ГОСТ Р 59277-2020 Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта, пункт 3.18.

10. ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения, пункт 3.6.
11. Kaplan A., Haenlein M. Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence *Bus. Horiz.*, 62 (1) (2019), pp. 15-25, 10.1016/j.bushor.2018.08.004.
12. European Commission O.F., European Commission Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions Artificial Intelligence for Europe. Brussels (2018) URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a3b87099-4968-11e8-be1d-01aa75ed71a1/language-en>.
13. European Commission and Joint Research Centre Artificial Intelligence: A European Perspective Publications Office (2019), 10.2760/936974.
14. Copeland B. Artificial Intelligence Encyclopaedia Britannica, Inc. (2019) URL: <https://www.britannica.com/technology/artificial-intelligence>
15. Bešinović N., De Donato L., Flammini F., Goverde R.M.P., Lin Z., Liu R., Marrone S., Nardone R., Tang T., Vittorini V. Artificial intelligence in railway transport: Taxonomy, regulations and applications *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* (2021), pp. 1-14, 10.1109/TITS.2021.3131637.
16. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning *Nature*, 521 (7553) (2015), pp. 436-444, 10.1038/nature14539.
17. Khabarov V.I., Speshilov K.V. Model' intellektual'nogo obuchayushchego agenta s ispol'zovaniem rassuzhdenii na osnove zdravogo smysla. Primenenie v trenazhernykh tekhnologiyakh [A model of an intellectual tutoring agent based on commonsense reasoning. Its application in simulator complexes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 4 (41), pp.110-119. doi: 10.17212/1727-2769-2018-4-110-119.
18. Ruifan Tang, Lorenzo De Donato, Nikola Bešinović, Francesco Flammini, Rob M.P. Goverde, Zhiyuan Lin, Ronghui Liu, Tianli Tang, Valeria Vittorini, Ziyulong Wang, A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 140, 2022, 103679, ISSN 0968-090X, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103679>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X22001206>).
19. Ghofrani F., He Q., Goverde R.M.P., Liu X. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey *Transp. Res. C*, 90 (2018), pp. 226-246, 10.1016/j.trc.2018.03.010.
20. Jain Y., Yogesh J. A survey on railway assets: A potential domain for big data 2019 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), Vol. 1 (2019), pp. 1-6, 10.1109/ICICT46931.2019.8977714.
21. Wen C., Huang P., Li Z., Lessan J., Fu L., Jiang C., Xu X. Train dispatching management with data-driven approaches: A comprehensive review and appraisal *IEEE Access*, 7 (2019), pp. 114547-114571, 10.1109/ACCESS.2019.2935106.
22. Chenariyan Nakhaee M., Hiemstra D., Stoelinga M., van Noort M. The recent applications of machine learning in rail track maintenance: A survey International Conference on Reliability, Safety, and Security of Railway Systems, Springer International Publishing, Cham (2019), pp. 91-105.
23. Liu S., Wang Q., Luo Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry *Transp. Saf. Environ.*, 1 (3) (2020), pp. 185-204, 10.1093/tse/tdz007.
24. Xie P., Li T., Liu J., Du S., Yang X., Zhang J. Urban flow prediction from spatiotemporal data using machine learning: A survey *Inf. Fusion*, 59 (2020), pp. 1-12, 10.1016/j.inffus.2020.01.002.
25. Bešinović N. Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda *Transp. Rev.*, 40 (4) (2020), pp. 457-478, 10.1080/01441647.2020.1728419.
26. Corman F., Meng L. A review of online dynamic models and algorithms for railway traffic management *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 16 (3) (2015), pp. 1274-1284, 10.1109/TITS.2014.2358392.

27. Dmitrii, V., Efanov., E., M., Mikhailiyuta. (2023). 1. Reliability and Safety Management of the Transportation Process Using Systems for Continuous Monitoring of Railway Infrastructure Facilities. Мир транспорта, doi: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-10.
28. Dmitrii, V., Efanov., E., M., Mikhailiyuta. (2023). 1. Reliability and Safety Management of the Transportation Process Using Systems for Continuous Monitoring of Railway Infrastructure Facilities. Мир транспорта, doi: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-10.
29. Dmitriy, Viktorovich, Shvalov. (2023). 3. Methods of Monitoring the Fulfillment of the Shunt Effect of Track Circuits. doi: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-229-238.
30. Yuliang, Zhao., Xiaodong, Yu., Meng, Chen., Ming, Zhang., Ye, Chen., Niu, Xuanyu., Xiaopeng, Sha., Zhikun, Zhan., Wen, J., Li. (2021). 4. Continuous Monitoring of Train Parameters Using IoT Sensor and Edge Computing. IEEE Sensors Journal, doi: 10.1109/JSEN.2020.3026643.
31. L., Faccini., Jihad, Karaki., Egidio, Di, Gialleonardo., Claudio, Somaschini., Marco, Francesco, Bociolone., Andrea, Collina. (2023). 2. A Methodology for Continuous Monitoring of Rail Corrugation on Subway Lines Based on Axlebox Acceleration Measurements. Applied Sciences, doi: 10.3390/app13063773.
32. Anis, Mhalla. (2022). 5. Monitoring of a Railway Transport Networks Based on the Study of Effective Sojourn Time. doi: 10.1109/IC_ASET53395.2022.9765834.
33. Шубинский, И. Б. Общие положения обоснования функциональной безопасности интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг // Надежность. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 38-45. – DOI 10.21683/1729-2646-2023-23-3-38-45. – EDN HGXXNT.
34. Vasil, Vatakov., Evelina, Pencheva., Emilia, Dimitrova. (2022). Recent Advances in Artificial Intelligence for Improving Railway Operations. Telecom, 1-4. doi: 10.1109/TELECOM56127.2022.10017265.
35. Rama, Chandra, Rao, Nampalli. (2024). Leveraging AI and Deep Learning for Predictive Rail Infrastructure Maintenance: Enhancing Safety and Reducing Downtime. International Journal of Engineering and Computer Science, 12(12):26014-26027. doi: 10.18535/ijecs/v12i12.4805
36. Попов, П. А. Применение технологий искусственного интеллекта для железнодорожного транспорта / П. А. Попов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2024. – № 1(65). – С. 38-41. – EDN ZYYQSL.
37. Интеллектуальная рекомендательная система для пространственного анализа / С. Л. Беляков, А. В. Боженюк, Н. А. Голова [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3(227). – С. 14-26. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-14-26. – EDN FDCQQW.
38. Охотников, А. Л. Искусственный интеллект для железной дороги / А. Л. Охотников, А. В. Зажигалкин // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 5. – С. 30-34. – DOI 10.34649/AT.2021.5.5.004. – EDN IFAYJK.
39. Dobrivoje, Dubljanin., Filip, Marković., Gabriela, Dimić., Dragan, Vučković., Martina, Petković., Lazar, Mosurović. (2024). Educational Application of Artificial Intelligence for Diagnosing the State of Railway Tracks. International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education, 12(2):467-476. doi: 10.23947/2334-8496-2024-12-2-467-476.
40. Dommaraju, Nema, Sai. (2024). Revolutionizing Railways: An AI-Powered Approach for Enhanced Monitoring and Optimization. doi: 10.55041/isjem01382.
41. Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Иерусалимов В.С. Формирование объективных показателей работы сортировочной станции на основе данных «от колеса» // Автоматика на транспорте. 2024. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-obektivnyh-pokazateley-raboty-sortirovochnoy-stantsii-na-osnove-dannyh-ot-kolesa> (дата обращения: 21.01.2025).
42. Гарбук, С. В. Метрологическая модель процесса оценивания функциональных характеристик систем искусственного интеллекта / С. В. Гарбук, Е. О. Шамина, А. В. Яшин // Законодательная и прикладная метрология. – 2024. – № 6(192). – С. 23-32. – DOI 10.32446/2782-5418.2024-6-23-32. – EDN NSKAJC.
43. Долгий, А. И. Интеллектуальный мониторинг перевозочных процессов на основе динамического метода главных компонент / А. И. Долгий, С. М. Ковалев, А. Н. Гуда //

- Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2(90). – С. 240-251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240. – EDN YGLWRU.
44. Проневич, О. Б. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте / О. Б. Проневич, М. В. Зайцев // Надежность. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 54-65. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-3-54-65. – EDN CNENAL.
 45. Marek, Pawlik. (2015). 3. Control command systems impact on the railway operational safety. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, doi: 10.15802/STP2015/42160.
 46. Sergii, Kliuiev., Ievgen, Medvediev., Serhiy, Soroka., Vasyi, Dubuk. (2020). 5. Development of the intelligent rail vehicle control system. doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321866.
 47. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). 2. Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.006.
 48. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). 3. Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for controlling and scheduling in integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.002.
 49. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.006.
 50. Manfred, Wernicke. (2015). 4. Control of Rail Vehicles.
 51. Francisco, A., Ortega., Juan, A., Mesa., Miguel, A., Pozo., Justo, Puerto. (2018). 2. Railway traffic disturbance management by means of control strategies applied to operations in the transit system. doi: 10.2495/TDI-V2-N4-362-372.
 52. Sujith, Kumar, Kupunarapu. (2024). Machine Vision AI in Railroad Safety: Advanced Inspection Techniques. International Journal For Multidisciplinary Research, doi: 10.36948/ijfmr.2024.v06i06.29575.
 53. Корнев, Д. А. Моделирование сетей передачи данных в интеллектуальной системе управления движением поездов / Д. А. Корнев // Известия Транссиба. – 2023. – № 3(55). – С. 141-154. – EDN QICJOC.
 54. Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, А. М. Лященко, Д. В. Глазунов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 46-53. – DOI 10.52261/02346206_2022_1_46. – EDN LOQVJH.
 55. Структурная идентификация стохастических объектов в интеллектуальных динамических системах / П. А. Кучеренко, Л. Н. Стажарова, А. В. Костюков [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(87). – С. 126-135. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_126. – EDN BFLNPU.
 56. Elise, Amiel., Markos, Anastasopoulos., Guillaume, Chevalyre., Alice, Consilvio. (2023). On applying artificial intelligence techniques to maximise passengers comfort and infrastructure reliability in urban railway systems. 1-6. doi: 10.1109/mt-its56129.2023.10241648.
 57. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for controlling and scheduling in integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.002.
 58. Chenchen, Liu., Hongwei, Wang., Lin, Wang. (2024). Intelligent Technology Assessment of High-Speed Railway Based on Knowledge Graphs. Advances in Engineering Technology Research, doi: 10.56028/aetr.9.1.396.2024.
 59. Nisha, Prasad., Shailendra, Jain. (2024). Intelligent Technologies in High-Speed Rail Transit Systems. Energy, Environment, and Sustainability, 217-249. doi: 10.1007/978-981-97-0515-3_10.
 60. Xue, Yang., Huan, Wang., Lijuan, Li. (2023). Train operation scheduling optimization based on deep reinforcement learning. 2558 doi: 10.1088/1742-6596/2558/1/012042.
 61. Min, Zhou., Xuan, Liu., Zhuopu, Hou., Jingfan, Shang., Yixiang, Yue., Haifeng, Song. (2020). Integrated Optimization of Dispatching Decision and Speed Trajectory for High-Speed Railway Under Disturbances *. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327211.

62. Rongsheng, Wang., Zhiming, Yuan., Shuxin, Ding. (2023). A train timetable rescheduling approach based on multi-train tracking optimization of high-speed railways. *Railway Sciences*, doi: 10.1108/rs-05-2023-0022.
 63. Feng, Li., Gao, Ziyou., Chen, Xiaojing., Wu, Jianjun., Jia, Bin. (2019). Method for avoiding deadlock state of train operation and global optimization control method of train operation.
 64. Сравнительная оценка параметров движения поездов для различных вариантов виртуальной сцепки / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, В. И. Кузнецов, С. С. Тихонов // *Мир транспорта*. – 2023. – Т. 21, № 4(107). – С. 30-39. – DOI 10.30932/1992-3252-2023-21-4-4. – EDN NSJDAX.
 65. «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне: достигнутые эффекты и направления развития / А. И. Долгий, А. Г. Сахаров, М. А. Дежков [и др.] // *Транспорт Российской Федерации*. – 2023. – № 5-6(108-109). – С. 15-19. – EDN SMARKE.
 66. Охотников, А. Л. Виртуальная сцепка как элемент интервального регулирования движения поездов / А. Л. Охотников // *Наука и технологии железных дорог*. – 2024. – Т. 8, № 2(30). – С. 42-47. – EDN FWAUVY.
 67. Никаноров С. П., Никитина Н. К., Теслинов А. Г. Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур. – М.: РВСН, 1995. – 234 с. Электронный ресурс. URL: <https://www.teslinov.ru/wp-content/uploads/2020/01/Conceptualnoe-proektirovanie.pdf> (дата обращения: 16.01.2025).
 68. Кучкаров З.А. Методы концептуального анализа и синтеза в теоретическом исследовании и проектировании социально-экономических систем – М.: Концепт, 2006. ч.1 (276 с), ч. 2 (268 с).
-