

Сетевой научно-практический журнал
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ
ТРАНСПОРТ**

№2 (38)
июль 2026



СТРАТЕГИЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ
ОТРАСЛИ

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ
ПЕРЕВОЗОК

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СПУТНИКОВЫЕ
СИСТЕМЫ НА ТРАНСПОРТЕ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Издается с 2017 года

Издатель:



АО «НИИАС»

Адрес редакции:

Россия, г. Москва, Орликов переулок,
д.5, стр.1

Email: journal@vniias.ru

Телефон: +7 (495) 967-77-01

Сайт: <http://www.intelligent-transport.ru/>

Зарегистрирован в Федеральной службе
по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство о регистрации
Эл № ФС77-91565 от 6 мая 2026 г.

Журнал включен в базу данных
Российского индекса научного
цитирования (РИНЦ)

Сетевой научно-практический журнал
«Интеллектуальный транспорт» публикует
основные научные результаты соискателей
учёной степени кандидата и доктора
наук по следующим специальностям
и соответствующим им отраслям науки:

- 1.2.1. Искусственный интеллект
и машинное обучение
(технические науки)
- 2.9.1. Транспортные и транспортно-
технологические системы страны,
ее регионов и городов, организация
производства на транспорте
(технические науки)
- 2.9.4. Управление процессами перевозок
(технические науки)
- 2.9.8. Интеллектуальные транспортные
системы (технические науки)

Полная или частичная перепечатка,
сканирование любого материала текущего
номера возможны только с письменного
разрешения редакции.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Суханов Андрей Валерьевич

к.т.н., доцент, главный эксперт Департамента
научных исследований, аналитики
и совершенствования научно-технической
деятельности АО «НИИАС»

Член Российской ассоциации
искусственного интеллекта

Эксперт комиссии по вопросам
научно-технологического развития
и образования Общественного совета
при Минтрансе России

Алиев Вугар Амирович

д.ф.-м.н., профессор,
главный научный сотрудник Института физики,
Генеральный директор AMIR Technical Services
Company, Республика Азербайджан

Бочков Константин Афанасьевич

д.т.н., профессор «БелГУТ»,
Республика Беларусь

Бутакова Мария Александровна

д.т.н., профессор, профессор РГУПС

Гришаев Сергей Юрьевич

к.т.н., заместитель Генерального директора –
директор Ростовского филиала АО «НИИАС»

Зуев Александр Валерьевич

д.т.н., доцент, начальник управления
организационной и экспертной деятельности –
заместитель главного ученого секретаря
ДВО РАН, ДВО РАН, заведующий
лабораторией аэрокосмических
и морских робототехнических комплексов
ИАПУ ДВО РАН

Ковалев Сергей Михайлович

д.т.н., профессор, научный руководитель
Ростовского филиала АО «НИИАС»

Котенко Алексей Геннадьевич

д.т.н., профессор, главный научный сотрудник
АО «ВНИИЖТ»

Матюхин Владимир Георгиевич

д.т.н., председатель Экспертного совета
АО «НИИАС»

Пазойский Юрий Ошарович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
«Железнодорожные станции
и транспортные узлы», РУТ (МИИТ)

Попов Павел Александрович

к.т.н. заместитель директора
Научно-исследовательского
института транспорта РУТ (МИИТ)

Соколов Сергей Викторович

д.т.н., профессор, профессор РГУПС,
главный научный сотрудник АО «НИИАС»

Хатламаджиян Агоп Ервандович

к.т.н., доцент, заместитель
Генерального директора АО «НИИАС»

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Розенберг Ефим Наумович

д.т.н., профессор, первый заместитель
Генерального директора АО «НИИАС»

Ответственный секретарь

Соловьева Юлия Геннадьевна

Главный специалист Департамента
корпоративных коммуникаций АО «НИИАС»

Выпускающий редактор

Левшина Анна Андреевна

Специалист 1 категории Департамента
научных исследований, аналитики
и совершенствования научно-технической
деятельности АО «НИИАС»

Бородин Андрей Федорович

д.т.н., профессор, начальник отдела
АО «ИЭРТ»

Броневиц Андрей Георгиевич

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник
АО «НИИАС»

Грибова Валерия Викторовна

чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор,
заместитель директора по научной работе
ДВО РАН

Гуров Юрий Владимирович

к.т.н., начальник ОСКиДИ
Ростовского филиала АО «НИИАС»

Коваленко Николай Иванович

д.т.н., профессор РУТ (МИИТ)

Ли Инь

к.ф.-м.н.,
доцент Харбинского технологического
института, КНР

Ольгейзер Иван Александрович

к.т.н., доцент, заместитель начальника
опытно-конструкторского бюро АО «НИИАС»

Папич Любиша

д.т.н., профессор,
директор Исследовательского центра DQM,
Республика Сербия

Сабанов Алексей Геннадьевич

д.т.н., доцент, главный эксперт НТК ТИО

Хабаров Валерий Иванович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
СГУПС

Чжан Дачжи

Профессор Харбинского технологического
института, КНР

Шубинский Игорь Борисович

д.т.н., профессор, главный эксперт
АО «НИИАС», заместитель генерального
директора ООО «ИБ Транс»

Яковлев Константин Сергеевич

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ФИЦ
ИУ РАН

Шабалин Николай Григорьевич

д.т.н., профессор, научный руководитель
АО «НИИАС»

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

А.И. Долгий, А.В. Вуколов, А.А. Никонюк

Интеллектуальная маршрутизация транзита: методология цифрового раскрытия потенциала железнодорожных станций 4

Н.И. Камшилин, А.Г. Котенко

Организация комбинированных перевозок контейнерных грузов в условиях инфраструктурных ограничений 13

СТРАТЕГИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

М.В. Жабриков, Р.Д. Давыдов, Г.Д. Ахмадов

Этапы развития и трансформации структуры интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования 23

Е.А. Сотников

Перспективы технико-технологического развития российских железных дорог 42

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ НА ТРАНСПОРТЕ

Е.А. Кузнецов, И.В. Решетникова

Адаптивный алгоритм обработки инерциальных измерений для высокоточных навигационных систем беспилотных объектов 58

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

А.А. Свистельников, П.В. Малихина, Н.Ю. Торопов

Метрики достоверности выявления дорожных инцидентов подсистемой выявления инцидентов на основе технологии компьютерного зрения 71

Р.Д. Давыдов, Г.Д. Ахмадов, М.В. Жабриков

Методический подход к организации регулярного мониторинга элементов интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования 92

УДК 656.2

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-4-12

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ ТРАНЗИТА: МЕТОДОЛОГИЯ ЦИФРОВОГО РАСКРЫТИЯ ПОТЕНЦИАЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Долгий А.И.^{1,1}, Вуколов А.В.^{1,2}, Никонюк А.А.^{1,3}

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия.

E-mail: ¹ a.dolgiy@vniias.ru, ² a.vukolov@vniias.ru, ³ a.nikonyuk@vniias.ru

Аннотация. Стратегическое развитие ОАО «РЖД» неразрывно связано с внедрением роботизированных комплексов и интеллектуальных систем управления. В статье обосновывается необходимость перехода от традиционных, зачастую реактивных, методов управления к сквозной цифровой методологии, охватывающей как работу сортировочных станций, так и полигона в целом. Предлагаемый подход фокусируется на использовании «окон возможностей», позволяющих формировать дальние сквозные и двухгруппные поезда, минуя излишние переработки. Это способно кардинально снизить эксплуатационные издержки, сократить оборот вагона и высвободить значительные внутренние резервы сети. Ключевым инструментом реализации становится интеграция систем искусственного интеллекта и анализа больших данных для прогнозного управления и достижения синергии между цифровыми станциями и полигоном управления. Предлагаемый подход обеспечит увеличение доли сквозных поездов собственного формирования, следующих в дальнем сообщении без переработки на попутных сортировочных станциях. Это позволит сохранить эффект от внедрения интеллектуальных алгоритмов поездообразования в рамках системы «Цифровая железнодорожная станция». В свою очередь оптимизация маршрутов вагонопотоков в масштабах полигонов сети железных дорог на всем протяжении перевозки способствует сокращению накладных расходов и минимизации потерь в соотношении эксплуатационного и тарифного грузооборота.

Ключевые слова: цифровая железнодорожная станция (ЦЖС), «окна возможностей», адаптивное планирование, сквозные поезда, интеллектуальное поездообразование, оптимизация вагонопотоков, большие данные, искусственный интеллект, эксплуатационная эффективность, полигонное управление.

Для цитирования:

Долгий А.И., Вуколов А.В., Никонюк А.А. Интеллектуальная маршрутизация транзита: методология цифрового раскрытия потенциала железнодорожных станций. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 4–12. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-4-12.

Введение: вызовы новой логистической реальности

Существующая организация перевозочного процесса на сети российских железных дорог исторически базируется на: графике движения, техническом нормировании и плане формирования поездов [1]. Эта система, эффективная в условиях плановой экономики и инвентарного парка вагонов, столкнулась с фундаментальными вызовами после реформирования отрасли. Переход парка грузовых вагонов в собственность множества частных операторов (свыше 1800 компаний) привел к утрате централизованного регулирования порожних пробегов. В результате возникли системные технологические разрывы: резко возросло количество повторных переработок вагонов на попутных станциях, увеличился коэффициент разрыва между эксплуатационным и тарифным грузооборотом, вырос средний оборот вагона.

Современные условия работы железных дорог России характеризуются необходимостью преодоления ряда новых вызовов, наиболее значимыми из которых являются изменение конфигурации и структуры грузопотоков, проблемы технического и инфраструктурного развития и обеспечения новых потребностей в перевозках [2].

Новая структура логистических цепочек, характеризующаяся фрагментарностью и большим числом назначений, оказала экстремальное давление на опорные сортировочные станции. Это выразилось в росте углового вагонопотока, перегрузке сортировочных горок, дефиците тяговых ресурсов и, как следствие, в увеличении числа «отставленных» поездов [3]. Сеть, образно говоря, начала «перемещать больше, чем зарабатывать». Устаревшие информационные системы, не рассчитанные на обработку больших массивов данных в реальном времени, не могут адекватно реагировать на эти вызовы, предлагая лишь ретроспективный анализ. Такая модель управления, будучи изначально обоснованной в условиях функционирования инвентарного парка грузовых вагонов, устойчивых месячных грузопотоков и централизованного регулирования порожнего подвижного состава, с течением времени утратили свою эффективность и превратилась в системный источник технологических разрывов ¹. Требуется принципиально новый, цифровой и проактивный подход к управлению способный к оперативной адаптации под динамически изменяющиеся параметры грузовой базы, обеспечивающей прослеживаемость вагонопотоков и переход от реактивного устранения сбоев к прогнозному управлению в режиме реального времени.

1. Концептуальные основы цифрового подхода: от реактивного к прогнозному управлению

Суть предлагаемой цифровой трансформации заключается в переходе от управления изолированными участками (станциями, диспетчерскими участками) к сквозному, интегрированному управлению перевозочным процессом на основе единой цифровой модели. Этот подход основан на двух взаимосвязанных принципах:

¹ Концепция ПУПП. // Аналитический отчет 2022.

1. **Интеллектуальное поездообразование на станциях (Цифровая железнодорожная станция – ЦЖС):** автоматизация процессов планирования и исполнения операций, исключая «человеческий фактор» как источник задержек и неоптимальных решений [4].
2. **Цифровое регулирование движения на полигонах:** синхронизация движения поездов, сформированных ЦЖС, для минимизации простоев и обеспечения беспрепятственного продвижения до следующего узла переработки.

Синхронная работа этих двух компонентов создает синергетический эффект, позволяющий замкнуть контур управления «станция – полигон» в единую саморегулируемую систему, где качество формирования поездов на выходе из ЦЖС напрямую определяет условия их проследования по участку, а сетевые ограничения в реальном времени транслируются в корректировку станционных алгоритмов работы. Однако его достижение невозможно без ключевого инновационного элемента – технологии выявления и использования «окон возможностей».

Введём определение «Окна возможностей». Под «окном возможностей» понимается уникальная временно-пространственная конфигурация ресурсов на станции: наличие на путях и в подходе критического количества вагонов нужных назначений, свободные мощности сортировочного парка, доступность локомотивов и бригад [5]. При совпадении этих факторов появляется возможность сформировать поезд дальнего (сквозного) или двухгруппного назначения, не предусмотренный жестким планом формирования.

В традиционной, «человекозависимой» системе такие возможности зачастую упускаются из-за недостижимости оперативного анализа огромного объема данных и согласования интересов с соседними станциями. Вагоны отправляются разрозненными группами, что на следующей технической станции неминуемо ведет к дополнительной переработке на горке. Запускается цепная реакция задержек и избыточных операций по всему маршруту следования.

Цифровая станция, оснащенная алгоритмами искусственного интеллекта для анализа больших данных [6, 7], способна в реальном времени идентифицировать эти «окна» и инициировать оптимальное решение. Эффект от использования одного такого «окна» каскадно распространяется по всему маршруту следования.

Анализ данных за март 2025 года по направлению от станции Челябинск-Главный к станции Кинель (рисунок 1) наглядно демонстрирует потенциал метода. Исследование показало, что лишь 14% вагонов, отправленных со станции Челябинск-Главный, следовали назначением непосредственно на Куйбышевскую дорогу, а 86% требовали переформирования на попутных станциях. При этом минимум 65% этого вагонопотока (назначением на Юго-Восточную, Северо-Кавказскую и Приволжскую дороги) представляли собой потенциал для маршрутизации в «окнах возможностей».

Моделирование на основе ретроспективных данных выявило, что ежегодно существовала возможность отправлять со станции Челябинск-Главный дополнительные сквозные и двухгруппные поезда на ключевые станции Лиски и Кочетовка. Годовой экономический эффект только от сокращения переработок на станции Кинель для этого вагонопотока мог составить около 3,6 млн рублей. С учетом исключения переработок на других попутных станциях (Сызрань I, Пенза III) суммарный эффект для данного направления возрастал до 6,15 млн рублей в год.



Рис. 1: Анализ перестроения поездов на попутной технической станции

Расчеты, экстраполированные на сеть из 24 крупнейших сортировочных станций, показывают, что прямой эффект от снижения количества переработок вагонов может достичь 234,24 млн рублей ежегодно [8].

2. Сопутствующие эффекты и синергия

Прямая экономия от сокращения переработок – лишь вершина айсберга. Использование «окон возможностей» генерирует значительные дополнительные выгоды:

1. **Сокращение остановок поездов.** Экономия на расходной ставке за каждую исключенную остановку.
2. **Оптимизация использования тяги и бригад.** Сокращение простоев поездов на станционных путях и времени захода локомотивных бригад в депо.
3. **Рост маршрутной скорости и сокращение оборота вагона.** Каждая пропущенная переработка экономит до 10 часов, что ускоряет доставку и высвобождает вагонный парк.
4. **Повышение надежности сроков доставки.** Снижает риски штрафов за просрочку [9].

Суммарный дополнительный сетевой эффект от этих факторов оценивается еще в 142,73 млн рублей в год. Таким образом, общий прогнозируемый годовой экономический потенциал от внедрения методологии «окон возможностей» превышает 376 млн рублей.

Более того, системное применение подхода может позволить:

- сократить избыточную переработку на горках до 1 млн вагонов ежегодно;
- высвободить из оборота эквивалент до 100 тысяч единиц порожнего парка;

- увеличить среднюю дальность проследования вагона между переработками с 1000 км до 1100-1150 км.

3. Системные выводы

Переход к новой методологии требует не просто автоматизации существующих процессов, а концептуального пересмотра принципов управления. Необходимо движение от локальной максимизации показателей отдельной станции («отправь быстрее и больше») к глобальной оптимизации опорной сети цифровых станций и полигонов («точнее и дешевле» для всей системы) [10].

Повышение операционной эффективности достигается посредством реализации следующих факторов:

- минимизация внутрисетевой повторной переработки вагонопотоков за счёт исключения избыточных сортировок;
- сокращение числа технических остановок маршрутных отправок в транзитном следовании;
- рационализация занятости локомотивного парка и времени работы локомотивных бригад путём устранения межоперационных простоев;
- ускорение оборота вагонов как интегрального показателя качества полигонных технологий;
- обеспечение гарантированной точности доставки грузов к нормативному сроку прибытия.

В целом повышение эффективности возможно за счет:

- снижения числа повторных переработок вагонов;
- сокращения количества остановок для прямых поездов;
- оптимизации времени использования локомотивов и локомотивных бригад;
- сокращения времени оборота вагона;
- повышения надежности срока доставки на станцию назначения.

Технологически это означает развитие полигонных систем управления, основанных на сквозном динамическом построении адаптивного плана формирования. За основу может быть взята существующая Автоматизированная система организации вагонопотоков (АС ОВ), усиленная цифровыми инструментами и искусственным интеллектом. Эти инструменты должны в режиме реального времени анализировать ситуацию с глубиной горизонта планирования 12-18 часов, выявлять «окна возможностей» и давать рекомендации по адаптивной корректировке планов на полигонном и центральном уровнях [11].

Особую перспективу представляют двухгруппные поезда. Они требуют меньше времени накопления, чем сквозные, а их обработка на попутной станции может производиться в транзитном парке, минуя сортировочную горку, что значительно снижает операционную нагрузку на узлы.



Рис. 2: Реализация задач планирования и рационального продвижения вагонопотоков на опорной сети цифровых железнодорожных станций

На рис. 2 представлен один из вариантов перспективной модели, которую можно реализовать, не только изменив подходы к формированию показателей работы станций, но и решить проблему рационального продвижения вагонопотоков и организации оптимального перевозочного процесса на полигонах железных дорог, в том числе с применением технологии искусственного интеллекта.

Предложенная цифровая методология, центрированная вокруг прогнозного использования «окон возможностей», представляет собой качественный скачок в управлении перевозочным процессом. Она не отменяет, а обогащает существующую нормативную базу, переводя ее в адаптивную, динамическую плоскость. Внедрение предложенного подхода позволит ОАО «РЖД» не только решить накопившиеся системные проблемы, но и создать фундамент для устойчивого развития в условиях высокой волатильности рынка и растущих требований к логистике. Формирование опорной сети цифровых железнодорожных станций знаменует собой переход к новому технологическому укладу в управлении перевозочным процессом. Успех зависит от комплексной интеграции технологий больших данных, искусственного интеллекта и роботизации в единый контур управления, где цифровая станция и интеллектуальный полигон работают как звенья одной цепи, преследуя общую цель – минимизацию совокупной стоимости перевозки. Таким образом, синергия интеллектуального планирования на уровне опорной сети и точного исполнения на цифровых станциях создает предпосылки для перехода к качественно новому уровню эффективности железнодорожных перевозок, основанному на адаптивности, точности и экономической целесообразности.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку математического и алгоритмического обеспечения представленной модели, а также на вопросы интеграции существующих и перспективных автоматизированных систем в единый интеллектуальный контур управления.

Список литературы

- [1] Солоп И. А., Солоп С. А., Чеботарева Е. А. Новые сквозные цифровые технологии организации перевозочного процесса // Научный взгляд в будущее. – 2018. – Т. 2. – №. 9. – С. 30-39.
- [2] Бородин А.Ф., Николаев К.Ю., Шиндеров Р.В., Прозоров В.В. Организация вагонопотоков: условия, ограничения, цифровые решения // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 6. – С. 11-19.
- [3] Шайков С. В. Системный подход в организации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2007. – №. 3. – С. 177-180.
- [4] Андреев В.Е., Долгий А.И., Кудюкин В.В. [и др.] Цифровая железнодорожная станция – от концепции к реальному внедрению. // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 2-6.
- [5] Шенфельд К.П. О показателях качества организации перевозочного процесса. // «Железнодорожный транспорт». – 2011. – №. 3. – С. 64-67
- [6] Пузеренко А.В., Максимов К.Ю., Боровлев П.В., Суханов А.В. Использование концепции «Ошибочного» класса для повышения качества распознавания номеров железнодорожных подвижных единиц // Интеллектуальный транспорт. – 2025. – Т. 9, № 1(33). – С. 27-32.
- [7] Бушуев С.В., Костров А.А., Ольгейзер И.А. Цифровая железнодорожная станция: пример формализации алгоритма приема грузового поезда // Интеллектуальный транспорт. – 2025. – Т. 9, № 3(35). – С. 77-85.
- [8] Долгий А.И., Вуколов А.В., Никонюк А.А. Цифровой подход к созданию новой методологии управления перевозочным процессом // Принята к публикации Транспорт Российской Федерации. – 2026. – № 6.
- [9] Фролов В.Ф. Новые подходы к управлению перевозочным процессом. // Железнодорожный транспорт. – 2014. – №. 4. – С. 14-18.
- [10] Хатламаджиян А. Е., Яицков И. А., Степин И. А. Применение современных цифровых технологий и технических средств для повышения безопасности и эффективности перевозочного процесса подвижного состава // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №. 1. – С. 107-110.
- [11] Луцкая М.И., Эрлих Н.В. Роль цифровой трансформации в перевозочном процессе. // Наука и образование: достижения и перспективы : Материалы VIII Международной научно-практической конференции, Саратов, 21 декабря 2023 года. – Самара – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит». – 2023. – С. 297-302.

INTELLIGENT TRANSIT ROUTING: A DIGITAL METHODOLOGY FOR UNLOCKING THE POTENTIAL OF RAILWAY STATIONS

Dolgiy A. I.^{1,1}, Vukolov A. V.^{1,2}, Nikonyuk A. A.^{1,3}

¹ Joint Stock Company «Research and Design Institute for Informatization, Automation and Communication in Railway Transport» (JSC «NIIAS»), Moscow, Russia.

E-mail: ¹ a.dolgiy@vniias.ru, ² a.vukolov@vniias.ru, ³ a.nikonyuk@vniias.ru

Abstract. The strategic development of Russian Railways (JSCo «RZD») is inextricably linked with the introduction of robotic complexes and intelligent control systems. The article substantiates the need for a transition from traditional, often reactive, management methods to an end-to-end digital methodology covering both the operation of marshalling yards and the polygon as a whole. The proposed approach focuses on the use of «windows of opportunity», which make it possible to form long-distance through and two-group trains, bypassing unnecessary reprocessing. This can radically reduce operating costs, shorten wagon turnover, and release significant internal reserves of the network. The key tool for implementation is the integration of artificial intelligence systems and big data analytics for predictive management and achieving synergy between digital stations and the control polygon. The proposed approach will ensure an increase in the share of self-formed through trains operating in long-distance service without reprocessing at intermediate marshalling yards. This will preserve the effect of the introduction of intelligent train formation algorithms within the «Digital Railway Station» system. In turn, the optimization of wagon flow routes across the railway network polygons throughout the entire transportation route helps to reduce overhead costs and minimize losses in the ratio of operational and tariff freight turnover.

Keywords: *digital railway station (DRS), «windows of opportunity», adaptive planning, through trains, intelligent train formation, wagon flow optimization, big data, artificial intelligence, operational efficiency, polygon-based management.*

References

- [1] Solop I.A., Solop S.A., Chebotareva E.A. Novyye skvoznyye tsifrovyye tekhnologii organizatsii transportnogo protsessa (New end-to-end digital technologies for organizing the transportation process). Nauchnyy vzglyad v budushcheye (A Scientific Look into the Future), 2018, no. 2(9), pp. 30-39. (in Russian)
- [2] Borodin A.F., Nikolaev K.Yu., Shinderov R.V., Prozorov V.V. Borodin A.F., Nikolaev K.Yu., Shinderov R.V., Prozorov V.V. Organizatsiya vagonopotokov: usloviya, ogranicheniya, tsifrovyye resheniya (Organization of Railcar Flows: Conditions, Constraints, and Digital Solutions). Zheleznodorozhnyy transport (Railway transport), 2026, no. 6, pp. 11-19. (in Russian)
- [3] Shaikov S.V. Shaikov S.V. Sistemnyy podkhod v organizatsii perevoznogo protsessa na zheleznodorozhnom transporte. (System Approach in the Organization of the Transportation Process in Railway Transport). Vestnik IzhGTU (Bulletin of IzhSTU), 2007, no. 3, pp. 177-180 (in Russian)

For citation:

Dolgiy A. I., Vukolov A. V., Nikonyuk A. A. Intelligent Transit Routing: A Digital Methodology for Unlocking the Potential of Railway Stations. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 4-12. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-4-12. (in Russian)

- [4] Andreev V.E., Dolgiy A.I., Kudyukin V.V. [et al.] Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya – ot kontseptsii k realnomu vnedreniyu (Digital railway station – from concept to real implementation). *Avtomatika, svyaz, informatika* (Automation, communication, informatics), 2023, no. 9, pp. 2-6. (in Russian)
- [5] Shenfeld K.P. Shenfeld K.P. O pokazatelyakh kachestva organizatsii perevozochnogo protsessa (On indicators of the quality of organization of the transportation process). *Zheleznodorozhnyy transport* (Railway transport), 2011, no. 3, pp. 64–67. (in Russian)
- [6] Puzerenko A.V., Maksimov K.Yu., Borovlev P.V., Sukhanov A.V. Puzerenko A.V., Maksimov K.Yu., Borovlev P.V., Sukhanov A.V. Ispolzovaniye kontseptsii «Oshibochnogo» klassa dlya povysheniya kachestva raspoznavaniya nomerov zheleznodorozhnykh podvizhnykh yedinit (Using the concept of an «erroneous» class to improve the quality of recognition of railway rolling stock numbers). *Intellektualnyy transport* (Intelligent transport), 2025, vol. 9, no. 1(33), pp. 27-32. (in Russian)
- [7] Bushuev S.V., Kostrov A.A., Olgeyzer I.A. Bushuev S.V., Kostrov A.A., Olgeyzer I.A. Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya: primer formalizatsii algoritma priyema gruzovogo poyezda (Digital railway station: an example of formalizing the algorithm for receiving a freight train). *Intellektualnyy transport* (Intelligent transport), 2025, vol. 9, no. 3(35), pp. 77-85. (in Russian)
- [8] Dolgiy A.I., Vukolov A.V., Nikonyuk A.A. Dolgiy A.I., Vukolov A.V., Nikonyuk A.A. Tsifrovoy podkhod k sozdaniyu novoy metodologii upravleniya perevozochnym protsessom (Digital approach to creating a new methodology for managing the transportation process). Accepted in: *Transport Rossiyskoy Federatsii* (Transport of the Russian Federation), 2026, no. 6. (in Russian)
- [9] Frolov V.F. Frolov V.F. Novyye podkhody k upravleniyu perevozochnym protsessom (New approaches to managing the transportation process). *Zheleznodorozhnyy transport* (Railway transport), 2014, no. 4, pp. 14-18. (in Russian)
- [10] Khatlamadzhyan A.E., Yaitskov I.A., Stepin I.A. Khatlamadzhyan A.E., Yaitskov I.A., Stepin I.A. Prime-neniye sovremennykh tsifrovyykh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv dlya povysheniya bezopasnosti i effektivnosti perevozochnogo protsessa podvizhnogo sostava (Application of modern digital technologies and technical means to improve the safety and efficiency of the rolling stock transportation process). *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* (Proceedings of the Rostov State Transport University), 2020, no. 1, pp. 107-110. (in Russian)
- [11] Lutsкая M.I., Erlikh N.V. Lutsкая M.I., Erlikh N.V. Rol tsifrovoy transformatsii v perevozochnom protsesse (The role of digital transformation in the transportation process). *Nauka i obrazovaniye: dos-tizheniya i perspektivy: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Saratov, 21 dekabrya 2023 goda (Science and education: achievements and prospects: Proceedings of the VIII International scientific-practical conference, Saratov, December 21, 2023). Samara-Saratov: Amirit LLC, 2023, pp. 297-302. (in Russian)

УДК 656.2

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-13-22

ОРГАНИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПЕРЕВОЗОК КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Камшилин Н.И.^{1,1}, Котенко А.Г.^{2,2}

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, Россия.

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: ¹ kamshilin.nikita@vniizht.ru, ² kotenko@pgups.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения своевременности доставки контейнерных грузов в условиях инфраструктурных ограничений на сети ОАО «РЖД». Предложен системный подход к организации комбинированных железнодорожно-автомобильных перевозок с динамической переадресацией и перегрузкой грузов в пути следования для обхода загруженных участков инфраструктуры. На основе формализации маршрутной сети в виде взвешенного графа и использования алгоритмов поиска оптимальных маршрутов (Прима, Флойда-Уоршелла) разработана модель выбора рационального способа доставки, минимизирующего общее время доставки и издержки. Особое внимание уделено условиям принятия решений о перегрузе до входа на лимитирующий участок, что позволяет избежать простоев и обеспечить выполнение обязательств «точно в срок». Для практической реализации модели обозначены основные категории данных, необходимых для построения адекватной информационной основы.

Ключевые слова: инфраструктурные ограничения, рациональный способ доставки, комбинированные железнодорожно-автомобильные перевозки.

Введение

Объем перевозок контейнеров по сети РЖД растет со скоростью почти 6% в год и на сегодня достиг размеров порядка 8 миллионов штук в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ). При этом к 2030 году планируется увеличение контейнерных перевозок по железной дороге до 10 миллионов ДФЭ¹. Вместе с тем остаются острыми вопросы соблюдения сроков доставки контейнерных грузов в железнодорожном сообщении, связанные с точным выполнением расписаний движения контейнерных поездов в условиях действия различных, в частности, инфраструктурных ограничений. Такие ограничения зачастую становятся причинами задержек поездов в пути следования и, как следствие, возникновения ситуаций сдерживания приема груза к перевозке на лимитирующих железнодорожных направлениях, оттока высокодоходных грузов на автомобильный и авиационный транспорт [1].

Для цитирования:

Камшилин Н.И., Котенко А.Г. Организация комбинированных перевозок контейнерных грузов в условиях инфраструктурных ограничений. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 13–22. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-13-22.

¹[Электронный ресурс] URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=220838&ysclid=m7d79pu9ld59443018> (дата обращения: 19.02.2026)

В этой связи возникает необходимость в таких технологических решениях по доставке грузов в контейнерах, которые, снижая негативное влияние инфраструктурных ограничений, позволили бы устранить проблему задержек и нарушения сроков доставки контейнеров прежде всего с критически срочными грузами, а также исключить ситуации несвоевременного приема контейнерных грузов к перевозке железнодорожным транспортом.

Одним из возможных подходов к решению проблемы является организация комбинированных перевозок с переадресовкой груза в пути следования для объезда лимитирующих участков железнодорожной инфраструктуры. При этом возможны различные варианты комбинированной перевозки: использование автотранспорта на промежуточных участках маршрута с последующей повторной перегрузкой на железную дорогу; доставка автотранспортом на конечном отрезке маршрута, маршрутом, параллельном заявленному, без повторной перегрузки; смена маршрута на промежуточных участках с использованием поездов попутного следования с последующим возвратом на первоначальный маршрут автотранспортом [2].

Главной задачей в этом случае становится разработка рационального варианта организации комбинированной перевозки, основанного на анализе ограничений пропускной способности железнодорожных участков и участков автотрасс, и оценке возможностей по переадресовке и перегрузке контейнера.

1. Предварительные условия формирования комбинированной перевозки

Можно рассмотреть достаточно типичную ситуацию, когда в рамках транзитного контейнерного коридора P_T на направлении $S_1 - S_4$ образуется лимитирующий участок $S_2 - S_3$, где находится станция S_3 , которая представляет собой «узкое место» при организации перевозок [3]. При этом обходу его в железнодорожном сообщении препятствует лимитирующий участок $S_5 - S_6$ со своими «узкими местами» и исчерпание провозной способности на участке $S_7 - S_3$ (рис. 1).

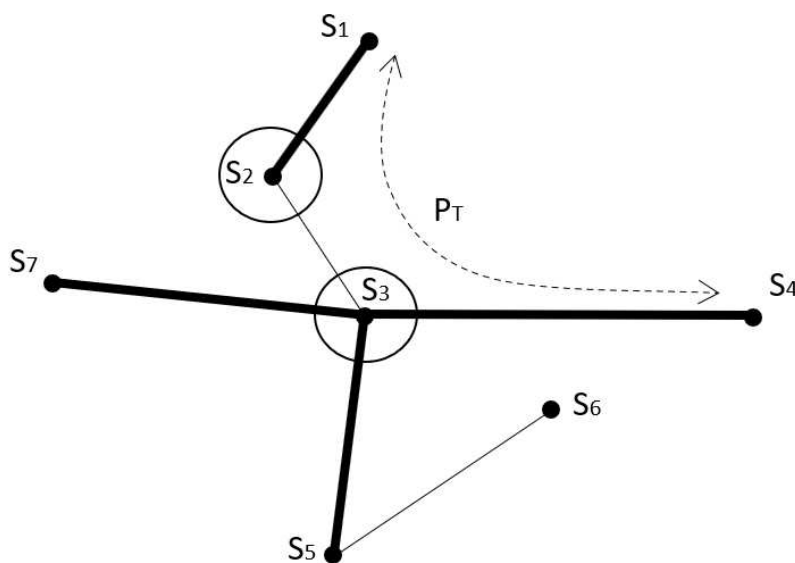


Рис. 1: Лимитирующие участки в рамках транзитного контейнерного коридора

Ограничивающим элементом пропускной способности станции S_3 выступает парк приёма-отправления станции, пропускная способность которого равняется примерно 30 грузовых поездов в направлении «туда» и приблизительно столько же – обратно, что существенно ниже требуемых размеров, поскольку превышение плановых объемов составляет около 20 пар поездов в сутки в грузовом движении при сохранении полного объёма пассажирских перевозок.

Дополнительную нагрузку на станцию оказывают технологические операции, связанные со стыкованием поездопотоков с электрифицированного и неэлектрифицированного направлений. Отсутствие электроснабжения на одном из подходов требует смены локомотивов, что приводит к увеличению времени обработки составов и созданию «бутылочного горлышка» в транзитном движении.

При этом, согласно действующим инвестиционным программам, развитие станции на ближайшее время не запланировано, что делает её критическим узлом на долгосрочную перспективу. Анализ прогнозных показателей показывает, что при сценарных объемах перевозок 150–160 млн тонн в год коэффициент заполнения пропускной способности достигнет 1,09–1,12, что свидетельствует о превышении наличных возможностей инфраструктуры.

Даже при достижении провозной способности направления в 120–130 млн тонн в год сохраняется высокий риск сбоев в графике движения, особенно в условиях пиковых нагрузок. Таким образом, участок $S_2 - S_3$, и, в частности, станция S_3 , демонстрирует устойчивую тенденцию к перегрузке, обусловленную инфраструктурными ограничениями.

Эти факторы создают предпосылки для системных задержек в продвижении поездов, и в том числе, контейнерных с высокодоходным грузом и обосновывают целесообразность применения альтернативных логистических решений, включая применение комбинированной железнодорожно-автомобильной перевозки с учетом рациональности ее организации.

2. Организация рациональной комбинированной перевозки

Задача организации рациональной комбинированной перевозки является многофакторной. Ее решение основывается применении механизмов переадресации и перегрузки контейнерного груза в пути следования, способных оперативно реагировать на изменения в загрузенности инфраструктуры и появление «узких мест» с целью обеспечить выполнение обязательств перед клиентами по доставке груза (рис. 2).

Согласно опыту, правильное сочетание переадресовки груза в контейнере с загруженной инфраструктуры и «бесшовной» перегрузки его между видами транспорта обеспечивает нужные условия для завершения перевозки в установленное время. При этом суммарные дополнительные затраты на необходимое изменение маршрутизации перевозки на промежуточных этапах оказываются ниже, чем полученный эффект от доставки груза «точно в срок» [2].

В этой связи может быть предложена формализация структуры маршрутной сети для моделирования задач комбинированных сообщений, где важными составляющими являются пропускные способности объектов железнодорожного и автомобильного видов транспорта, а также точки переадресации и перегрузки грузов на путях сообщения.

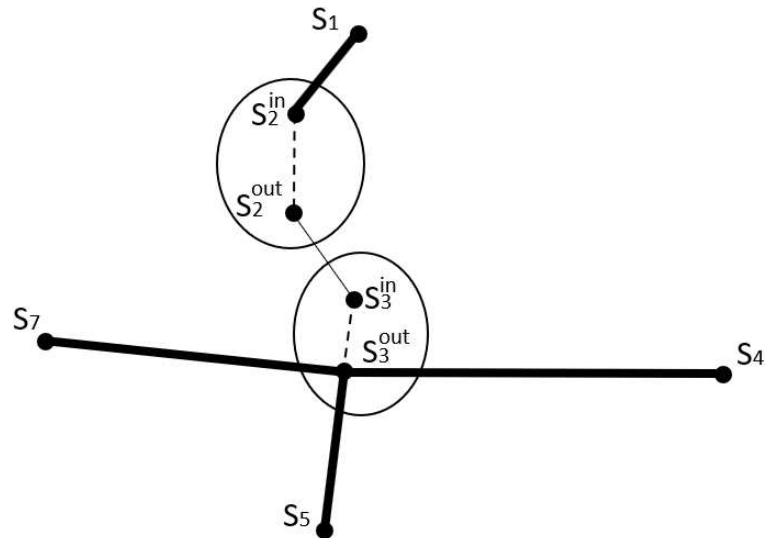


Рис. 2: Использование автотранспорта для обхода «узкого места» на участке $S_2 - S_3$ с двумя перегрузками $S_2^{in} - S_2^{out}$, $S_3^{in} - S_3^{out}$ и промежуточной переадресовкой груза

Практика моделирования показывает, что концептуальные графы, формируемые для описания комбинированной перевозки, должны быть значительно детализированы, чтобы отразить множество дополнительных параметров рассматриваемых объектов. Вместе с тем, базовая структура маршрутной сети достаточно проста:

$$M = \langle S, P \rangle, \quad (1)$$

где S – узлы (места, открытые для погрузочно-разгрузочных работ); P – ребра (пути сообщения: железные и автомобильные дороги).

Каждое ребро p ($p \in P$) характеризуется: T_p – временем перемещения транспортной единицы с установленной скоростью; N_p – наличной пропускной способностью; v_p – установленной маршрутной скоростью.

Множество узлов сети может быть представлено как

$$S = (S_i \cup S_i^a \cup S_i^{in/out}) \quad (2)$$

где S_i – железнодорожные станции; S_i^a – автомобильные терминалы; $S_i^{in/out}$ – железнодорожные станции, доступные для перегрузки (станции перегрузки).

Критериями выбора маршрута на сети являются, как требует практика организации перевозок, технико-экономические издержки [4]. Время доставки T_{total} является одним из наиболее важных и точно измеримых показателей качества перевозки, оказывающим существенное влияние на выбор [9].

При этом объективно, существуют две проблемы, серьезно усложняющие решение задачи организации рациональной комбинированной перевозки:

- во-первых, рациональная схема маршрута, как правило, не является кратчайшей, поскольку включает решения по обходам, а издержки на организацию такой схемы по сравнению с прямой доставкой могут существенно отличаться в большую сторону из-за необходимости учета дополнительных затрат в точках перегрузки, которые могут быть выражены как в деньгах, так и во времени; одним из критериев в этом случае может служить отношение пробега контейнеров по расчетной схеме маршрута к пробегу по кратчайшему маршруту

$$\alpha_{\text{конт}} = \frac{\sum n_{\text{прасч}}}{\sum n_{\text{кр}}};$$

- во-вторых, необходимо учитывать изменения в наборах данных с учетом требований, связанных с особенностями точек перегрузки: видами и типами транспортных и погрузо-разгрузочных средств, особенностей сообщений между терминалами и прочее (таблица 1).

В любом случае в основу организации комбинированной перевозки закладывается алгоритм поиска кратчайшего пути на графе, полученном из фрагментов железнодорожной сети. Такой алгоритм может использовать известные решения, такие как, например, алгоритм Прима, удобный для нахождения минимального остовного дерева графа по наименьшему весу подграфов, исходя из совместности условий $N_p \rightarrow \max$ и $T_p \rightarrow \min$, а, при появлении элементов сети, характеризующихся предельной загруженностью, алгоритм Флойда-Уоршелла – для последовательного изменения матрицы расстояний на основе оценки возможностей автодорог [5, 6].

Но, кроме того, такой алгоритм должен содержать эвристическую функцию оценки близости характеристик найденного маршрута оптимальным [7, 8].

При этом одним из условий рациональности перевозки становится положение точки перегрузки, которая, с одной стороны, должна находиться на кратчайшем расстоянии к «узкому месту», с другой стороны, отвечать требованиям по наличию погрузо-разгрузочных и транспортных средств, а также соответствовать ограничениям по пропускной способности.

Например, в обстановке высокой загруженности железнодорожного участка $S_i - S_j$, на подходе к «узкому месту» – станции C , особую значимость приобретает своевременное принятие решения по дальнейшему продвижению срочного контейнерного груза.

Одним из таких решений является организация перегрузки груза с железнодорожного на автомобильный транспорт в местах подхода к станции C , до входа на наиболее загруженный участок инфраструктуры. Такое решение позволяет не только снизить нагрузку на критически важный узел, но и гарантировать соблюдение сроков доставки, что особенно важно для высокоприоритетных грузов.

Исходя из технико-экономического анализа инфраструктуры участка в расчет вносится условие, что на подходе к станции C со стороны пункта S_i , существует техническая возможность, например, на промежуточной станции C' , расположенной на расстоянии нескольких километров от C , использовать существующую производственную площадку в качестве комбинированного перегрузочного узла. Перегрузка в этом случае может быть осуществлена до достижения поездом «узкого места», что исключает простой груза на станции C (рис. 3).

Таблица 1: Основные данные для организации комбинированной перевозки

Категория данных	Подкатегория	Поля данных
1. Точка перегрузки	1.1. Станция перегрузки	Код, наименование, пропускная способность
	1.2. Исполнитель перегрузки	ОКПО, ИНН, наименование
	1.3. Владелец инфраструктуры	ОКПО, ИНН, наименование
	1.4. Время нахождения до подачи	Время прибытия, время подачи к месту перегрузки
	1.5. Длительность перегрузки	Количество вагонов, варианты перегрузки, время подачи под выгрузку, время уборки после погрузки
	1.6. Перерабатывающая способность терминала в части перегрузки	Количество вагонов, варианты перегрузки, время
	1.7. Длина и вместимость путей для нахождения вагонов в ожидании перегрузки	Условные вагоны
	1.8. Длина и вместимость грузового фронта путей для перегрузки	Условные вагоны
	1.9. Емкость зоны хранения терминала перегрузки	ДФЭ
2. Точка переадресовки	2.1. Станция переадресовки	Код, наименование, пропускная способность, план формирования
3. Груз	3.1. Характеристики груза	Номенклатура, код груза, масса, объем, срок доставки, приоритет
	3.2. Маршрут груза	Идентификатор линии перевозок, начальная и конечная точки, регулярность использования, объекты
4. Данные о загруженности	4.1. Загруженность ж.д. направления	Код перегона / станции, степень текущей и прогнозируемой загруженности
	4.2. Загруженность автотрассы	Идентификатор участка, степень текущей и прогнозируемой загруженности
5. Данные по финансовым издержкам	5.1. Стоимость перевозок	Стоимость ж.д. перевозки / автоперевозки, стоимость перегрузки / переадресовки
	5.2. Штрафы	Штрафы за просрочку доставки, штрафы за простои

В общем случае для организации комбинированной перевозки контейнерного груза вычисляется маршрут с учётом T_p , N_p , v_p . Если $N_p < \text{порог}$, груз перенаправляется на автотранспорт [5, 6]. В основе модели рационального выбора способа доставки лежит формула

$$T_{total} = \sum_{\text{жд}} \frac{p_{ij}}{v_{\text{жд}}} \cdot x_{ij}^{\text{жд}} + \sum_{\text{авто}} \frac{p_{kl}}{v_{\text{авто}}} \cdot x_{kl}^{\text{авто}} + \sum t_{\text{переадрес}} + \sum t_{\text{перегруз}} \cdot y_m \quad (3)$$

где T_{total} – общее время доставки от начальной до конечной точки; p_{ij} – расстояние между узлами i и j по железной дороге; $V_{жд}$ – маршрутная скорость движения по железной дороге; $\sum_{жд}$ – общее время, затраченное на перемещение по всем железнодорожным участкам маршрута; p_{kl} – расстояние между узлами по автодороге; $V_{авто}$ – средняя скорость движения по автодорогам; $x_{ij}^{жд} \in \{0, 1\}$ – бинарная переменная 1, если груз перемещается по железной дороге (i, j) ; $x_{kl}^{авто}$ – бинарная переменная 1, если груз перемещается по автодороге (k, l) ; y_m – бинарная переменная 1, если перегрузка происходит в узле m ; $\sum_{авто}$ – общее время, затраченное на перемещение по всем автомобильным участкам маршрута; $\sum t_{переедрес}$ – время, затрачиваемое на одну переадресовку от станции начала переадресовки до станции окончания переадресовки; $\sum t_{переегруз}$ – время, затрачиваемое на одну перегрузку груза между видами транспорта.

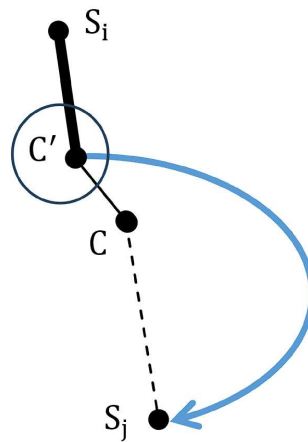


Рис. 3: Перегрузка на подходе к «узкому месту» участка $S_i - S_j$ (станции C) с использованием для перегрузки возможностей на ближайшей станции C'

Одним из основных ограничений становится доступность точек перегрузки, когда контейнер может быть перегружен между видами транспорта только в узле $B_{переегруз}$

$$x_{ij}^{жд} + x_{kl}^{авто} \leq y_m \quad \forall m \in B_{переегруз}, (i, j). \quad (4)$$

При этом максимальное число перегрузок должно быть ограничено для сохранения заданного уровня издержек

$$\sum m \in B_{переегруз} \leq K_{max} \quad (5)$$

где K_{max} – максимально допустимое количество перегрузок.

Заключение

В работе изложены основные положения, при которых действительны расчеты, использующие модель выбора рационального варианта контейнерной перевозки при возникновении инфраструктурных ограничений.

При этом, как показывает практика, технико-экономические издержки, полученные за счет изменения схемы маршрута в пути следования, оказываются ниже, чем суммарный эффект от доставки груза «точно в срок».

Приведенные примеры иллюстрируют необходимость разработки динамических механизмов управления продвижением срочных грузов в контейнерах в части вариантов формирования рациональной схемы маршрута и способов бесшовной перегрузки. Это позволит оперативно реагировать на изменения в загрузженности инфраструктуры и обеспечивать выполнение обязательств перед клиентами по условиям доставки.

Список литературы

- [1] Вакуленко С.П., Насыбуллин А.М., Айсина Л.Р., Роменский Д.Ю., Мехедов М.И. Новый взгляд на технологию контейнерных перевозок железнодорожным транспортом // Техника и технология транспорта. – 2022. – № 1 (24). – С. 12-16.
- [2] Иванов Б.И., Мехедов М.И., Федюлин В.Г., Тимченко А.Ю., Бирюкова В.В., Камшилин Н.И. Новые подходы к организации контейнерных железнодорожных перевозок // Железнодорожный транспорт и технологии: сборник тр. Всерос. науч.-практ. конф. с международ. уч. / Уральск. гос. ун-т путей сообщ. – Екатеринбург, 2024. – С. 309-313.
- [3] Арипов Н.М., Камалетдинов Ш.Ш. Моделирование процессов автоматизированного сменного суточного планирования погрузки грузов на железнодорожном транспорте // Инновационный транспорт. – Екатеринбург: УрГУПС: Рос. акад. трансп. – 2023. – № 3 (49). – С. 55-59.
- [4] Котенко А.Г., Сатторов С.Б. К вопросу усиления пропускной способности линии при введении ускоренных грузовых перевозок // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 44-56.
- [5] Турдиев С.С., Исломова М.Н. Оптимизация перевозок: нахождение оптимальных путей и маршрутов с помощью алгоритмов Дейкстры и Флойда-Уоршелла // Ресурсосберегающие технологии на транспорте. – 2023. – Т. 2023. – № 2023. – С. 365-369.
- [6] Goryainov S., Konstantinova E.V., Li H., Zhao D. Integral graphs obtained by dual Seidel switching // Linear Algebra and its Applications. – 2020. – V. 604. – P. 476-489.
- [7] Nutz M., Wang R. The directional optimal transport // Annals of Applied Probability. – 2022. – № 32 (2). – P. 1400-1420.
- [8] Chen S., Liu Y., Zou L., Wang Z., Lin Y., Chen Y., Pan A. Combining optimal transport and embedding-based approaches for more expressiveness in unsupervised graph alignment // arXiv:2406.13216v1 [cs.LG]. – 2024. – 51 p. – DOI:10.48550/arXiv.2406.13216.
- [9] Kotenko A.G., Malakhova T.A., Shmatkov R.N., Tushin N.A. Description of multimodal transport networks by means of graph models // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2131. – № 3. – P. 032009.

ORGANIZATION OF COMBINED CONTAINER CARGO TRANSPORTATION UNDER INFRASTRUCTURE CONSTRAINTS

Kamshilin N. I.^{1,1}, Kotenko A. G.^{2,2}

¹ Joint Stock Company «All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport» (JSC «VNIIZhT»), Moscow, Russia.

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, Russia.

E-mail: ¹ kamshilin.nikita@vniizht.ru, ² kotenko@pgups.ru

Abstract. The article considers the urgent problem of ensuring timely delivery of container cargo under infrastructure constraints on the Russian Railways network. A systematic approach to the organization of combined rail-road transportation with dynamic re-routing and reloading of cargo en route to bypass congested infrastructure sections is proposed. Based on the formalization of the route network as a weighted graph and the use of optimal route search algorithms (Prim, Floyd-Warshall), a model for choosing a rational delivery method that minimizes total delivery time and costs is developed. Special attention is paid to the conditions for making decisions about reloading before entering the limiting section, which allows avoiding downtime and fulfilling «just-in-time» obligations. For practical implementation of the model, the main categories of data necessary for building an adequate information base are identified.

Keywords: *infrastructure constraints, rational delivery method, combined rail-road transportation.*

References

- [1] Vakulenko S.P., Nasybullin A.M., Aysina L.R., Romenskiy D.Yu., Mekhedov M.I. Novyy vzglyad na tekhnologiyu konteynernykh perevozok zheleznodorozhnym transportom (A new look at the technology of container transportation by rail). Tekhnika i tekhnologiya transporta (Equipment and Technology of Transport), 2022, no. 1 (24), pp. 12-16. (in Russian)
- [2] Ivanov B.I., Mekhedov M.I., Fedulin V.G., Timchenko A.Yu., Biryukova V.V., Kamshilin N.I. Novyye podkhody k organizatsii konteynernykh zheleznodorozhnykh perevozok (New approaches to the organization of container rail transportation). Zheleznodorozhnyy transport i tekhnologii: sbornik tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarod. uch. (Railway Transport and Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation), Ekaterinburg, 2024, pp. 309-313. (in Russian)
- [3] Aripov N.M., Kamaletdinov Sh.Sh. Modelirovaniye protsessov avtomatizirovannogo smenno-sutochnogo planirovaniya pogruzki грузов na zheleznodorozhnom transporte (Modeling of automated shift-daily planning processes for cargo loading in railway transport). Innovatsionnyy transport (Innovative Transport), Ekaterinburg: UrGUPS: Ros. akad. transp., 2023, no. 3 (49), pp. 55-59. (in Russian)
- [4] Kotenko A.G., Sattorov S.B. K voprosu usileniya propusknoy sposobnosti linii pri vvedenii uskorennykh грузовykh perevozok (On the issue of increasing line capacity with the introduction of accelerated freight transportation). Izvestiya Transsiba (Proceedings of Transsib), 2023, no. 4 (56), pp. 44-56. (in Russian)

For citation:

Kamshilin N. I., Kotenko A. G. Organization of Combined Container Cargo Transportation under Infrastructure Constraints. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 13-22. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-13-22. (in Russian)

- [5] Turdiev S.S., Islomova M.N. Optimizatsiya perevozok: nakhozhdeniye optimal'nykh putey i marshrutov s pomoshch'yu algoritmov Deykstry i Floyda-Uorshella (Optimization of transportation: finding optimal paths and routes using Dijkstra and Floyd-Warshall algorithms). *Resursosberegayushchiye tekhnologii na transporte* (Resource-Saving Technologies in Transport), 2023, vol. 2023, no. 2023, pp. 365-369. (in Russian)
- [6] Goryainov S., Konstantinova E.V., Li H., Zhao D. Integral graphs obtained by dual Seidel switching. *Linear Algebra and its Applications*, 2020, vol. 604, pp. 476-489.
- [7] Nutz M., Wang R. The directional optimal transport. *Annals of Applied Probability*, 2022, no. 32 (2), pp. 1400-1420.
- [8] Chen S., Liu Y., Zou L., Wang Z., Lin Y., Chen Y., Pan A. Combining optimal transport and embedding-based approaches for more expressiveness in unsupervised graph alignment. *arXiv:2406.13216v1 [cs.LG]*, 2024, 51 p. DOI:10.48550/arXiv.2406.13216.
- [9] Kotenko A.G., Malakhova T.A., Shmatkov R.N., Tushin N.A. Description of multimodal transport networks by means of graph models. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2131, no. 3, p. 032009.

УДК 656.13:006.013

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-23-41

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Жабриков М.В.^{1,1}, Давыдов Р.Д.^{1,2}, Ахмадов Г.Д.^{1,3}

¹ Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт» (ФАУ «РОСДОРНИИ»), Москва, Россия.

E-mail: ¹ maxpkey@mail.ru, ² davydov@rosdornii.ru, ³ akhmadov@rosdornii.ru

Аннотация. В статье исследованы этапы формирования и трансформации структуры интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования Российской Федерации с учетом изменения нормативно-правовой среды, технологических приоритетов и структуры применяемого оборудования. Целью работы является выявление закономерностей эволюции интеллектуальных транспортных систем и факторов, определивших переход от локальных технических решений к интегрированным цифровым платформам управления дорожным движением. В рамках исследования проведен количественный и качественный анализ внедряемых технических средств на различных этапах развития, проанализирована динамика соотношения отечественного и иностранного оборудования, а также оценено влияние политики импортозамещения, требований совместимости и сертификации на архитектуру систем. Особое внимание уделено роли федеральных и отраслевых нормативных документов в формировании современной конфигурации интеллектуальных транспортных систем. Полученные результаты позволяют уточнить тенденции оптимизации аппаратной составляющей, усиления роли программных и платформенных решений, а также развития технологий высокоавтоматизированных транспортных средств и развития технологий взаимодействия транспортных средств с инфраструктурой и окружающей средой. Практическая значимость работы заключается в возможности использования выявленных закономерностей при планировании развития интеллектуальных транспортных систем в регионах Российской Федерации, формировании технических требований к оборудованию, обосновании инвестиционных решений и разработке программ цифровой трансформации дорожной отрасли.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, автоматизация дорожного движения, структура оборудования ИТС, этапы трансформации ИТС, цифровизация дорог.

Сокращения и обозначения

АДМС – автоматическая дорожная метеостанция; **АПВГК** – автоматический пункт весогабаритного контроля; **АСУНО** – автоматизированная система управления наружным освещением;

БДД – безопасность дорожного движения;

БНСО – бортовое навигационно-связное оборудование;

ВАТС – высокоавтоматизированное транспортное средство;

ДИТ – динамическое информационное табло;

ЗПИ – знак переменной информации;

ИТС – интеллектуальная транспортная система;

ПО – программное обеспечение;

Для цитирования:

Жабриков М.В., Давыдов Р.Д., Ахмадов Г.Д. Этапы развития и трансформации структуры интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 23–41. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-23-41.

СОИБ – система обеспечения информационной безопасности;

Система ФВФ – система фото- и видеофиксации;

RSU – дорожное периферийное устройство (Road Side Unit);

V2X – взаимодействие транспортных средств с инфраструктурой и окружающей средой (Vehicle-to-Everything).

Введение

Интеллектуальные транспортные системы рассматриваются как один из ключевых инструментов повышения безопасности дорожного движения и эффективности эксплуатации автомобильных дорог. Их внедрение позволяет перейти от фрагментарного реагирования на транспортные события к управлению дорожным движением на основе анализа данных и прогнозирования [1].

Расширяя данное понимание, ряд авторов рассматривает ИТС не только как инструмент оперативного управления, но и как фактор устойчивого развития транспортной инфраструктуры в целом. В работах Е.А. Кондрашовой с соавторами ИТС позиционируется как сложная система управления транспортным комплексом, позволяющая на основе данных транспортного планирования и моделирования выявлять и предотвращать возникновение заторовых и небезопасных ситуаций [2]. Такой подход подчеркивает стратегическую роль ИТС в долгосрочном развитии дорожной отрасли.

Развитие ИТС в Российской Федерации на протяжении длительного времени осуществлялось преимущественно в формате локальных решений, ориентированных на выполнение отдельных функций – контроля соблюдения правил дорожного движения, мониторинга параметров транспортных потоков и информирования участников движения. Такой подход позволял решать отдельные прикладные задачи, однако не обеспечивал системного эффекта и масштабируемости внедряемых технологий. Устойчивое развитие ИТС возможно лишь при формировании единой архитектуры и интеграции региональных систем в национальную сеть [3].

Современный этап развития ИТС в Российской Федерации определяется как изменением стратегических приоритетов транспортной политики, так и расширением нормативно-правовой базы, направленной на комплексное внедрение интеллектуальных технологий на автомобильных дорогах. В этих условиях особое значение приобретает анализ трансформации структуры ИТС, отражающей эволюцию целей, технологий и подходов к управлению дорожным движением.

Обзорный характер настоящего исследования обусловлен необходимостью систематизации разрозненных данных о развитии ИТС в Российской Федерации. Как показывает анализ научной литературы, комплексные работы, объединяющие количественный анализ внедряемого оборудования с нормативно-правовыми и организационными факторами его трансформации, представлены крайне ограниченно. Большинство существующих публикаций фокусируются либо на технологических аспектах, либо на архитектурных подходах, либо на региональных аспектах внедрения, при этом интегральный анализ динамики изменения структуры ИТС на длительном временном интервале остается недостаточно разработанным.

Целью данной статьи является проведение комплексного ретроспективного анализа формирования и трансформации структуры интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах Российской Федерации на основе количественных и качественных характеристик внедряемого оборудования, а также нормативных и организационных факторов, повлиявших на данный процесс в период 2015-2025 гг.

1. Источники и методика анализа

Современные исследования в области ИТС формируют многоаспектное представление о направлениях их развития, однако характеризуются фрагментарностью аналитических подходов и недостаточной проработкой вопросов структурной трансформации ИТС в динамике. В большинстве работ развитие ИТС интерпретируется через призму технологических инноваций, нормативно-правового регулирования или организационно-управленческих механизмов, при этом комплексный анализ изменения состава и приоритетов внедряемых компонентов остается недостаточно систематизированным.

В ряде исследований развитие ИТС рассматривается преимущественно как инструмент повышения эффективности транспортных процессов и безопасности дорожного движения. В рамках данного подхода акцент делается на функциональных эффектах внедрения интеллектуальных технологий, что позволяет выявить их стратегическую значимость для транспортной отрасли [1]. Однако подобная интерпретация, как правило, ограничивается концептуальным уровнем и не предполагает детального анализа изменения структуры аппаратно-программных компонентов ИТС во времени, что затрудняет выявление закономерностей их эволюции.

Другой блок работ ориентирован на анализ организационно-технических условий внедрения ИТС, включая влияние институциональных факторов, уровня цифровой зрелости регионов и особенностей управления транспортной инфраструктурой. В этих исследованиях показана зависимость эффективности ИТС от степени интеграции подсистем и согласованности управленческих решений [4]. Вместе с тем структурные изменения ИТС в количественном выражении рассматриваются эпизодически, без системной оценки динамики распределения типов оборудования и программных решений, что ограничивает возможности интерпретации этапности развития ИТС.

Существенное место в научной литературе занимает анализ нормативно-правовых и стандартизационных факторов развития ИТС. В рамках данного направления обоснована роль регуляторной среды как ключевого драйвера формирования архитектуры интеллектуальных транспортных систем, а также показана значимость унификации требований к оборудованию, программному обеспечению и протоколам взаимодействия [5]. При этом нормативный анализ, как правило, не сопровождается эмпирической оценкой того, каким образом изменения правового и методического обеспечения трансформируют фактическую структуру ИТС и распределение ее компонентов.

Дополняя указанные подходы, исследования, посвященные проблемам применения стандартов и интероперабельности, выявляют технологические барьеры интеграции подсистем ИТС и подчеркивают необходимость формирования единой архитектурной модели [6]. В развитие данного направления Е.О. Андреевым с соавторами показано, что архитектура ИТС находится в постоянном обновлении, что является характерной тенденцией развития систем данного класса. Авторами предложены новые подходы к формированию интеграционной платформы ИТС, основанные на принципе разделения управления идентификацией цифровых объектов и управления структурами данных, что особенно актуально в условиях функционирования кооперативных ИТС [7].

Методологические аспекты проектирования ИТС получили развитие в работах И.Е. Агуреева и Ю.В. Федюкина, предложивших методику построения функциональной архитектуры ИТС как инструмента управления процессом создания системы. Данный подход позволяет визуализировать основные процессы ИТС и отразить взаимосвязи между заинтересованными сторонами, что создает основу для системного проектирования и последующей интеграции подсистем [8].

Методологический инструментарий проектирования архитектур ИТС получил систематизацию в работе Лапшина с соавторами, где выполнен обзор и анализ подходов к архитектурному проектированию, применяемых в США и Европейском союзе. Авторами проведено разграничение между высокоуровневым и низкоуровневым подходами, а также определены перспективные направления развития методов проектирования архитектур ИТС, что создает основу для выбора оптимальной архитектурной модели при планировании региональных ИТС [9].

Таким образом, анализ определенных существующих научных подходов демонстрирует редкое включение единой методологической модели, позволяющей одновременно учитывать технологические, нормативные и организационные факторы развития ИТС в их взаимосвязи с динамикой изменения компонентного состава системы. Недостаточная разработанность количественных методов оценки структурных сдвигов в ИТС и их корреляции с нормативными и программными драйверами определяет необходимость проведения комплексного исследования, направленного на выявление этапов развития и трансформации структуры ИТС на автомобильных дорогах общего пользования в длительном временном интервале.

Эмпирической базой исследования послужили данные, представленные в ежегодно формируемой ФАУ «РОСДОРНИИ» сводной ведомости оборудования и программного обеспечения ИТС, находящегося в эксплуатации на автомобильных дорогах общего пользования (далее – Ведомость). В данной Ведомости содержится агрегированная информация по типам оборудования и видам ПО ИТС, внедряемого на автомобильных дорогах общего пользования в субъектах Российской Федерации. Ведомость включает наименование оборудования и ПО, данные об изготовителе, страну производства, количество, а также технические и функциональные характеристики.

В данной статье рассматривается структура изменения состава ИТС по годам, анализируется корреляция изменений с драйверами нормативно-правового регулирования и ключевыми государственными программами и, в результате, выделяются этапы развития и трансформации в соответствии с логикой эволюции структуры ИТС.

Следует отметить, что анализ выполнен на основе данных ведомости, сформированной в 2025 году. При этом сбор и обобщение сведений осуществлялись не по итогам полного календарного 2025 года, а по состоянию на середину отчетного периода. В связи с этим данные за 2025 год не являются сопоставимыми с данными предыдущих лет по уровню полноты и не позволяют корректно оценивать годовую динамику внедрения оборудования и программного обеспечения ИТС. По указанной причине последним полным годом, включенным в анализ, является 2024 год, тогда как 2025 год рассматривается исключительно как год формирования исходной ведомости.

2. Динамика распределения по типам оборудования и программного обеспечения (2025 г. относительно периода 2015-2024 гг.)

Анализ данных Ведомости показывает существенный рост объемов внедрения оборудования и ПО ИТС в период 2015-2024 гг. с последующим снижением показателей в 2025 г., что обусловлено неполнотой отчетного периода.

Суммарное количество внедренного оборудования ИТС за период 2015-2025 гг. – 97 265 ед., к 2025 году накопленным итогом общее количество оборудования ИТС составляет 120 266 ед. Суммарное количество внедренного ПО ИТС за период 2015-2025 гг. – 1 264 ед., к 2025 году накопленным итогом общее количество ПО ИТС составляет 1 360 ед.

Динамика изменения количества внедряемого оборудования и ПО ИТС за период 2015-2024 гг. представлена на рисунках 1 и 2.

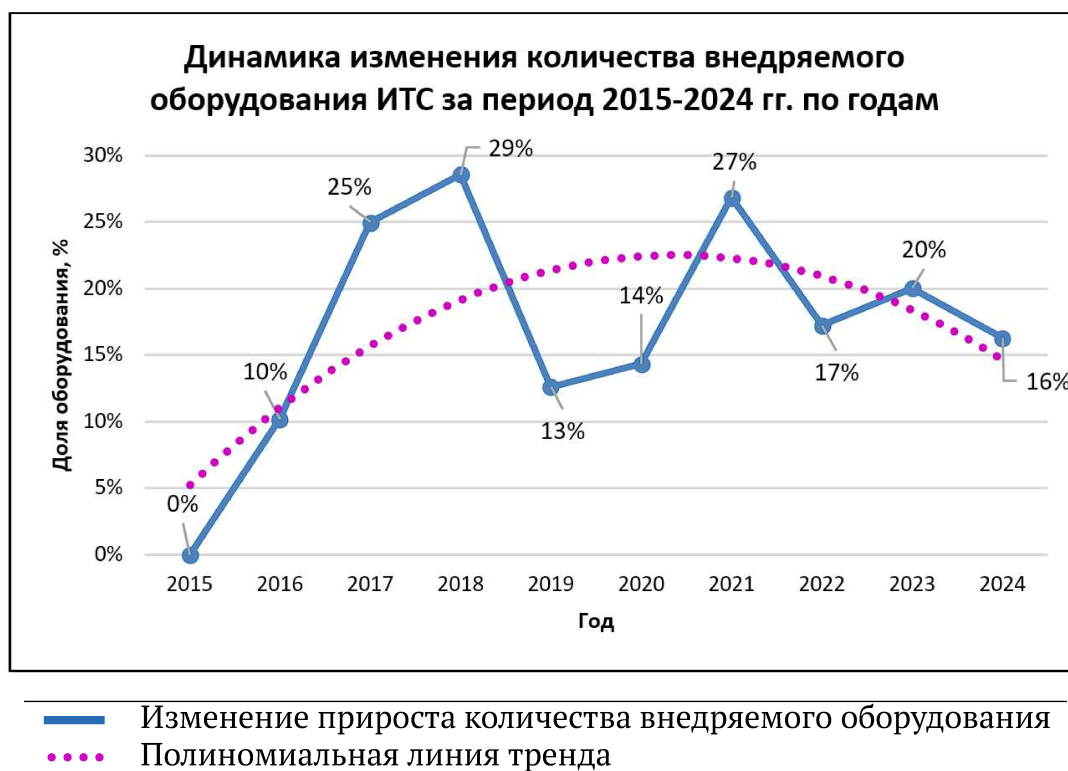


Рис. 1: Динамика изменения количества внедряемого оборудования ИТС за период 2015-2024 гг. по годам

Динамика изменения количества внедряемого оборудования ИТС за период 2015-2024 гг. по годам носит скачкообразный характер объемов внедрения, явно определяющий периоды 2015-2018 гг., 2019-2021 гг. и 2022-2024 гг. Линия тренда показывает стремительные темпы внедрения оборудования на начальных этапах, которые, в свою очередь, постепенно снижаются со временем.

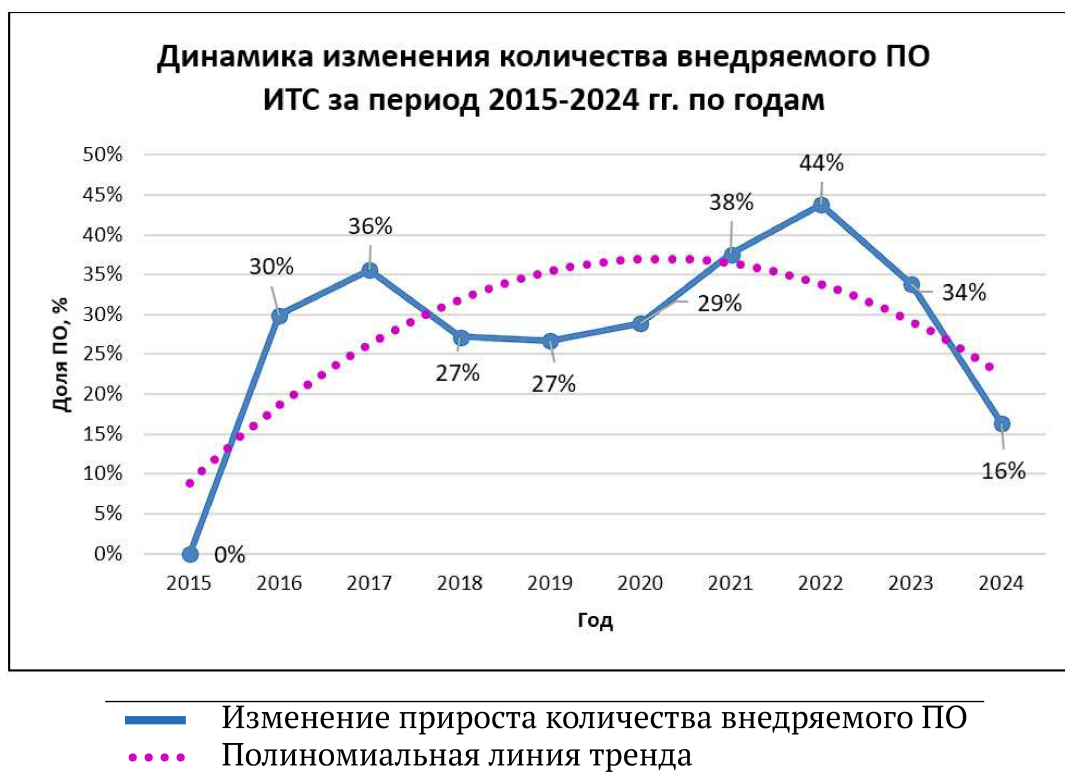


Рис. 2: Динамика изменения количества внедряемого ПО ИТС за период 2015-2024 гг. по годам

Динамика изменения количества, внедряемого ПО ИТС за период 2015-2024 гг. по годам не столь хаотична, как динамика внедряемого оборудования и этапность прослеживается не так явно, как в динамике оборудования. Наиболее популярными объектами управления, для которых внедряется ПО, являются: мониторинг и управление дорожными контроллерами, детекторами транспорта и видеокамерами.

Суммарное количество внедренных устройств по основным типам за рассматриваемый период характеризуется высокой концентрацией в ограниченном наборе категорий. Топ-6 типов оборудования по суммарному объему внедрения представлен на рисунке 3.

Следовательно, около 61% всего объема внедренного оборудования ИТС приходится на три типа оборудования (рис. 3):

- детекторы транспорта;
- видеокамеры;
- системы ФВФ.

На основе динамики внедрения оборудования в рассматриваемом периоде выделяются три полноценных этапа развития структуры ИТС.



Рис. 3: Распределение внедренного оборудования ИТС по количеству

2.1. Этап 1. 2015-2018 гг. – этап локальной автоматизации

По данным Ведомости, в 2015-2018 гг. объем внедрения оборудования относительно невелик, доминируют базовые технические средства сбора данных и управления движением (контроллеры, детекторы, видеокамеры), оборудование внедряется точно, без выраженной системной интеграции. Доминирующие типы оборудования, внедряемые в период Этапа 1, представлены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1: Доминирующие типы оборудования Этапа 1

Тип оборудования	Уровень внедрения
Системы ФВФ	287 – 3 253 ед./год (в среднем 1 427 ед./год)
Видеокамеры	147 – 2 921 ед./год (в среднем 1 175 ед./год)
Дорожные контроллеры	260 – 2 588 ед./год (в среднем 906 ед./год)

Структура оборудования и темпы внедрения ПО на первом этапе соответствуют начальной стадии развития ИТС в России и ориентации на решение локальных задач безопасности и организации движения. В этот период нормативная база и требования к архитектурной интеграции только формировались, а большинство проектов реализовывались как точечные региональные инициативы. Поэтому преобладали устройства с быстрым прикладным эффектом – дорожные контроллеры, видеокамеры, системы ФВФ и детекторы транспорта (рис. 4). Их массовость объясняется приоритетом автоматизации отдельных пересечений и участков дорог, а также ограниченным масштабом системной интеграции. Фрагментарность внедрения отражает раннюю стадию институционального становления ИТС.

То есть ИТС, на этом этапе, выполняет функцию локальной автоматизации отдельных участков и задач, заметно выражена фрагментарность внедрения оборудования, ориентация на отдельные объекты и отсутствие развитой архитектуры ИТС.



Рис. 4: Распределение внедренного оборудования ИТС по количеству в период Этапа 1

2.2. Этап 2. 2019-2021 гг. – этап масштабирования

К концу этапа локальной автоматизации произошло первичное насыщение и с 2018 года на 2019 год зафиксировано уменьшение темпов внедрения как оборудования, так и ПО. В период 2019-2021 гг. независимо от разницы временных объемов отмеченных этапов (Этап 1 – 4 года, а Этап 2 – 3 года) резко увеличиваются объемы внедрения большинства типов оборудования, растет количество систем ФВФ, АПВГК, парковочных систем, RSU, СОИБ, датчиков метеомониторинга, АДМС, АСУНО, видеокамер и детекторов транспорта (таблица 2 и рис. 5). Также расширяется география внедрения ИТС, в период Этапа 2 оборудование появляется в Белгородской, Курской, Орловской, Омской, Рязанской, Сахалинской и Тульской областях, в Камчатском крае, в Чукотском АО, а также в Республиках Бурятия, Дагестан, Коми, Северная Осетия-Алания и Крым.

Рост оборудования на втором этапе связан прежде всего с масштабированием ИТС в рамках федеральных проектов и программ, которые разобраны в разделе 3 данной статьи, а также расширением географии внедрения. Регионы получили целевое финансирование и получили возможность массово внедрять оборудование локальных типов. Это объясняет преимущественно количественный рост тех же типов оборудования (видеокамеры, системы ФВФ, детекторы), а не появление принципиально новых подсистем в регионах. Однако в отдельных регионах данный этап развития пройден ранее, поэтому фиксируется некоторое увеличение долей внедряемого оборудования вспомогательного назначения – лаборатории, датчики и системы.

Таким образом, на этапе масштабирования зафиксировано не столько качественное изменение, сколько количественное расширение уже существующих решений, отраженное ростом объемов, распространением технологий и переходом от пилотных решений к массовому внедрению.

Таблица 2: Сравнение динамики роста количества внедряемого оборудования между Этапом 1 и Этапом 2

Тип оборудования	Количество внедренного оборудования, ед.		Прирост на Этапе 2 относительно Этапа 1
	Этап 1	Этап 2	
Видеокамера	4700	8154	+3454 (+73%)
Система ФВФ	5708	7918	+2210 (+39%)
Детектор транспорта	2177	4255	+2078 (+95%)
Дорожный контроллер	3623	2350	-1273 (-35%)
АСУНО	1074	1513	+439 (+41%)
ЗПИ	1464	1201	-263 (-18%)
АДМС	595	615	+20 (+3%)
ДИТ	576	566	-10 (-2%)
БНСО	445	377	-68 (-15%)
Парковочная система	140	254	+114 (+81%)
Датчик метеомониторинга	129	207	+78 (+60%)
АПВГК	37	112	+75 (+203%)
RSU	0	68	+68
СОИБ	0	48	+48
Дорожная лаборатория	0	8	+8
Датчик экомониторинга	0	5	+5
Дорожная станция	3	0	-3



Рис. 5: Распределение внедренного оборудования ИТС по количеству в период Этапа 2

2.3. Этап 3. 2022-2024 гг. – этап интеграции и цифровизации

В этом этапе явно выражены максимальные объемы внедрения и оборудования и ПО, рост интеллектуальных подсистем (АСУНО, RSU, СОИБ), усиление роли данных и программного обеспечения, усложнение структуры ИТС (таблица 3 и рис. 6). Дополнительно расширяется география внедрения ИТС в период Этапа 3, оборудование появляется в Забайкальском крае, в Иркутской, Нижегородской, Пензенской, Липецкой, Челябинской, Курганской и Калининградской областях, а также в Удмуртской, Чеченской и Чувашской Республиках.

Третий этап начался ростом темпов внедрения оборудования, однако к его завершению они снизились. Темпы внедрения ПО были максимальными в 2022 году, но далее произошел стремительный спад. В целом этап уже не носит столь «взрывного» характера, как предыдущие: темпы стабилизируются и выравниваются. Наблюдается переход к интегрированной цифровой модели ИТС. Увеличение количества детекторов транспорта, АСУНО, СОИБ, датчиков метеомониторинга и экомониторинга, а также RSU отражает повышение внимания к централизованному управлению и обработке данных.

Таблица 3: Сравнение динамики роста количества внедряемого оборудования между Этапом 3 и Этапами 1 и 2

Тип оборудования	Количество внедренного оборудования за Этап 3, ед.	Разница прироста в Этапе 3 относительно Этапа 1	Разница прироста в Этапе 3 относительно Этапа 2
Детектор транспорта	13764	+11587 (+532%)	+9509 (+223%)
Видеокамера	8875	+4175 (+89%)	+721 (+9%)
АСУНО	7756	+6682 (+622%)	+6243 (+413%)
Система ФВФ	5660	-48 (-1%)	-2258 (-29%)
Дорожный контроллер	4475	+852 (+24%)	+2125 (+90%)
ЗПИ	1262	-202 (-14%)	+61 (+5%)
СОИБ	659	659	+611 (+1273%)
ДИТ	659	+83 (+14%)	+93 (+16%)
АДМС	568	-27 (-5%)	-47 (-8%)
Датчик метеомониторинга	534	+405 (+314%)	+327 (+158%)
БНСО	482	+37 (+8%)	+105 (+28%)
RSU	404	404	+336 (+494%)
АПВГК	152	+115 (+311%)	+40 (+36%)
Парковочная система	74	-66 (-47%)	-180 (-71%)
Датчик экомониторинга	28	28	+23 (+460%)
Дорожная лаборатория	1	1	-7 (-87%)
Дорожная станция	0	-3	0

К этому времени во многих регионах уже сформирована базовая сенсорная инфраструктура, что позволило сосредоточиться на интеграции подсистем. Дополнительным фактором выступило импортозамещение, сопровождавшееся развитием комплексных отечественных решений. В конце этапа интеграции и цифровизации фиксируется переход от количественного наращивания к качественному, централизованному развитию ИТС.

Прослеживается переход от простой «количественности» оборудования к системной интеграции и цифровой архитектуре, выраженный объединением подсистем, ростом доли данных и переходом к управлению на основе цифровых платформ.



Рис. 6: Распределение внедренного оборудования ИТС по количеству в период Этапа 3

Таким образом, характерными особенностями этапов являются:

1. Этап 1. 2015-2018 гг. – этап локальной автоматизации:

- Преобладание базовых технических средств регулирования и контроля дорожного движения (дорожные контроллеры, детекторы транспорта, видеокамеры), внедрение оборудования преимущественно наиболее крупными городами и владельцами автодорог;
- Точечный характер внедрения оборудования, ориентированный на отдельные участки дорожной сети и локальные задачи управления движением;
- Ограниченный уровень интеграции подсистем ИТС и отсутствие единой архитектурной модели;
- Формирование первичной инфраструктуры сбора данных о транспортных потоках без развитых механизмов аналитической обработки;

2. Этап 2. 2019-2021 гг. – этап масштабирования:

- Существенный рост объемов внедрения оборудования ИТС по сравнению с предыдущим периодом (вплоть до двукратного), обусловленный расширением практики применения интеллектуальных технологий на автомобильных дорогах;
- Массовое внедрение систем ФВФ, видеонаблюдения и средств мониторинга транспортных потоков;
- Расширение функционального назначения ИТС от локального управления движением к задачам контроля, мониторинга и обеспечения БДД;
- Увеличение пространственного охвата ИТС и переход от отдельных объектов автоматизации к сетевому внедрению оборудования;

3. Этап 3. 2022-2024 гг. – этап интеграции и цифровизации:

- Формирование интегрированной архитектуры ИТС, основанной на взаимодействии различных подсистем и централизации управления транспортными процессами;
- Рост доли интеллектуальных систем управления и аналитических решений в структуре ИТС, включая системы адаптивного управления движением и мониторинга дорожной обстановки;
- Усиление роли программного обеспечения и цифровых платформ в обеспечении функционирования ИТС, что отражает переход от аппаратно-ориентированной модели к цифровой модели управления;
- Смещение приоритетов внедрения от отдельных технических средств к комплексным решениям, обеспечивающим обработку больших массивов данных и поддержку управленческих решений.

Из приведенных данных следует несколько выводов:

- в период 2015-2024 гг. объемы ежегодного внедрения оборудования увеличились с 1 664 до 16 325 единиц, то есть почти в 10 раз;
- наиболее массовыми типами оборудования, значительно превышающими своим количеством остальные типы, являются детекторы транспорта (23%), видеокамеры (20%) и системы ФВФ (18%);
- Этапы 2 и 3 характеризуются значительным географическим расширением, где Этап 2 более обширен (+14 субъектов), а Этап 3 менее (+ 11 субъектов).

3. Причины изменений в структуре оборудования ИТС

Трансформация структуры оборудования интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации в 2015-2024 гг. носила поэтапный характер и была тесно связана с развитием нормативно-правовой базы, реализацией федеральных проектов, изменением технологической политики и приоритетов регионов. Сопоставление количественной динамики, рассмотренной ранее, с институциональными решениями позволяет выделить факторы, определявшие структуру ИТС на каждом этапе.

Начальный этап развития ИТС в рассматриваемый период совпал с активным формированием стандартизированной терминологической и архитектурной основы отрасли. В 2014-2015 гг. были утверждены ключевые документы:

- ГОСТ Р 56294-2014, закрепивший требования к функциональной и физической архитектуре ИТС;
- ГОСТ Р 56829-2015, установивший единый понятийный аппарат в области ИТС.

Принятие указанных стандартов создало методическую базу, однако на практике внедрение носило преимущественно точечный характер. Это напрямую коррелирует с выявленным доминированием базовых устройств (видеокамеры, дорожные контроллеры, детекторы транспорта) и фрагментарностью инфраструктуры.

Помимо отраслевых стандартов и программных документов, концептуальные основы правового регулирования ИТС в условиях цифровой трансформации транспортной отрасли были рассмотрены М.А. Бажиной. В работе автора показаны существующие терминологические проблемы на легальном и научном уровнях, а также предложены подходы к формированию правового регулирования элементов ИТС (включая высокоавтоматизированные транспортные средства и «умную» инфраструктуру) не обособленно, а как составных частей единой системы [10]. Данный подход коррелирует с выявленной в настоящем исследовании эволюцией ИТС от локальных решений к интегрированной архитектуре.

Дополнительным драйвером внедрения в 2017-2018 гг. стала подготовка транспортной инфраструктуры к проведению чемпионата мира по футболу 2018 года в России. В этот период в субъектах РФ активно разворачивались системы видеонаблюдения, динамического информирования участников движения (ДИТ и ЗПИ), модернизировались светофорные объекты и элементы управления парковочным пространством. Это объясняет зафиксированный рост соответствующих типов оборудования при сохранении локального характера систем.

Существенное стратегическое значение имел Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204¹, который закрепил курс на цифровизацию транспортной отрасли и применение автоматизированных технологий управления движением. Однако в конце этапа влияние указа только начало проявляться, что соответствует наблюдаемой в проведенной анализе преобладающей модели локальной автоматизации.

Таким образом, структура ИТС в 2015-2018 гг. (этап локальной автоматизации) определялась сочетанием формирующейся нормативной базы и практической ориентации регионов на решение отдельных задач организации дорожного движения и повышения БДД.

На втором этапе ключевым фактором структурных изменений стало развертывание федеральных механизмов финансирования ИТС.

¹Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204 (ред. от 21.07.2020) «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»

В 2020-2024 гг. началась реализация федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства»² в составе национального проекта «Безопасные качественные дороги»³, предусматривающего внедрение автоматизированных систем управления движением в городах с населением свыше 300 тыс. человек. Проект охватил десятки агломераций и сформировал устойчивый спрос на тиражируемые решения.

Это прямо отражается в количественных показателях, рассмотренных выше – наблюдается кратный рост уже освоенных типов оборудования (ФВФ, видеокамеры, детекторы), тогда как доля сложных интеграционных компонентов увеличивается умеренно. Структура развития на данном этапе носит преимущественно экстенсивный характер.

Важным институциональным событием стало также ужесточение политики технологической независимости. В 2020 г. были введены ограничения на допуск иностранной промышленной продукции, включая радиоэлектронные средства для задач организации и безопасности дорожного движения⁴. Это запустило поступательную перестройку рынка поставщиков ИТС.

Дополнительный импульс технологическому развитию придало формирование в 2021 г. научно-методической базы для внедрения ВАТС и создание пилотной зоны в Республике Татарстан. Хотя влияние этих мероприятий на количественную структуру оборудования пока было ограниченным, они обозначили переход отрасли к более сложным цифровым сценариям.

В совокупности, на этапе масштабирования, указанные факторы обусловили переход от пилотных проектов к массовому внедрению типовых решений ИТС.

Третий этап характеризуется усилением системного подхода к развитию ИТС и закреплении курса на формирование единой цифровой среды управления дорожным движением. Развитие RSU и цифровой инфраструктуры формирует основу для внедрения технологий V2X – взаимодействия транспортных средств между собой, инфраструктурой и внешними цифровыми сервисами.

Ключевым нормативным событием стало утверждение в 2022 г. Концепции создания и функционирования национальной сети интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования⁵. Документ определил целевую архитектуру ИТС, принципы межрегиональной интеграции и требования к совместимости подсистем. Это напрямую коррелирует с зафиксированным в анализе ростом периферийного оборудования и других интеграционных компонентов.

²Паспорт федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства». – Министерство транспорта Российской Федерации: офиц. сайт. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/9759>

³Паспорт национального проекта «Безопасные качественные дороги». – Министерство транспорта Российской Федерации: офиц. сайт. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11524>

⁴Постановление Правительства Российской Федерации от 30.04.2020 № 616 «Об установлении запрета на допуск промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, для целей осуществления закупок для государственных и муниципальных нужд, а также промышленных товаров, происходящих из иностранных государств, работ (услуг), выполняемых (оказываемых) иностранными лицами, для целей осуществления закупок для нужд обороны страны и безопасности государства» // Сайт Правительства Российской Федерации: офиц. сайт. URL: <http://government.ru/docs/all/127752/>

⁵Распоряжение Минтранса России от 30.09.2022 № АК-247-р «Об утверждении Концепции создания и функционирования национальной сети интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования»

Развитие ИТС в российских агломерациях, как показано в исследовании Волковой с соавторами, также требует учета этапности и существенных особенностей каждого региона. Авторами сформированы этапы развития ИТС, предполагающие их интеграцию с концепцией «Мобильность как услуга» (MaaS), а также выявлены проблемы, сдерживающие развитие ИТС в российских агломерациях на современном этапе [11]. Данные результаты коррелируют с установленными в настоящем исследовании барьерами на этапе локальной автоматизации и масштабирования, что подтверждает объективность предложенной периодизации.

В 2023 г. распоряжением Правительства РФ № 3097-р⁶ было утверждено стратегическое направление цифровой трансформации транспортной отрасли. В документе акцент сделан на платформенных решениях, управлении на основе данных и развитии интеллектуальной инфраструктуры. Данный вектор также согласуется с выявленным смещением структуры оборудования в сторону аналитических и управляющих подсистем.

Существенное влияние оказало дальнейшее ужесточение политики импортозамещения. Если ранее ограничения носили стимулирующий характер, то Постановление Правительства РФ № 1875⁷ дополнительно сузило возможности закупки зарубежной продукции для дорожно-транспортной отрасли. На фоне уже действующих мер это способствовало снижению доли иностранного оборудования до 18% в 2022-2024 гг. и активизации внедрения отечественных комплексных решений.

Одновременно продолжалась реализация мероприятий национального проекта «Безопасные качественные дороги», что обеспечивало высокий, но уже более стабилизированный уровень внедрения оборудования. К этому моменту в большинстве агломераций была сформирована базовая сенсорная инфраструктура, и приоритет начал смещаться на интеграцию, централизованное управление и обработку данных.

Таким образом, структура ИТС на третьем этапе (этап интеграции и цифровизации) отражает начало перехода от количественного наращивания оборудования к формированию цифровой архитектуры управления транспортной системой.

Сопоставление нормативных решений с динамикой оборудования показывает последовательную эволюцию модели развития ИТС (рис. 7):

- 2015-2018 гг. (этап локальной автоматизации) – формирование стандартов и локальная автоматизация, в том числе связанная с подготовкой к крупным международным мероприятиям;
- 2019-2021 гг. (этап масштабирования) – масштабирование типовых решений под воздействием федерального финансирования и расширения географии внедрения;
- 2022-2024 гг. (этап интеграции и цифровизации) – начало перехода к интегрированной цифровой архитектуре и усиление импортозамещения.

⁶Распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 ноября 2023 г. № 3097-р об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года // КонсультантПлюс: офиц. сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_461391/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/

⁷Постановление Правительства РФ от 23.12.2024 № 1875 (ред. от 27.09.2025) «О мерах по предоставлению национального режима при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, закупок товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц»

Рост общего объема оборудования более чем в 4 раза сопровождался изменением его структуры – от преобладания отдельных технических средств к доминированию комплексных и взаимосвязанных подсистем.

Тем самым трансформация ИТС в Российской Федерации носит закономерный характер и определяется согласованным воздействием нормативного регулирования, федеральных программ развития и технологической политики государства.



Рис. 7: Изменение нормативно-правовой базы в процессе развития ИТС

Заключение

Анализ динамики внедрения оборудования интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования за 2015-2024 гг. показал последовательную трансформацию структуры ИТС под воздействием нормативных, технологических и организационных факторов.

Развитие проходило поэтапно: на Этапе 1 (этап локальной автоматизации) преобладали локальные решения и фрагментарное внедрение; на Этапе 2 (этап масштабирования) произошло масштабирование типовых технологий; а на Этапе 3 (этап интеграции и цифровизации) начался переход к интегрированной цифровой архитектуре и централизованному управлению. Выделенные этапы подтверждаются как количественной динамикой оборудования, так и изменениями нормативно-правовой базы.

Практическая значимость результатов состоит в возможности их использования при планировании развития ИТС и корректировке региональных программ. Сформированная цифровая инфраструктура создает технологическую основу для развития ВАТС и отечественных V2X-решений [12].

Современный вектор развития характеризуется смещением акцента от экстенсивного наращивания оборудования к его оптимизации и функциональной интеграции за счет верхнеуровневых программных платформ и централизации обработки данных. Предложенная этапность может быть использована как аналитическая основа для дальнейшего мониторинга зрелости ИТС и оценки эффективности управленческих решений в отрасли.

Список литературы

- [1] Ефимов А. А., Медведева К. С. Интеллектуальные транспортные системы: перспективы, эффективность и проблемы // IJAS. – 2025. – № 1. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82539049> (дата обращения: 25.01.2026).
- [2] Кондрашова Е. А., Мертвищев Г. А., Латышенок Н. М. ИТС как устойчивое развитие транспортной инфраструктуры // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 217-219.
- [3] Торопов Н. Ю., Анохов И. В. Цифровизация автомобильных дорог: учиться на уроках прошлого // Автомобильные дороги. – 2025. – № 9 (1126). – С. 104-109.
- [4] Кузнецов С. А., Николаев В. А. Организационно-технические аспекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях // Экономика и управление. – 2025. – № 6. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82650250> (дата обращения: 30.01.2025).
- [5] Торопов Н. Ю., Федосеев Е. С. Развитие нормативной базы в области интеллектуальных транспортных систем // Дороги и мосты. – 2023. – № 2 (50). – С. 13-40.
- [6] Вальковская А. А., Кривошеев А. В., Павлов Н. В., Свистельников А. А. Проблемы применения стандартов в области интеллектуальных транспортных систем // ИТС Регионам. – 2025. – № 32. – URL: <https://www.itsjournal.ru/> (дата обращения: 30.01.2025).
- [7] Андреев Е. О., Жанказиев С. В., Зырянов В. В., Павлов А. С. Развитие архитектуры интеллектуальных транспортных систем // T-COMM: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – № 1. – С. 38-43.
- [8] Агуреев И. Е., Федюкин Ю. В. Методика построения функциональной архитектуры интеллектуальных транспортных систем // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2024. – № 3 (78). – С. 78-87.
- [9] Лапшин В. С., Елькин Д. М., Кучеров С. А., Рогозов Ю. И. Обзор методов проектирования архитектур интеллектуальных транспортных систем // ИВД. – 2018. – № 4 (51). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-proektirovaniya-arhitektur-intellektualnyh-transportnyh-sistem> (дата обращения: 26.06.2026).
- [10] Бажина М. А. Интеллектуальные транспортные системы – основа de lege ferenda транспортной системы Российской Федерации // Journal of digital technologies and law. – 2023. – № 3. – С. 630-649.
- [11] Волкова Е. М., Васильева М. Е., Романов А. С. Интеллектуальные транспортные системы в российских агломерациях: сущность, структура и направления развития // ИТСТ. – 2023. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-transportnye-sistemy-v-rossiyskih-aglomeratsiyah-suschnost-struktura-i-napravleniya-razvitiya> (дата обращения: 26.06.2026).
- [12] Алексеев В. М., Баранов Л. А., Кулагин М. А., Сидоренко В. Г. Построение архитектуры интеллектуальной системы управления городской рельсовой транспортной системой // Мир транспорта. – 2021. – № 1 (92). – С. 18-46.

STAGES OF DEVELOPMENT AND TRANSFORMATION OF ITS STRUCTURE ON PUBLIC ROADS

Zhabrikov M. V.^{1,1}, Davydov R. D.^{1,2}, Akhmadov G. D.^{1,3}

¹ Federal Autonomous Institution «Russian Road Research Institute» (FAI «ROSDORNII»), Moscow, Russia.

E-mail: ¹ maxpkey@mail.ru, ² davydov@rosdornii.ru, ³ akhmadov@rosdornii.ru

Abstract. This article examines the formation and transformation stages of intelligent transport systems on public roads in the Russian Federation, considering changes in the regulatory environment, technological priorities, and equipment structure. The study aims to identify patterns in intelligent transport systems evolution and factors driving the shift from local solutions to integrated digital traffic management platforms. The research included quantitative and qualitative analysis of technical means at different development stages, analysis of the domestic-foreign equipment ratio dynamics, and assessment of import substitution policies, compatibility requirements, and certification impacts on system architecture. Particular attention is given to federal and industry regulations shaping the current intelligent transport systems configuration. The results clarify trends in hardware optimization, the growing role of software and platform solutions, and the development of VATS and V2X technologies. The practical significance lies in applying the identified patterns to regional intelligent transport systems planning, defining equipment requirements, supporting investment decisions, and developing road industry digital transformation programs.

Keywords: *intelligent transport systems, road traffic automation, ITS equipment structure, ITS transformation stages, road digitalization.*

References

- [1] Efimov A.A., Medvedeva K.S. Intellektualnyye transportnyye sistemy: perspektivy, effektivnost i problemy (Intelligent transport systems: prospects, efficiency and problems). IJAS, 2025, no. 1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82539049> (accessed 25.01.2026). (in Russian)
- [2] Kondrashova E.A., Mertvishchev G.A., Latyshenok N.M. ITS kak ustoychivoye razvitiye transportnoy infrastruktury (ITS as a sustainable development of transport infrastructure). Innovatsii v informatsionnykh tekhnologiyakh, mashinostroyenii i avtotransporte. Sbornik materialov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Innovations in Information Technologies, Mechanical Engineering and Motor Transport. Collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference), 2021, pp. 217-219. (in Russian)
- [3] Toropov N.Yu., Anokhov I.V. Tsifrovizatsiya avtomobilnykh dorog: uchitsya na urokakh proshlogo (Digitalization of roads: learning from the lessons of the past). Avtomobilnyye dorogi (Automobile Roads), 2025, no. 9 (1126), pp. 104-109. (in Russian)
- [4] Kuznetsov S.A., Nikolaev V.A. Organizatsionno-tekhnicheskiye aspekty vnedreniya intellektualnykh transportnykh sistem v gorodskikh aglomeratsiyakh (Organizational and technical aspects of the implementation of intelligent transport systems in urban agglomerations). Ekonomika i upravleniye (Economics and Management), 2025, no. 6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82650250> (accessed 30.01.2025). (in Russian)

For citation:

Zhabrikov M. V., Davydov R. D., Akhmadov G. D. Stages of Development and Transformation of ITS Structure on Public Roads. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 23-41. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-23-41. (in Russian)

- [5] Toropov N.Yu., Fedoseenkova E.S. Razvitiye normativnoy bazy v oblasti intellektualnykh transportnykh sistem (Development of the regulatory framework in the field of intelligent transport systems). Dorogi i mosty (Roads and Bridges), 2023, no. 2 (50), pp. 13-40. (in Russian)
- [6] Valkovskaya A.A., Krivosheev A.V., Pavlov N.V., Svistelnikov A.A. Problemy primeneniya standartov v oblasti intellektualnykh transportnykh sistem (Problems of applying standards in the field of intelligent transport systems). ITS Regionam (ITS to Regions), 2025, no. 32. URL: <https://www.itsjournal.ru/> (accessed 30.01.2025). (in Russian)
- [7] Andreev E.O., Zhankaziev S.V., Zyryanov V.V., Pavlov A.S. Razvitiye arkhitektury intellektualnykh transportnykh sistem (Development of the architecture of intelligent transport systems). T-COMM: Telekommunikatsii i transport (T-COMM: Telecommunications and Transport), 2024, no. 1, pp. 38-43. (in Russian)
- [8] Agureev I.E., Fedyukin Yu.V. Metodika postroyeniya funktsionalnoy arkhitektury intellektualnykh transportnykh sistem (Methodology for building a functional architecture of intelligent transport systems). Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) (Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)), 2024, no. 3 (78), pp. 78-87. (in Russian)
- [9] Lapshin V.S., Elkin D.M., Kucherov S.A., Rogozov Yu.I. Obzor metodov proyektirovaniya arkhitektur intellektualnykh transportnykh sistem (Review of methods for designing architectures of intelligent transport systems). IVD, 2018, no. 4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-proektirovaniya-arhitektur-intellektualnyh-transportnyh-sistem> (accessed 26.06.2026). (in Russian)
- [10] Bazhina M.A. Intellektualnyye transportnyye sistemy — osnova de lega ferenda transportnoy sistemy Rossiyskoy Federatsii (Intelligent transport systems as the basis de lega ferenda of the transport system of the Russian Federation). Journal of Digital Technologies and Law, 2023, no. 3, pp. 630-649. (in Russian)
- [11] Volkova E.M., Vasilyeva M.E., Romanov A.S. Intellektualnyye transportnyye sistemy v rossiyskikh aglomeratsiyakh: sushchnost, struktura i napravleniya razvitiya (Intelligent transport systems in Russian agglomerations: essence, structure and directions of development). ITST, 2023, no. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-transportnye-sistemy-v-rossiyskih-aglomeratsiyah-suschnost-struktura-i-napravleniya-razvitiya> (accessed 26.06.2026). (in Russian)
- [12] Alekseev V.M., Baranov L.A., Kulagin M.A., Sidorenko V.G. Postroyeniye arkhitektury intellektualnoy sistemy upravleniya gorodskoy relsovoy transportnoy sistemoy (Building the architecture of an intelligent control system for an urban rail transport system). Mir transporta (World of Transport), 2021, no. 1 (92), pp. 18-46. (in Russian)

УДК 338.47

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-42-57

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Сотников Е.А.^{1,1}

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия.

E-mail: ¹ allasotnikova0@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены основные направления технического и технологического развития российских железных дорог на перспективу примерно до 40-50 лет. За такой период железные дороги должны существенно повысить значения ключевых показателей своей работы. В основу выбора перспективных направлений технико-технологического развития российских железных дорог предложено положить в первую очередь использование достижений IV-й промышленной революции, которая началась в 20-е годы текущего столетия, а также уже известные, высокоэффективные, но еще не реализованные решения прошедших революций. Требуется глубокое изучение новых возможностей, порождаемых IV-й промышленной революцией по развитию технических средств и технологий применительно к отраслям железнодорожного транспорта, инфраструктуре, подвижному составу, системам управления движением и перевозочным процессом. В статье рассмотрены основные направления, по которым развивается IV-я промышленная революция и даны предложения по их использованию с учетом специфики работы железных дорог.

Ключевые слова: IV-я промышленная революция, новые направления развития, железные дороги, цифровизация, информационно-управляющие системы, искусственный интеллект, эксплуатационный ресурс технических средств.

Для цитирования:

Сотников Е.А. Перспективы технико-технологического развития российских железных дорог. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 42—57. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-42-57.

Введение

Начавшаяся в 2020-е годы на основе использования достижений фундаментальных наук IV-я промышленная революция породила новый скачок в развитии технических средств, технологии, систем управления во всех отраслях экономики. Это полностью относится и к железнодорожному транспорту с учетом специфики его производственных процессов. К основным новым решениям относятся: цифровизация основных технических средств инфраструктуры и подвижного состава с оснащением объектов и их узлов миниатюрными датчиками технического состояния, что обеспечит существенное повышение уровня безопасности движения и сокращение расходов на их текущее содержание и ремонт; переход от информационных к информационно-управляющим системам управления перевозочным процессом в оперативном режиме с непрерывной выработкой на более чем 10 тыс. рабочих местах (диспетчеры, дежурные, машинисты и др.) оптимальных решений, что позволит повысить качество перевозочного процесса и расширить зоны управления дежурно-диспетчерского аппарата; использование новых материалов и устройств для значительного повышения статической и динамической прочности и износостойкости локомотивов, вагонов, пути и др. с целью существенного снижения количества «окон», подвижного состава, находящегося в техническом обслуживании и ремонте; роботизация производства, использование альтернативных видов топлива и ряд других инноваций. Из известных решений необходимо прежде всего внедрять высокоскоростные магистрали (350-400 км/ч), тяжеловесное движение грузовых поездов, контейнерные перевозки, технологию «just in time». Все это обеспечит конкурентоспособность и жизнестойкость российских железных дорог в обозримой перспективе.

1. Состояние вопроса и основные решения

Новые направления развития отраслей экономики при каждой промышленной революции в общем соответствуют новым достижениям в области фундаментальных наук, на основе которых разрабатываются инновационные технические и технологические решения. Например, после того, как фундаментальные исследования обеспечили возможность различными способами использовать электрическую энергию, произошел буквально «взрыв» инновационных решений в области двигательной и осветительной техники, приборостроения, устройств управления.

Внедрение инновационных решений, в свою очередь, позволяет существенно улучшить значения ключевых технических показателей, обеспечивающих повышение качества предоставляемых услуг железными дорогами, снижение себестоимости и конкурентоспособности на рынке транспортных услуг.

За прошедшие 200 лет развития железнодорожного транспорта (с 1825г.) в целом достигнуто следующее изменение ряда ключевых показателей:

- скорости движения поездов возросли с 50 км/ч до 350 км/ч – в 7 раз;
- осевая нагрузка – с 8 т/ось до 30 т/ось (и более) – в 4 раза;
- масса грузового поезда – с 300-500 т до 10-30 тыс.т – в 20 раз и более;
- провозная способность участков – с 3-4 млн.т. нетто/год до 100 млн.т. нетто/год и более.

Появились принципиально новые технологии:

- контейнерных перевозок, обеспечивающих конкурентоспособность с автотранспортом;
- высокоскоростных железных дорог (ВСМ), успешно конкурирующих с авиацией.

Но ключевые показатели не могут бесконечно расти. Так, скорость в пассажирском движении свыше 350-400 км/ч требует значительного роста энергетических затрат, в массе грузового поезда свыше 20-30 тыс. тонн нет необходимости и т.п. Поэтому в перспективном прогнозе надо определить какие ключевые технические показатели должны существенно возрасти в ближайшие десятилетия (2020-2050 г.г.), чтобы обеспечить принципиальное повышение эффективности российского железнодорожного транспорта и его основной составляющей – ОАО «РЖД». Основа этого – достижения фундаментальных наук.

Ряд принципиальных научных результатов достаточно четко определяют этапы развития человеческого индустриального общества, которое зародилось примерно в начале 19 века. До этого было прединдустриальное общество с ремесленническим хозяйством. На рис.1 представлена периодизация этапов четырех (I-IV) промышленных революций [1].



Рис. 1: Периодизация этапов промышленных революций

По влиянию на промышленное производство они в основном определяются: изобретением парового двигателя и железных дорог (~1800 год, I); возможностями различных способов использования электрической энергии – электрические двигатели, освещение, приборостроение, системы управления, а также создания двигателей внутреннего сгорания (~1900 год, II); создание полупроводников и ЭВМ (~1960 год, III); цифровизация объектов управления и создание искусственного интеллекта (~2020 год, IV). То есть настоящее время является эпохой IV промышленной революции. Здесь мы не будем вступать в дискуссию по вопросам этапности промышленных революций. Автор статьи в принципе согласен с их приведенной классификацией, хотя существуют и другие подходы к данному вопросу. Но периодизация этапов промышленных революций (на рис.1) хорошо согласуется с ключевыми переломами в технико-технологическом развитии железнодорожного транспорта и принята за основу. При этом рассматривается современный IV этап.

Надо отметить, что важно сегодня не только совсем новое, но и реализация известных эффективных решений. Дело в том, что внедрение инноваций происходит в разных странах неравномерно, и сегодня есть эффективные решения прошедших периодов, еще не внедренных в ОАО «РЖД». На этапе IV промышленной революции в России наряду с новыми, должны также внедряться:

- специализированные высокоскоростные пассажирские магистрали со скоростями до 350-400 км/ч, в первую очередь на линиях Москва-Санкт-Петербург, Москва-Кавказ, Крым (сегодня в мире ВСМ действует в 14 странах, их общая протяженность составляет ~60 тыс. км¹);
- технология движения соединенных грузовых поездов массой 10-15 тыс. т на постоянной основе со специальной подготовкой инфраструктуры на выделенных грузонапряженных линиях, в первую очередь на Восточном полигоне [2];
- технология интервального регулирования движения поездов, обеспечивающая сокращение межпоездного интервала, особенно на линиях с благоприятным планом и профилем пути, где техническая скорость движения поездов несущественно изменяется по мере их продвижения по участку [3];
- повышение провозной способности линий на основе конструктивного совершенствования вагонного парка на основе увеличения погонной нагрузки вагонов (восьмиосные вагоны), полного использования габарита подвижного состава (увеличение емкости кузова), снижение тары вагонов (на 5-6 тонн) [4];
- развитие технологии контейнерных перевозок и технологии «just in time», позволяющих обеспечить возврат грузов на железные дороги, переключенных в прошлые годы на автотранспорт (в т.ч. за счет расширения сферы использования среднетоннажных контейнеров) [5, 6].

И конечно надо внедрять достижения IV промышленной революции. Рассмотрим основные направления внедрения таких достижений.

1.1. Цифровизация железнодорожной отрасли

Цифровизация железнодорожной отрасли зародилась еще в 1960-1970-е годы, когда были оцифрованы в целом станции, вагоны и другие объекты.

Новое заключается в следующем:

- оцифровываются все основные объекты, участвующие в перевозочном процессе – подвижной состав, устройства тяги, СЦБ и подчеркнем - их конструктивные элементы, для чего используются новые миниатюрные датчики технического состояния конструкций; важно, что такая техника быстро развивается, а датчики могут устанавливаться на любых деталях;
- на этой основе выполняется цифровой мониторинг объектов с передачей данных в устройства управления для принятия решений о дальнейшей работе технических средств. Образуются так называемые, «умные объекты» - умный вагон, локомотив, поезд и т.п. (рис.2).

¹Официальный сайт Международного союза железных дорог - HIGH SPEED LINES IN THE WORLD 2022 (Summary). – URL: https://uic.org/IMG/pdf/20231001_high_speed_lines_in_the_world.pdf (дата обращения: 08.07.2026).



Рис. 2: Схема использования миниатюрных датчиков

Это позволит:

- значительно сократить расходы на текущее содержание и ремонт;
- перейти к решению новой целевой задачи – достижению абсолютной технической безопасности движения поездов на железнодорожном транспорте.

1.2. Переход к информационно-управляющим системам

Переход от современных информационных к новым информационно-управляющим системам управления перевозочным процессом, вырабатывающих рациональные управляющие решения в оперативном режиме (ОУР).

На сети ОАО «РЖД» имеется более 10000 круглосуточно действующих рабочих мест, на которых дежурно-диспетчерский аппарат сетевого, полигонного, регионального и линейного уровней и управляющие выполнением различных операций работники (дежурные по станции, машинисты локомотивов, составители поездов и др.) постоянно принимают оперативные управляющие решения (ОУР) по ходу выполнения перевозочного процесса.

Оперативная работа на сети ОАО «РЖД» выполняется с использованием основополагающих долгосрочных документов таких, как план перевозок грузов и пассажиров, график движения и план формирования поездов, месячные технические нормы эксплуатационной работы. Однако текущая работа осуществляется в условиях сильных внутренних и внешних воздействий (неравномерность отправления грузов, высокий уровень загрузки пропускной способности, затруднения в работе путей необщего пользования, отказы технических средств и др.), что определяет перевозочный процесс в оперативном режиме как большую (сложную) организованную систему, работающую при значительной неопределенности [7, 8].

Условия выработки ОУР характеризуют:

- множественность возмущающих воздействий;
- сложность прогнозирования начала и окончания действия и степени влияния различных факторов на перевозочный процесс;
- краткость времени, в течение которого требуется принять решение.

Следует особое внимание обратить на влияние на оперативную работу посуточной и внутрисуточной неравномерности поездо- и вагонопотоков.

Фактор неравномерности в пассажирских перевозках носит строго определенный графиком движения характер. При отклонениях отдельных поездов от графика, проявляющихся в их опозданиях, действует правило преимущества пассажирских поездов перед грузовыми. Диспетчерский аппарат в этом случае обязан выполнять «нагон» опаздывающих поездов. В этом в основном и проявляется диспетчерское оперативное руководство движением пассажирских поездов.

Совсем другое положение в оперативном руководстве грузовым движением. Здесь каждые сутки складывается индивидуальная ситуация по количеству и дислокации грузовых поездов, а в нормативном графике движения учитывается лишь максимально возможное суточное количество «ниток» поездов. При этом отклонений от графика в грузовом движении значительно больше, чем в пассажирском.

Рассмотрим, например, влияние посуточной неравномерности на условия работы локомотивного диспетчера. Пусть на направлении АБ (рис.3) среднесуточное количество грузовых поездов составляет $\overline{N}_{AB} = 50$ п/сут, $\overline{N}_{BA} = 45$ п/сут. Для таких размеров движения посуточные колебания характеризуются коэффициентом вариации $\nu = 0,12$ и близко к нормальному закону распределения [9]. Принимая с достаточной для практических расчетов точностью значение нормированного отклонения $t = 2,5$, получаем максимальные и минимальные величины посуточных размеров движения поездов (рис.3).

Задача локомотивного диспетчера состоит в обеспечении всех составов поездов локомотивами и локомотивными бригадами. При использовании средних значений размеров движения эта задача является простой. Каждые сутки из Б в А должно следовать «резервом» $\overline{N}_{AB} - \overline{N}_{BA} = 5$ лок/сут, то же и локомотивных бригад. Но фактическая посуточная ситуация является совсем другой. Максимальное количество пересылаемых «резервом» из Б в А локомотивов без составов составляет $N_{AB}^{\max} - N_{BA}^{\min} = 33$ лок/сут. В некоторые сутки возможно и движение локомотивов «резервом» из А в Б при максимальном их количестве $N_{BA}^{\max} - N_{AB}^{\min} = 23$ лок/сут. В целом возникает множество возможных комбинаций встречных размеров движения, число которых многократно увеличивается при учете времени поступления поездов в течение суток. Очевидно, что требуется хороший оперативный многосуточный прогноз посуточного поступления поездов, т.к. длина участков оборота локомотивов часто превышает длину пробега поездов за сутки. Но достигнуть высокой точности многосуточного прогноза достаточно сложно и требуется учет многих факторов для повышения такой точности. Поэтому задача перехода к информационно-управляющей системе для рабочего места локомотивного диспетчера является крайне сложной.

Требуется глубокое изучение условий их работы применительно к конкретным условиям. То же относится и к другим рабочим местам дежурно-диспетчерского персонала.

Важно учитывать различие между понятиями технологическая операция (далее – операция) и ОУР по данной операции. Для выполнения одной операции на рассматриваемом рабочем месте (или в районе станции, где выполняется комплекс взаимосвязанных операций) может приниматься несколько ОУР, причем для каждого ОУР следует учитывать индивидуальные влияющие факторы. В результате нередко, на первый взгляд, простейшая технологическая операция требует разработки сложных алгоритмических построений для ее выполнения на основе принятия нескольких ОУР.

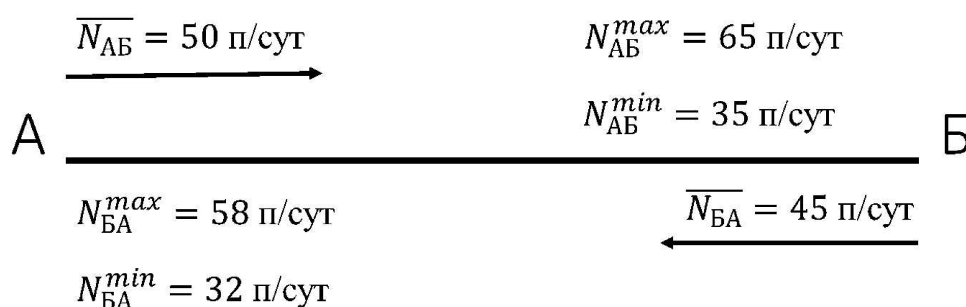
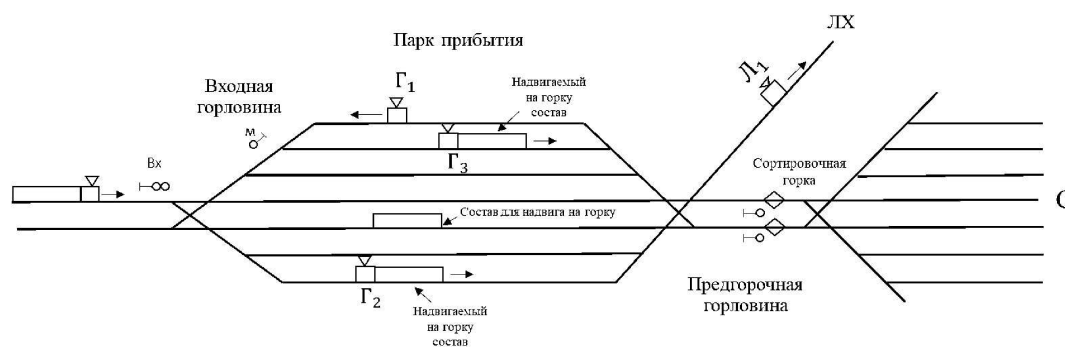


Рис. 3: Характеристика посуточных размеров движения грузовых поездов на направлении АБ

Рассмотрим пример – операция прием прибывающего в расформирование поезда в парк прибытия сортировочной станции (рис.4). Здесь представлена условная схема района сортировочной станции, в котором выполняется комплекс операций, тесно связанных с приемом поездов в расформирование. На этой схеме указаны только те технические объекты (например, маневровые сигналы), которые связаны с прибытием поезда. Такой район может управляться с рабочего места дежурного по парку прибытия (ДСП).



Пр – прибывающий поезд;
 Вх – входной сигнал;
 М – маневровый сигнал;
 Г₁, Г₂, Г₃ – горочные локомотивы;
 ЛХ – локомотивное хозяйство;
 С – сортировочный парк.

Рис. 4: Условная схема района станции, а также оперативного состояния поездной и маневровой работы в парке прибытия сортировочной станции

Для выполнения технологической операции (Т) ДСП должен принять несколько ОУР, причем для каждого из которых требуется учитывать свои влияющие факторы. Рассмотрим этот вопрос детальнее.

Первое решение – ОУР₁ это выбор пути прибытия. Учитываемые факторы:

- Φ_{11} – длина пути в парке прибытия должна соответствовать длине Пр;
- Φ_{12} – при наличии в поезде вагонов с опасными грузами поезд должен приниматься на путь, предназначенный для таких грузов;

- Φ_{13} – на основании прогноза развития оперативной ситуации в районе входной горловины должно быть обеспечено максимально параллельное выполнение операций по приему поезда с другими поездными и маневровыми операциями в этой горловине в момент прибытия поезда;
- Φ_{14} – на основании прогноза должно быть обеспечено максимально параллельное выполнение предстоящих операций по надвигу и роспуску состава прибывающего поезда с другими маневровыми операциями в предгорочной горловине после подготовки состава к роспуску на горке.

Второе решение ОУР₂ – определение времени прекращения маневровых передвижений во входной горловине на маршрутах, враждебных с маршрутом прибытия поезда. Учитываемые факторы:

- Φ_{21} – выполнение маневровых операций не должно вызвать задержку поезда перед входным сигналом, для чего требуется выполнить максимально точный прогноз времени прибытия поезда к предвходному и входному сигналам, а также по составу предстоящих маневровых операций;
- Φ_{22} – максимально точное определение (на основе прогноза) скорости выполнения маневровых операций для определения времени их окончания на маршрутах враждебных с маршрутом приема поезда.

Третье решение ОУР₃ – определение времени открытия входного сигнала. Учитываемый фактор:

- Φ_{31} – частично совмещаемые с факторами Φ_{13} , Φ_{21} , Φ_{22} условия с учетом фактического выполнения всех поездных и маневровых операций.

Четвертое решение ОУР₄ – определение времени возобновления маневровых операций на маршруте приема поезда. Учитываемые факторы:

- Φ_{41} – контроль времени освобождения секций входной горловины на маршруте приема поезда;
- Φ_{42} – проверка свободности данного маршрута от необходимости его использования для другого поездного маршрута.

Пятое решение ОУР₅ – определение времени и подача команды по закреплению состава прибывшего поезда на пути его приема. Учитываемый фактор:

- Φ_{51} – определение времени остановки состава на пути парка приема.

Подобное положение имеет место и по другим районам управления сортировочных и других станций, по которым ДСП принимают ОУР по характерным для данной локации технологическим операциям на основании влияющих на такие операции факторам. Чем опытнее специалист, и выше его IQ, способность быстро оценивать постоянно меняющуюся ситуацию, лучше физическо-эмоциональное состояние, тем ближе его решения по принятию ОУР к оптимальному (рациональному) варианту. Конечно никаких технико-экономических расчетов при этом не проводится. Использование информационно-управляющих систем позволит примерно на 5-10% сократить межоперационные простои вагонов и локомотивов, снизить расход топливно-энергетических ресурсов и, что особенно важно, расширить зоны управления одним ДСП не менее, чем на 30-40% с соответствующим сокращением персонала.

Принципиальная схема условий разработки информационно-управляющей системы для объекта оперативного управления, состоящего из нескольких районов управления, представлена на рис.5.

Казалось бы, принятие ОУР в таких системах может полностью основываться на опыте работы дежурным персоналом с использованием нейросетей, но наличие полностью повторяющихся оперативных ситуаций в рассматриваемых случаях вряд ли возможно. Кроме того, как уже говорилось, принимаемые дежурным персоналом ОУР могут быть и ошибочными. Поэтому разработку информационно-управляющих систем рассматриваемого вида только на методах ИИ нельзя признать правильной.

Сочетание методов использования нейросетей со строгими алгоритмическими построениями при максимально достижимой точности учета влияющих факторов, на наш взгляд, позволит наиболее успешно решить задачу построения информационно-управляющих систем для объектов оперативного управления перевозочным процессом ОАО «РЖД».

Необходимо отметить разнообразие условий принятия ОУР на рабочих местах дежурно-диспетчерского аппарата различных уровней управления и даже на одном и том же уровне. Это относится к: разработке прогноза оперативной обстановки для принятия ОУР, определению конкретного времени принятия и реализации ОУР (открытие разрешающего сигнала или подача команды на выполнение ОУР), контроль хода его выполнения для принятия последующих решений, возможной отмены или корректировки ОУР и др. Требуется детальный анализ условий оперативной работы на многочисленных рабочих местах с их типизацией для сокращения затрат и времени на разработку спектра информационно-управляющих систем, охватывающих максимальное, а в перспективе, и все рабочие места. А в настоящее же время крайне недостаточное методическое и программное обеспечение решения задачи выработки ОУР на всех уровнях управления приводит к тому, что такие решения оказываются далеко не всегда рациональными, особенно по экономической составляющей.

Переход к информационно-управляющим системам требует использование достижений фундаментальной науки в области ИИ и современных методов программирования. При этом крупный комплекс исследований, который в ближайшие годы необходимо выполнить силами отраслевой науки, должен обеспечить:

- создание имитационных моделей применительно к рабочим местам;

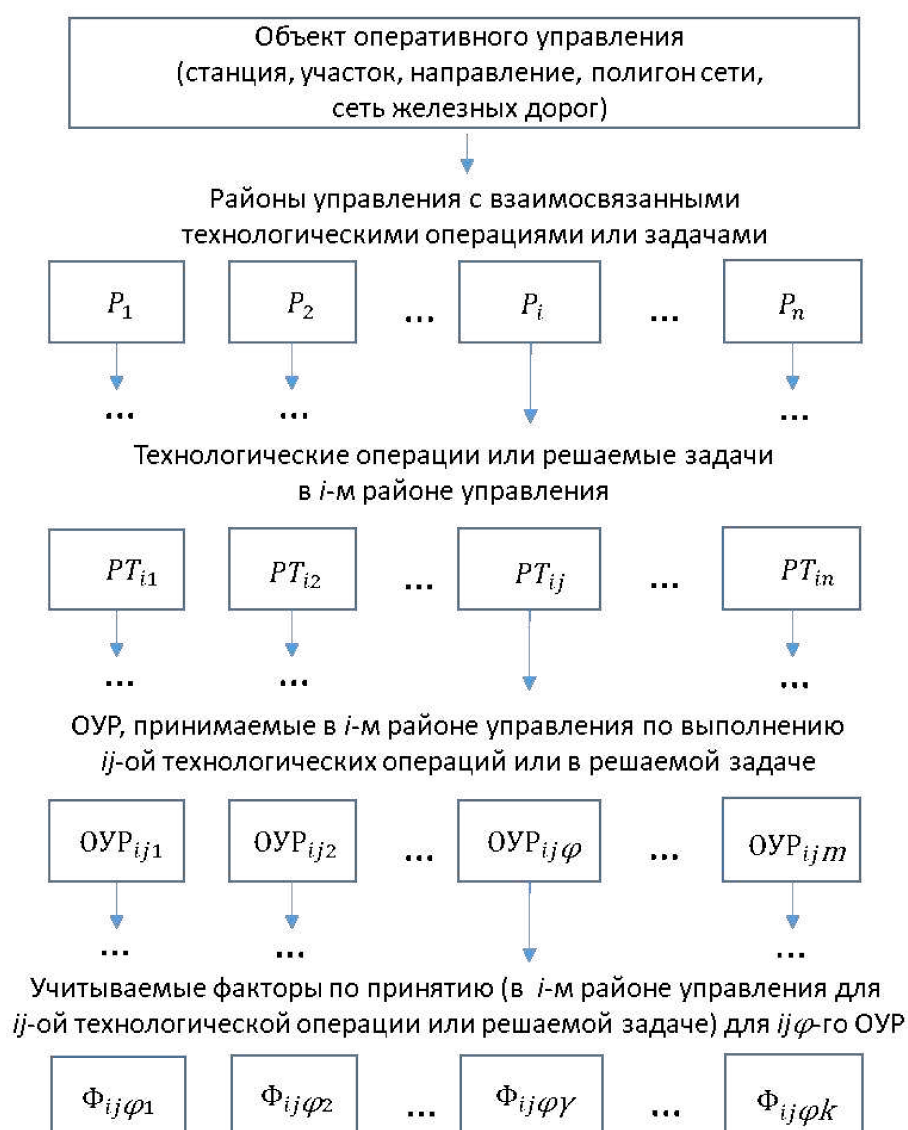


Рис. 5: Принципиальная схема условий разработки информационно-управляющей системы для объекта оперативного управления

- развитие методов прогнозирования оперативного хода перевозочного процесса применительно ко всем уровням управления;
- разработку оптимизирующих алгоритмов и выработки ОУР с учетом экономической составляющей.

1.3. Повышение эксплуатационного ресурса и надежности технических средств железных дорог

Значительное повышение эксплуатационного ресурса и надежности технических средств железных дорог – локомотивов, вагонов, рельсов и др.

Основой этого являются фундаментальные достижения в области материалов [11, 12]:

- металлов, сплавов;
- полимерных материалов;
- смазок.

При снижении массы новые материалы обеспечивают значительное повышение в используемой технике:

- модуля упругости;
- статической и динамической прочности;
- износостойкости, включая самовосстановление.

Это по сети в целом позволит в разы снизить:

- предоставление «окон» (сегодня до 600 тыс. в год);
- количество локомотивов, находящихся в ТО и ремонте (сегодня ~ 25%);
- количество отказов технических средств с задержками движения поездов (сегодня ~ 100 случаев в сутки).

И главное, осуществить постепенное исключение случаев аварий, крушений и браков с переходом к решению принципиально новой целевой задачи – достижение абсолютной технической безопасности движения поездов.

1.4. Другие существенные достижения IV-й промышленной революции

Новая технология использования «больших данных» для принятия управляющих решений

Например, суточный отчет о работе сети железных дорог содержит >12000 данных, между тем, для принятия управляющих решений используется лишь малая часть (десятки), поскольку оперативный персонал не в состоянии освоить весь комплекс данных.

В сложных эксплуатационных ситуациях требуется значительное расширение количества используемых данных, в том числе связанных с обеспечением максимальной экономической эффективности перевозочного процесса. Это возможно при переходе к интеллектуально-управляющим системам с применением методов многофакторного анализа при принятии ОУР.

Использование всего массива этих и других данных позволит:

- повысить точность прогнозов и планов перевозок;
- оптимизировать решения по повышению надежности технических средств;
- оптимизировать оперативное управление в целом.

Роботизация производства

Здесь принципиально новым стал быстрый рост гибкости и адаптивности роботов [13, 14].

Необходим:

- анализ технологий для выявления процессов подлежащих роботизации (особенно осмотр и ремонт устройств инфраструктуры и подвижного состава, авторасцепка вагонов, маневровая работа на станциях и др.);
- разработка роботов, применительно к условиям работы железных дорог.

Использование альтернативных видов топлива, силовых установок, 3D-печати и других инноваций

Возможно появление новых решений, например, видов тяги более эффективных, чем электрическая и тепловозная, методов накопления и хранения энергии [15], менее трудозатратных способов выполнения различных технологических операций и других новых решений [16] на основе реализации достижений IV-й промышленной революции.

Представляет интерес вопрос о максимальных сроках планирования перспективного технико-технологического развития железных дорог. Поскольку такие сроки связаны с промышленными революциями, происходящими в мировой экономике, то и сроки такого планирования должны примерно совпадать с периодами между промышленными революциями. Из рис.1 следует, что эти периоды составили: между I и II – 100 лет, II и III – 60 лет, III и IV – 60 лет. Учитывая ускорение научно-технического прогресса можно ожидать, что очередная V промышленная революция наступит примерно через 40-50 лет. Таким образом, максимальный период перспективного планирования технико-технического развития железнодорожного транспорта должен составлять не более 40-50 лет.

2. Основные выводы

1. Выбор направлений перспективного развития железных дорог должен опираться на:
 - новые достижения IV-й промышленной революции с их реализацией на основе взаимодействия отраслевой и фундаментальной науки;
 - эффективные уже известные, но еще не внедренные технико-технологические решения III-й промышленной революции.
2. В каждом хозяйстве ОАО «РЖД», и особенно в области систем управления движением и перевозочным процессом, инфраструктуры, подвижного состава необходимо осмысление и анализ всех новых продуктов IV-й промышленной революции с выбором тех, которые позволят принять высокоэффективные технико-технологические решения.
3. Основными целями должны стать:
 - переход к информационно-управляющим системам, в том числе с использованием искусственного интеллекта, что обеспечит: оптимизацию множества постоянно принимаемых оперативно-управляющих решений на более чем 10 000 рабочих местах дежурно-диспетчерского аппарата и расширение зон обслуживания оперативного персонала на 30-40%;

- достижение полного контроля состояния всех технических средств на основе их цифровизации с оснащением основных узлов и деталей миниатюрными датчиками состояния, что обеспечит сокращение расходов на эксплуатацию и ремонт, а также реализацию принципиально новой целевой задачи обеспечения абсолютной технической безопасности движения поездов на сети ОАО «РЖД»;
 - значительное повышение (в разы) эксплуатационного ресурса устройств инфраструктуры и подвижного состава.
4. Существенное улучшение важнейших технико-экономических показателей в отрасли, и прежде всего в части повышения производительности труда и снижения себестоимости перевозок.
 5. В целом всё это обеспечит высокую конкурентоспособность и жизнестойкость российских железных дорог в обозримой перспективе. Если же этого не сделать, то сфера перевозок железными дорогами будет сужаться, и из основного сухопутного транспорта они превратятся во второстепенный. Этого допустить нельзя.

Заключение

Каждая новая промышленная революция, в основе которых лежат достижения фундаментальных наук, в том числе и четвертая, начавшаяся в 2020-е годы, создают условия для коренного совершенствования технических средств, технологии, систем управления во всех отраслях экономики, в том числе и на железнодорожном транспорте. Необходимо учитывать, что в настоящий момент – начала очередной промышленной революции выявлены еще не все возможности, которые она порождает. Поэтому требуется глубокий анализ возможностей уже известных и еще не полностью раскрытых новых решений, получаемых в исследованиях фундаментальных наук. Большое значение имеет реализация новых методов совершенствования оперативного управления перевозочным процессом с дальнейшим развитием систем управления, а также широкого спектра новых возможностей в части использования новых материалов, альтернативных видов топлива, устройств роботизации, 3D-печати и других инноваций. Наряду с этим необходимо продолжить внедрение еще не полностью реализованных достижений III-й промышленной революции: высокоскоростных пассажирских магистралей (ВСМ), тяжеловесного грузового движения, интервального регулирования движения поездов, технологии контейнерных перевозок, в том числе с использованием средне- и малотоннажных контейнеров. Достижимые при этом – расширение сферы предоставляемых услуг при повышении производительности труда и снижении себестоимости перевозок обеспечит сохранение российскими железными дорогами роли основного сухопутного транспорта в нашей стране.

Список литературы

- [1] Клаус Шваб. Четвертая промышленная революция. – М.: «Э», 2016. – 208 с.
- [2] Мехедов М.И., Сотников Е.А., Холодняк П.С., Курсин Д.А., Корниенко Н.В. Оптимизация условий организации движения соединенных поездов на постоянной основе на Транссибирской магистрали Восточного полигона сети железных дорог // Вестник ВНИИЖТ. – 2021. – Т. 80. – № 1. – С. 4-12.
- [3] Кобзев С.А. и др. Комплексная технология интервального регулирования движения поездов. – М.: Т8 издательские технологии, 2023. – 216 С.
- [4] Увеличение габаритов и повышение погонных нагрузок грузовых вагонов / под ред. В.М. Богданова // Труды ВНИИЖТ. – 1983. – № 660. – 85 С.
- [5] Никифорова Г.И., Подвербных А.А., Федорова Н.Б. Развитие контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте в современных условиях // Техника транспорта: образование и практика (ПГУПС). – 2022. – Т. 3. – № 4. – С. 405-409.
- [6] Боженко С.А., Новожилова У.А., Легостаева Н.В. Анализ и перспективы развития контейнерных перевозок в РФ в современных условиях // Вестник науки. – 2023. – № 7 (64). – Т. 3. – С. 8-13.
- [7] Лернер А.Я. Начало кибернетики. – М.: Наука, 1967. – 400 С.
- [8] Мехедов М.И., Сотников Е.А., Холодняк П.С., Лобанов С.В. Переход к автоматизированным информационно-управляющим системам оперативного управления перевозочным процессом в сети ОАО «РЖД»: постановка задачи // Вестник ВНИИЖТ. – 2024. – Т. 83. – № 3. – С. 231-237.
- [9] Угрюмов А.К. Неравномерность движения поездов. – М.: Транспорт, 1968. – 112 С.
- [10] Шенфельд К.П., Сотников Е.А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. – М.: Научный мир, 2015. – 202 С.
- [11] Савин А.В., Борц А.И., Святозарова И.В., Дорошкевич А.А. Применение композитных материалов на железнодорожном транспорте // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 1. – С. 15-17.
- [12] Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте // Труды ВИАМ. – 2016. – № 7 (42). – С. 113-117.
- [13] Дудоров Е.А., Кудюкин В.В., Котова К.А. Робототехнические комплексы обслуживания подвижного состава российских железных дорог // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9. – С. 3-15. – DOI:10.18698/0536-1044-2022-9-3-15.
- [14] Гнездилова Ю.С. Робототехника как элемент четвертой промышленной революции и перспективы развития робототехники в России // Международная экономика. – 2019. – № 6. – С. 46-57.
- [15] Некрасов Г.Ю., Любимов Е.Ю., Куделин К.В. Использование электрических накопителей для повышения тяговых свойств автономных локомотивов // Мир транспорта. – 2024. – Т. 22. – № 1 (110). – С. 24-29.
- [16] Елисейкин Е.И., Щелокова А.О., Тележкина К.И. 3D-печать запчастей локомотивов // Железнодорожный транспорт. – 2024. – № 7. – С. 42-44.

PROSPECTS FOR TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN RAILWAYS

Sotnikov E. A.^{1,1}

¹ Joint Stock Company «Research and Design Institute for Informatization, Automation and Communication in Railway Transport» (JSC «NIIAS»), Moscow, Russia.

E-mail: ¹ allasotnikova0@gmail.com

Abstract. The main directions of technical and technological development of Russian railways for the period of about 40-50 years are considered. During this period, railways should significantly improve the key performance indicators of their work. The selection of promising areas for technical and technological development of Russian railways is based primarily on the use of the achievements of the Fourth Industrial Revolution, which began in the 1920s, as well as the already known, highly effective, but not yet implemented solutions of previous revolutions. It is necessary to study in depth the new opportunities generated by the 4th industrial revolution for the development of technical means and technologies in relation to the railway transport industry, infrastructure, rolling stock, traffic control systems, and transportation processes. The article discusses the main areas in which the 4th industrial revolution is developing and provides suggestions for their use, taking into account the specific features of railway operations.

Keywords: *the Fourth Industrial Revolution, new areas of development, railways, digitalization, information and control systems, artificial intelligence, and the operational life of technical equipment.*

References

- [1] Shvab K. Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya (The Fourth Industrial Revolution). Moscow, «E» Publ., 2016. 208 p. (in Russian)
- [2] Mekhedov M.I., Sotnikov E.A., Kholodnyak P.S., Kursin D.A., Kornienko N.V. Optimizatsiya usloviy organizatsii dvizheniya soyedinennykh poyezdov na postoyannoy osnove na Transsibirskoy magistrali Vostochnogo poligona seti zheleznnykh dorog (Optimization of conditions for organizing the movement of coupled trains on a permanent basis on the Trans-Siberian Railway of the Eastern range of the railway network). Vestnik VNIIZhT (Bulletin of VNIIZhT), 2021, vol. 80, no. 1, pp. 4-12. (in Russian)
- [3] Kobzev S.A. et al. Kompleksnaya tekhnologiya intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov (Comprehensive technology of interval train traffic control). Moscow, T8 izdatelskiye tekhnologii Publ., 2023. 216 p. (in Russian)
- [4] Bogdanov V.M. (ed.) Uvelicheniye gabaritov i povysheniye pogonnykh nagruzok gruzovykh vagonov (Increasing dimensions and increasing linear loads of freight cars). Trudy VNIIZhT (Proceedings of VNIIZhT), 1983, no. 660. 85 p. (in Russian)
- [5] Nikiforova G.I., Podverbnykh A.A., Fedorova N.B. Razvitiye konteynernykh perevozok na zheleznodorozhnom transporte v sovremennykh usloviyakh (Development of container transportation by rail in modern conditions). Tekhnika transporta: obrazovaniye i praktika (PGUPS) (Transport Engineering: Education and Practice (PGUPS)), 2022, vol. 3, no. 4, pp. 405-409. (in Russian)

For citation:

Sotnikov E. A. Prospects for Technical and Technological Development of the Russian Railways. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 42–57. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-42-57. (in Russian)

- [6] Bozhenko S.A., Novozhilova U.A., Legostaeva N.V. Analiz i perspektivy razvitiya konteynernykh perevozk v RF v sovremennykh usloviyakh (Analysis and prospects for the development of container transportation in the Russian Federation in modern conditions). Vestnik nauki (Bulletin of Science), 2023, no. 7 (64), vol. 3, pp. 8-13. (in Russian)
- [7] Lerner A.Ya. Nachalo kibernetiki (The Beginning of Cybernetics). Moscow, Nauka Publ., 1967. 400 p. (in Russian)
- [8] Mekhedov M.I., Sotnikov E.A., Kholodnyak P.S., Lobanov S.V. Perekhod k avtomatizirovannym informatsionno-upravlyayushchim sistemam operativnogo upravleniya perevozochnym protsessom v seti OAO «RZhD»: postanovka zadachi (Transition to automated information and control systems for operational management of the transportation process in the network of Russian Railways: problem statement). Vestnik VNIIZhT (Bulletin of VNIIZhT), 2024, vol. 83, no. 3, pp. 231-237. (in Russian)
- [9] Ugryumov A.K. Neravnomernost dvizheniya poyezdov (Irregularity of train traffic). Moscow, Transport Publ., 1968. 112 p. (in Russian)
- [10] Shenfeld K.P., Sotnikov E.A. Razvitiye metodov upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte v sovremennykh usloviyakh (Development of methods for managing the transportation process in railway transport in modern conditions). Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2015. 202 p. (in Russian)
- [11] Savin A.V., Borts A.I., Svyatozarova I.V., Doroshkevich A.A. Primeneniye kompozitnykh materialov na zheleznodorozhnom transporte (Application of composite materials in railway transport). Put i putevoye khozyaystvo (Track and Track Facilities), 2020, no. 1, pp. 15-17. (in Russian)
- [12] Doriamedov M.S., Daskovsky M.I., Skripachev S.Yu., Shein E.A. Polimernyye kompozitsionnyye materialy v zheleznodorozhnom transporte (Polymer composite materials in railway transport). Trudy VIAM (Proceedings of VIAM), 2016, no. 7 (42), pp. 113-117. (in Russian)
- [13] Dudorov E.A., Kudyukin V.V., Kotova K.A. Robototekhnicheskiye komplekсы obsluzhivaniya podvizhnogo sostava rossiyskikh zheleznnykh dorog (Robotic systems for maintenance of rolling stock of Russian railways). Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye (Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering), 2022, no. 9, pp. 3-15. DOI:10.18698/0536-1044-2022-9-3-15. (in Russian)
- [14] Gnezdilova Yu.S. Robototekhnika kak element chetvertoy promyshlennoy revolyutsii i perspektivy razvitiya robototekhniki v Rossii (Robotics as an element of the fourth industrial revolution and prospects for the development of robotics in Russia). Mezhdunarodnaya ekonomika (International Economy), 2019, no. 6, pp. 46-57. (in Russian)
- [15] Nekrasov G.Yu., Lyubimov E.Yu., Kudelin K.V. Ispolzovaniye elektricheskikh nakopiteley dlya povysheniya tyagovykh svoystv avtonomnykh lokomotivov (Use of electric storage devices to improve the traction properties of autonomous locomotives). Mir transporta (World of Transport), 2024, vol. 22, no. 1 (110), pp. 24-29. (in Russian)
- [16] Eliseikin E.I., Shchelokova A.O., Telezhkina K.I. 3D-pechat zapchastey lokomotivov (3D printing of locomotive spare parts). Zheleznodorozhnyy transport (Railway Transport), 2024, no. 7, pp. 42-44. (in Russian)

УДК 629.056.6

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-58-70

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Кузенков Е.А.^{1,1}, Решетникова И.В.^{2,2}

¹ Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), Ростов-на-Дону, Россия.

² Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия.

E-mail: ¹ kuzenkov98@mail.ru, ² irina_reshetnikova@mail.ru

Аннотация. В представленной статье описывается адаптивный алгоритм обработки измерений датчиков инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов. Представлены его словесное и аналитическое описания, а также проведено сравнение с существующими алгоритмами: экспоненциально взвешенным скользящим средним (программным фильтром нижних частот) и α - β фильтром. Новизна работы заключается в разработке адаптивного фильтра, который, в отличие от известных адаптивных скользящих средних (например, адаптивной скользящей средней Кауфмана), где коэффициент сглаживания определяется волатильностью либо иными статистическими характеристиками сигнала, использует усреднённую (посредством экспоненциально взвешенного скользящего среднего) разность измеренных значений сигнала для динамической настройки параметра фильтрации. Дополнительно реализована автоматическая компенсация запаздывания через экспоненциально сглаженную ошибку между отфильтрованным и исходным сигналом. Актуальность работы состоит в том, что предложенный алгоритм обеспечивает высокую точность сглаживания сигнала при высокой скорости реакции на изменения сигнала, что особенно важно для управления маневренными беспилотными аппаратами.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), инерциальные навигационные системы (ИНС), автономная навигация, МЭМС-датчики, акселерометр, обработка сигналов, фильтр нижних частот.

Введение

В современном мире использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) приобретает всё большую популярность и значимость, поскольку эти устройства находят широкое применение в самых различных сферах человеческой деятельности. В частности, они активно применяются в геодезии, где требуется высокая точность картографирования и измерений [1], в сельском хозяйстве – для автоматизированного мониторинга и обработки посевов [2], в логистике – для быстрого и эффективного перемещения грузов [3], а также в военной сфере – для разведки, патрулирования и выполнения специальных заданий [4].

Для цитирования:

Кузенков Е.А., Решетникова И.В. Адаптивный алгоритм обработки инерциальных измерений для высокоточных навигационных систем беспилотных объектов. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 58–70. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-58-70.

Эффективность выполнения их задач напрямую зависит от точности и безотказности работы навигационных систем. В современных условиях зачастую невозможно полагаться на постоянное и стабильное получение данных о положении от спутниковых и других рукотворных радионавигационных систем. Это особенно актуально в городских условиях с плотной застройкой, внутри зданий, в условиях радиоэлектронных помех или при активных боевых действиях, где спутниковые сигналы могут быть слабы, заблокированы или искажены средствами радиоэлектронной борьбы. В таких ситуациях на передний план выходит использование инерциальных навигационных систем (ИНС), работающих независимо от внешних источников информации и получающих данные со специальных датчиков, таких как гироскопы и акселерометры [5].

На сегодняшний день наиболее востребованными являются ИНС на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), примерами чему служат полетные контроллеры Pixhawk и MultiWii [6, 7]. На рисунке 1 представлено фото полетного контроллера MultiWii v2.5, со встроенным МЭМС-акселерометром/гироскопом:

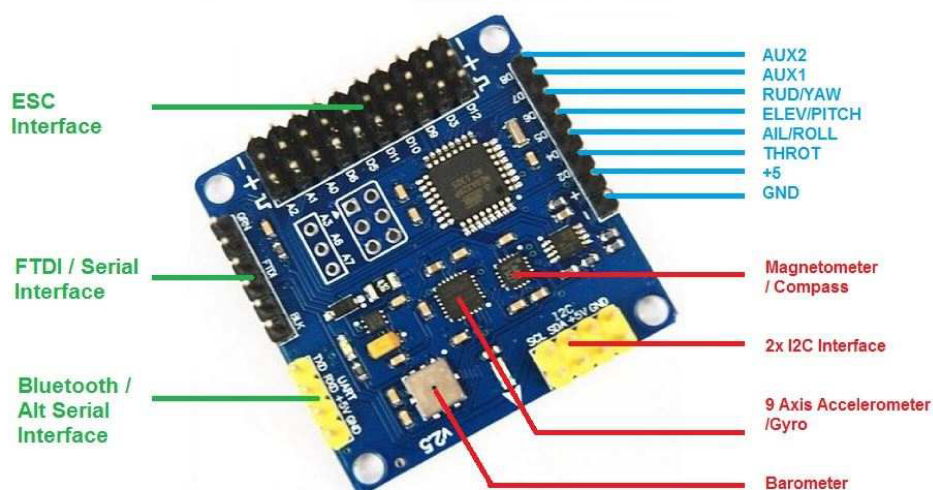


Рис. 1: Полетный контроллер MultiWii v2.5

Эти датчики, благодаря своим небольшим размерам, малому энергопотреблению и относительно низкой стоимости, нашли широкое применение во множестве платформ – от малых беспилотников до сложных многофункциональных систем, используемых в масштабных объектах [8, 9]. Их компактность позволяет надежно интегрировать ИНС в самые небольшие и легкие движущиеся платформы, что особенно важно при разработке миниатюрных беспилотных систем. Тем не менее, такие датчики обладают существенным недостатком – их чувствительность к внешним помехам и шумам, а также к долговременным эффектам накопления ошибок. В результате, данные с МЭМС-датчиков содержат значительные искажения, которые без подходящей обработки способны привести к серьезным погрешностям в оценке положения и движения [8].

1. Анализ современного состояния проблемы

Обработка «сырых» данных МЭМС-датчиков становится неотъемлемым этапом для повышения точности и устойчивости всей навигационной системы. В этом контексте широко применяются различные алгоритмы фильтрации, одним из самых популярных из которых является экспоненциально взвешенное скользящее среднее, программный фильтр нижних частот [10]:

$$\hat{x}_i = z_i \cdot k + \hat{x}_{i-1} \cdot (1 - k), \quad (1)$$

где z_i – измеренное значение сигнала на i -м шаге измерений; $\hat{x}_i$ и $\hat{x}_{i-1}$ – оценки значений сигнала на i -м и $(i - 1)$ -м шагах измерений; k – коэффициент сглаживания, $0 \leq k \leq 1$.

Основные его преимущества – простота реализации, низкая вычислительная сложность и возможность использования без необходимости хранения больших массивов данных, что актуально в условиях ограниченности вычислительных ресурсов. Однако, несмотря на очевидные преимущества, такой алгоритм сталкивается с серьезными ограничениями. Конкретно – его эффективность сильно зависит от значения коэффициента сглаживания, и зачастую возникает необходимость поиска баланса между точностью фильтрации и скоростью реакции алгоритма на изменения сигнала: малое значение коэффициента сглаживания ($k \approx 0, 1$) дает высокую точность сглаживания, но приводит к запаздыванию реакции алгоритма, например, на резкие маневры или внезапные воздействия. И наоборот, высокое значение коэффициента ($k \approx 0, 7$) заметно уменьшает точность сглаживания, но обеспечивает высокую скорость реакции. В большинстве случаев это приводит к задержкам и рассогласованию реального положения и оценки системы, что особенно критично при управлении маневренным беспилотником. В результате, при возникновении опасных ситуаций или экстремальных условий, стандартный экспоненциальный фильтр может не обеспечить своевременного реагирования, что ухудшает безопасность и эффективность эксплуатации аппарата.

В данной работе предложена модификация этого алгоритма, призванная повысить его адаптивность к резким изменениям значений выходных сигналов датчиков ИНС, и обеспечивающая при этом высокую точность сглаживания измерений.

2. Адаптивный коэффициент экспоненциально взвешенного скользящего среднего

Суть предлагаемой модификации алгоритма заключается в использовании адаптивного коэффициента сглаживания, значение которого зависит от значения параметра, характеризующего изменение значения сигнала во времени: значение коэффициента возрастает при полезных изменениях сигнала и стремится к нулю, если полезных изменений сигнала нет. В данной работе в качестве такого параметра d_i предлагается разность значений сигнала на текущем и предыдущем шагах измерений:

$$d_i = z_i - z_{i-1}, \quad (2)$$

где z_i и z_{i-1} – измеренные значения сигнала на i -м и $(i - 1)$ -м шагах измерений.

Однако, поскольку сигнал искажен шумом, «мгновенное» значение d_i не будет отражать реальной картины изменения сигнала. В таком случае, чтобы снизить влияние шума на значение d_i , предлагается использовать усредненное значение разности измерений $\bar{d}_i$, также вычисляемое при помощи экспоненциально взвешенного скользящего среднего:

$$\bar{d}_i = d_i \cdot k_{\Pi} + \bar{d}_{i-1} \cdot (1 - k_{\Pi}), \quad (3)$$

где k_{Π} – коэффициент сглаживания, $0 \leq k_{\Pi} \leq 1$.

Приведенный метод усреднения (3) аналогичен алгоритму (1), с той разницей, что здесь он используется для сглаживания данных об изменениях сигнала d . Выбор такого метода усреднения обусловлен его уже озвученными в первом разделе преимуществами (простота реализации, отсутствие необходимости использования массивов для накопления измерений).

Само по себе значение $\bar{d}_i$ не может выступать в качестве коэффициента сглаживания, поскольку множество значений коэффициента должно лежать в пределах от 0 до 1 [10]. Из этого следует, что для формирования значения адаптивного коэффициента сглаживания k_a необходима функция, область значений которой лежит в заданных пределах, и которая возрастает с увеличением $\bar{d}_i$ по модулю. Ниже приведен один из возможных вариантов такой функции:

$$k_a = \frac{|\bar{d}_i|}{C + |\bar{d}_i|}, \quad (4)$$

где C – константа, задающая неравенство $C + |\bar{d}_i| > |\bar{d}_i|$. Далее для повышения иллюстративности алгоритм рассмотрим при $C = 1$.

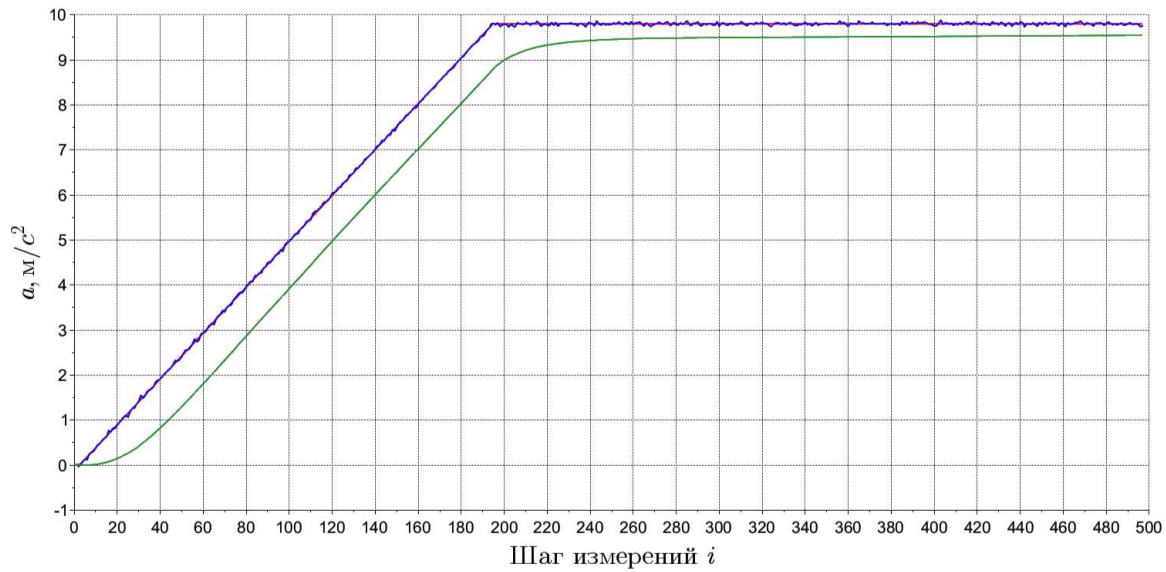
Окончательно рассчитанное значение коэффициента k_a подставляется в основную формулу алгоритма:

$$\hat{x}_i = z_i \cdot k_a + \hat{x}_{i-1} \cdot (1 - k_a) \quad (5)$$

Следует отметить, что использование усредненного значения скорости изменения сигнала $\bar{d}_i$ в качестве критерия подстройки значения коэффициента k_a приводит к запаздыванию реакции на изменения сигнала (пусть и значительно меньшему, чем при применении постоянного малого коэффициента), что проиллюстрировано на рисунке 2. В качестве тестового сценария выбран смоделированный сигнал, имитирующий поведение акселерометра gy-521 [11, 12] при изменении его угла наклона: значение сигнала (в данном случае – ускорение a , м/с²) изначально равно нулю, а затем в течение 5 секунд линейно возрастает до 9,8 м/с². Подробно суть используемой модели будет раскрыта в разделе 3, посвященном испытаниям алгоритма и сравнениям его с аналогами.

На представленном рисунке видно выраженное запаздывание работы алгоритма, о котором говорилось ранее. Такое поведение говорит о наличии систематической ошибки в работе алгоритма. Вызвано оно уже упомянутыми свойствами экспоненциально взвешенного скользящего среднего: значение $\bar{d}_i$ формируется при малом значении коэффициента сглаживания k_{Π} , что вызывает задержку реакции на полезные изменения сигнала в начале фронта. Иными словами, необходимо некоторое время для того, чтобы значение $\bar{d}_i$ начало отражать изменения сигнала.

Кроме того, на постоянном участке сигнала наблюдается убывающее смещение между истинными значениями сигнала и оценками фильтра, которое также вызвано задержкой реакции при полезных изменениях сигнала: поскольку оценка фильтра запаздывает во времени относительно истинного значения сигнала, значение $\bar{d}_i$ (а вместе с ним и значение коэффициента k_a) в конце фронта приходит к значению, близкому к нулю, раньше, чем оценка фильтра приблизится к истинному значению сигнала.



-
- Истинные значения сигнала (обозначим как x)
 - Искженные шумом измеряемые значения сигнала z ($\sigma = 0,03 \text{ м/с}^2$)
 - Оценки фильтра $\hat{x}$
-

Рис. 2: Результат обработки кусочно-линейного сигнала, искаженного шумом, при $k_{\Pi} = 0,04$

В качестве меры, частично решающей эту проблему, предлагается следующий подход:

- Вычисляется средняя разность между измеренным значением сигнала и оценкой алгоритма на шаге $i - 1$ (обозначим ее как $\bar{D}_i$, метод усреднения тот же – экспоненциально взвешенное скользящее среднее):

$$\bar{D}_i = (z_{i-1} - \hat{x}_{i-1}) \cdot k_{\kappa} + \bar{D}_{i-1} \cdot (1 - k_{\kappa}), \quad (6)$$

где k_{κ} – коэффициент сглаживания, $0 \leq k_{\kappa} \leq 1$;

- Полученное значение $\bar{D}_i$ подставляется в формулу коэффициента k_a :

$$k_a = \frac{|\bar{d}_i| + |\bar{D}_i|}{C + |\bar{d}_i| + |\bar{D}_i|} \quad (7)$$

Смысл модификации состоит в отслеживании появления рассмотренных выше смещений и запаздываний (сигналом чему выступает увеличение значения $\bar{D}_i$ по модулю) и повышении значения коэффициента k_a при их наличии. Результат работы фильтра с описанной модификацией представлен на рисунке 3.

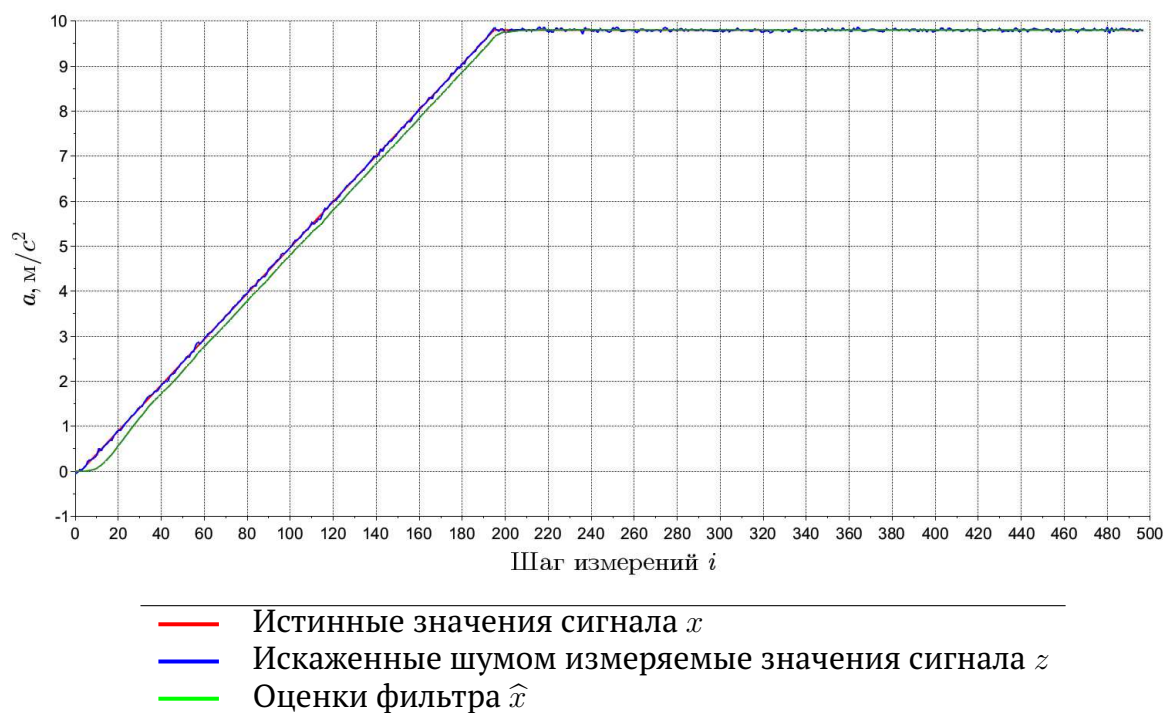


Рис. 3: Результат обработки кусочно-линейного сигнала, искаженного шумом, при помощи фильтра с описанной модификацией, при $k_{\Pi} = 0,04$ и $k_{\kappa} = 0,04$

Итоговый алгоритм выглядит следующим образом:

1. Нахождение разности измеренных значений сигнала d_i и нахождение усредненного значения разности измерений $\bar{d}_i$:

$$\bar{d}_i = (z_i - z_{i-1}) \cdot k_{\Pi} + \bar{d}_{i-1} \cdot (1 - k_{\Pi}) \quad (8)$$

2. Корректировка смещений и запаздываний сигнала относительно истинного значения, согласно формуле (6);
3. Формирование значения адаптивного коэффициента сглаживания k_a , согласно формуле (7);
4. Подстановка значения k_a в основное выражение алгоритма и усреднение измеренного значения сигнала z_i , согласно формуле (5).

3. Испытания алгоритма и сравнение с аналогами

Испытания разработанного алгоритма проводились на моделях сигнала, имитирующих выходные данные акселерометра gy-521 при измерении ускорения по оси X в диапазоне $\pm 2g$. В качестве модели помех измерения использовалась центрированная гауссовская последовательность n , характеризующаяся среднеквадратичным отклонением (СКО) σ_n , равным $0,03 \text{ м/с}^2$.

В формуле (9) приведено аналитическое выражение модели формирования искаженного шумом сигнала:

$$z_i = x_i + n_i, \quad (9)$$

где z_i – измерение значения сигнала на шаге измерения i ; x_i – истинное значение сигнала; n_i – шум, искажающий истинное значение сигнала.

Значение СКО шума выходного сигнала датчика было определено на основе анализа экспериментальных данных, полученных с реального устройства. Приближение истинного значения сигнала определялось как среднее арифметическое его измерений при 10000 измерений с периодом дискретизации сигнала $T = 26 \cdot 10^{-3}$ с. Измерения точности сглаживания производились при постоянном истинном значении сигнала, равном 0. Для параметров алгоритма выбраны следующие значения: $k_{\Pi} = 0,04$ и $k_k = 0,04$. В заданных условиях среднеквадратичное отклонение остаточного шума σ_o оказалось равным $0,00145$ м/с².

В рамках дальнейших исследований было проведено сравнение эффективности предложенного алгоритма с его аналогами. В качестве альтернативных методов были выбраны экспоненциально взвешенное скользящее среднее с постоянным коэффициентом сглаживания и α - β фильтр [13]. Целью такого сравнения было определить преимущества и недостатки каждого из алгоритмов в условиях идентичных начальных настроек.

Процедура сравнения включала этапы подбора параметров каждого алгоритма с целью достижения сопоставимой точности сглаживания при экспериментах с постоянным сигналом. Далее, каждый из алгоритмов тестировался на моделированном сигнале, который предназначен для имитации реальных условий эксплуатации акселерометра. В частности, сигнал моделировал изменение ориентации датчика относительно вертикальной оси. Изначально, сигнал был равен нулю, затем в течение одной секунды он линейно возрастает до значения $9,8$ м/с² – что соответствует изменению угла наклона датчика, при котором проекция ускорения свободного падения на ось чувствительности меняется от 0 до $9,8$ м/с². После достижения пика, сигнал удерживался на этом уровне в течение десяти секунд, что моделирует стабильное вертикальное положение датчика. Далее происходило его линейное снижение до нуля за одну секунду, после чего сигнал оставался на нулевом уровне в течение еще десяти секунд.

Данная модель служит имитацией ситуации, когда датчик изменяет свою ориентацию с горизонтальной на вертикальную (на 90°). Условия, заданные таким образом, позволяют провести объективную оценку скорости реакции каждого алгоритма на быстро меняющийся сигнал.

На рисунке 4 представлен результат обработки описанного сигнала предложенным адаптивным фильтром.

На рисунке 5 для наглядности представлен этот же случай в большем масштабе. Из рисунка 5 можно заметить, что при установлении постоянного значения сигнала алгоритму необходимо некоторое время для того, чтобы значение коэффициента k_a «стабилизировалось», т.е. стало близким к нулю.

Экспоненциально взвешенное скользящее среднее с постоянным коэффициентом сглаживания достигает необходимой точности сглаживания при $k = 0,011$. На рисунке 6 показан результат работы с переменным сигналом.

α - β фильтр достигает аналогичного результата по точности сглаживания в заданных условиях при следующих значениях параметров: $\alpha = 0,04$, $\beta = 0,008$. Результат работы α - β фильтра показан на рисунке 7.



Рис. 4: Фильтрация модели сигнала акселерометра при помощи предложенного алгоритма

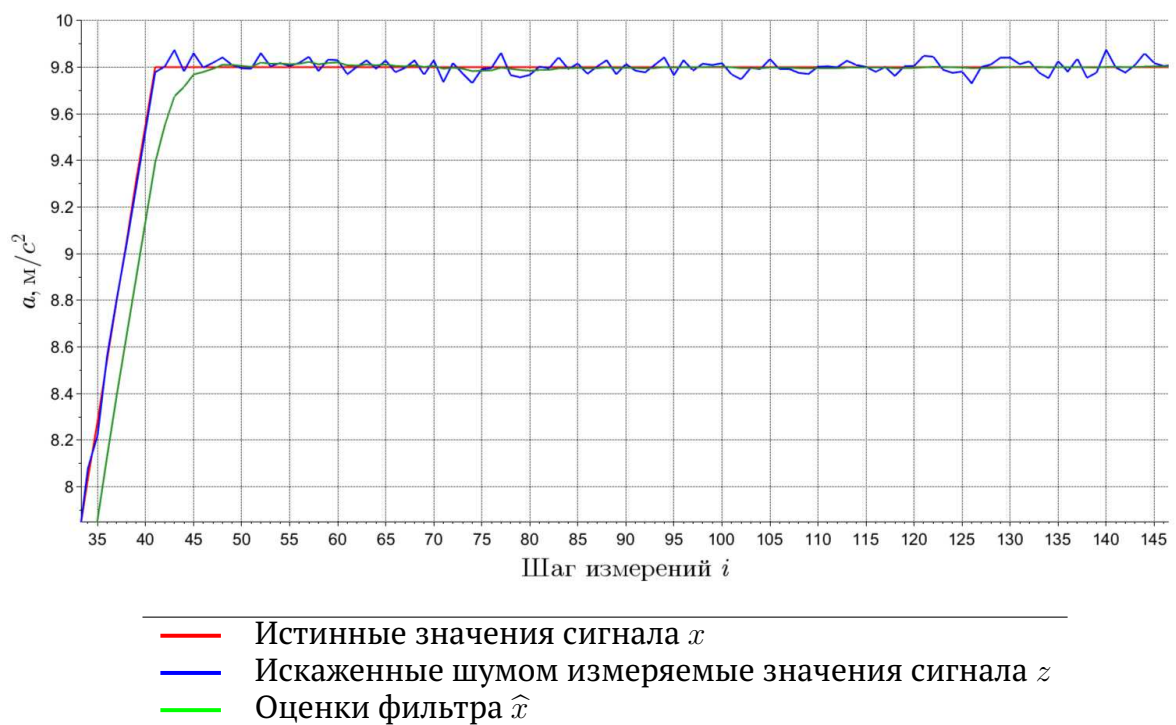


Рис. 5: Увеличенное изображение участков переходного процесса и статического состояния модели сигнала акселерометра с применением предложенного алгоритма фильтрации

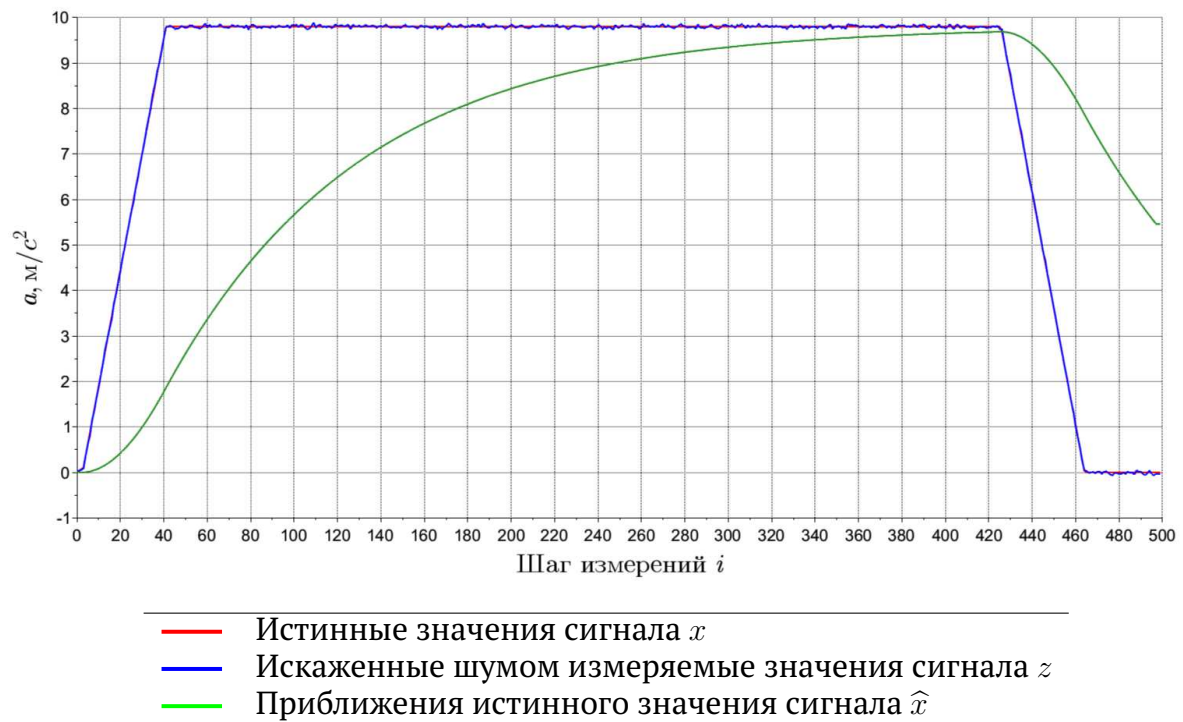


Рис. 6: Фильтрация модели сигнала акселерометра при помощи экспоненциально взвешенного скользящего среднего

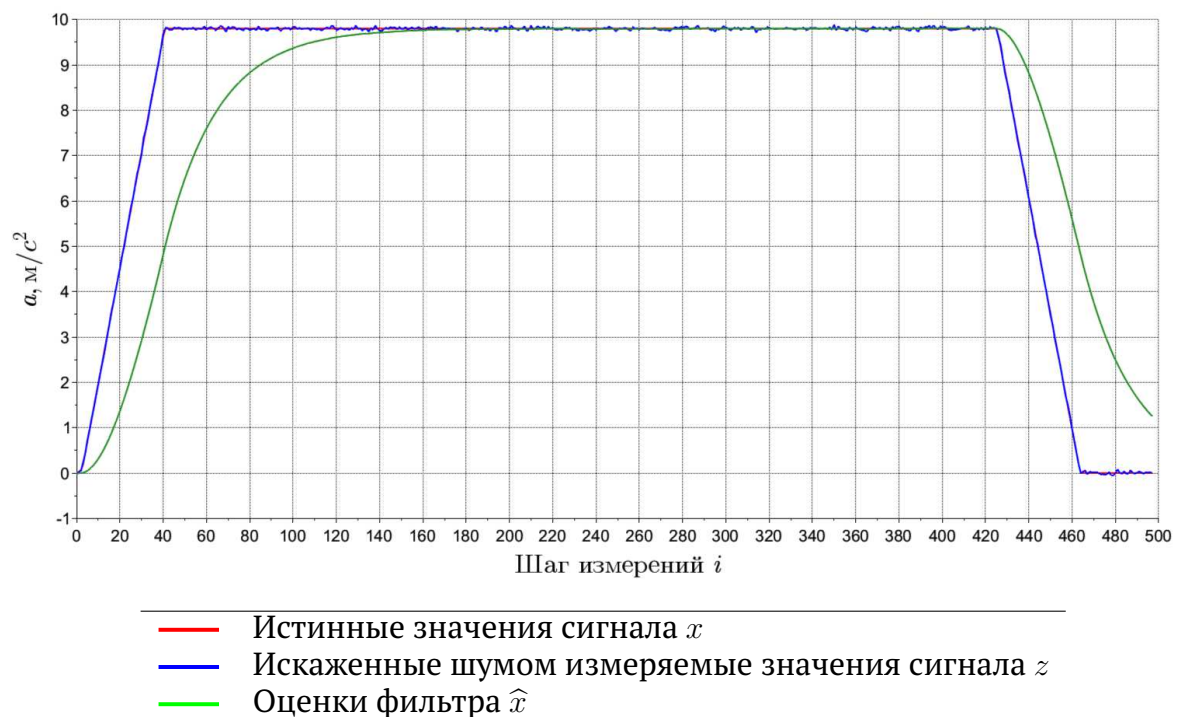


Рис. 7: Фильтрация модели сигнала акселерометра при помощи α - β фильтра

4. Обсуждение результатов

На основании анализа результатов проведённых экспериментов можно сделать вывод, что в условиях приведенных тестовых сценариев предложенный алгоритм демонстрирует превосходство по скорости реакции на изменения сигнала по сравнению с аналогичными методами, рассмотренными в работе. При этом важно отметить, что такой результат достигнут при сопоставимой точности сглаживания сигнала, что свидетельствует о сбалансированном сочетании быстродействия и стабильности работы алгоритма.

Заключение

В заданных условиях, по сравнению с рассмотренными аналогами, предложенный метод обеспечивает более оперативное реагирование на быстрые изменения сигнала без ущерба для качества обработки, что можно выделить как преимущество предложенного алгоритма.

К недостатку алгоритма можно отнести то обстоятельство, что в условиях большего СКО шума (относительно приведенного) уменьшается точность сглаживания. Так, в ходе экспериментов было выяснено, что при тех же значениях параметров, но при $\sigma_{ш} = 0,3 \text{ м/с}^2$, СКО остаточного шума σ_o оказалось равным $0,05 \text{ м/с}^2$. Иными словами, в проведенных испытаниях СКО шума уменьшилось приблизительно в 20 раз, а в условиях большего СКО – приблизительно в 6 раз (что нехарактерно для рассмотренных аналогов, у которых СКО остаточного шума составляет некоторую постоянную долю от СКО изначального шума). Связано это с тем, что увеличение шума сигнала приводит к увеличению ошибки определения значения $\bar{d}_i$ в статике, и, как следствие, ошибочному увеличению значения k_a . Частично этот недостаток решается уменьшением значений коэффициентов k_{Π} и k_k , а также масштабированием константы C из формулы (7). Однако следует учитывать, что уменьшение значений k_{Π} и k_k также увеличивает время реакции алгоритма на полезные изменения сигнала, а увеличение значения C делает алгоритм нечувствительным к малым изменениям сигнала.

Благодаря своей высокой адаптивности к резким и внезапным изменениям сигнала, предложенный алгоритм становится особенно востребованным для использования в качестве предварительного фильтра в системах определения угловой ориентации устройства. В частности, возможно его использование в комбинации со специальными алгоритмами, такими как комплементарный фильтр [14, 15] и фильтр Маджвика [16, 17, 18]. Такой комбинированный подход обеспечивает более точное и надёжное определение ориентации аппарата, что особенно важно в приложениях, где требуются высокая точность и оперативность реагирования.

В дальнейшей работе запланированы эксперименты по применению алгоритма совместно с комплементарным фильтром для предварительного сглаживания сигнала акселерометра, а также его применение к фильтрации выходного сигнала электронного компаса.

Список литературы

- [1] Турк Г.Г., Карачёв Н.К. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геодезии // Вектор ГеоНаук. – 2023. – № 6 (2). – С. 56-60. – DOI: 10.24412/2619-0761-2023-2-56-60.
- [2] Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чашин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Вестник ПФИЦ. – 2019. – № 2. – С. 47-51. – DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5.
- [3] Машненко Д.В. Перспективы использования БПЛА в логистике // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 6. – С. 168-171.
- [4] Барабанов О.Н., Наумова Е.В. Современный вооруженный конфликт: эволюция и влияние беспилотных летательных аппаратов // Россия в глобальном мире. – 2025. – Т. 28. – № 2. – С. 35-53. – DOI: 10.48612/RG/RGW.28.2.3.
- [5] Липанов И.Д., Хомоненко А.Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2024. – № 3. – С. 30-42.
- [6] MultiWii Multi-Copter Flight Control Board. – URL: https://wiki.geeetech.com/index.php/MultiWii_Multi-Copter_Flight_Control_Board (дата обращения: 08.07.2026).
- [7] Гурлев К.В. Обзор перспектив использования полетного контроллера Pixhawk PX4 для БПЛА малого класса // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2024. – Т. 3. – № 6 (75). – С. 1511-1514.
- [8] Голощапов А. Применение МЭМС-технологии в навигации // Датчики и компоненты. – 2014. – № 4. – С. 65-69.
- [9] Тимошенков С.П., Кульчицкий А.П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. – 2012. – № 6 (98). – С. 51-55.
- [10] Exponential Filter. – URL: https://gregstanleyandassociates.com/whitepapers/Fault_Diagnosis/Filtering/Exponential-Filter/exponential-filter.htm (дата обращения: 22.03.2026).
- [11] Акселерометр и гироскоп MPU6050. – URL: <https://cxem.net/mc/mc324.php> (дата обращения: 22.03.2026).
- [12] Родунер Д.Д. Измерение ускорения по трем координатам с акселерометра на базе микропроцессорной системы arduino // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2024. – Т. 3. – № 2 (71). – С. 557-562.
- [13] The Alpha-Beta Filter. – URL: <http://www.pennelynn.com/Documents/CUJ/HTML/93HTML/199301CC.HTM> (дата обращения: 22.03.2026).
- [14] Ермаков П.Г., Гоголев А.А. Программный комплекс алгоритмов автономного определения параметров угловой ориентации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. – 2022. – № 124. – С. 1-39. – DOI: 10.34759/trd-2022-124-17.
- [15] Зо Мьо Наин, Шагин А.В., Ле Винь Тханг, Хтин Линн У. Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микроэлектромеханической системы гироскопа и акселерометра // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 3.
- [16] Брич И.А. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации данных инерциальных датчиков // Политехнический молодежный журнал. – 2023. – № 2.
- [17] Madgwick Orientation Filter. – URL: <https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/filters/madgwick.html> (дата обращения: 22.03.2026).
- [18] Исса М., Ахмад А. Оценка ориентации с помощью слияния инерциальных данных на основе нелинейных фильтров (Махони и Мэдджвик) // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2024. – Т. 1. – № 11 (80). – С. 871-882.

ADAPTIVE INERTIAL MEASUREMENT PROCESSING ALGORITHM FOR HIGH-PRECISION NAVIGATION SYSTEMS OF UNMANNED OBJECTS

Kuzenkov E. A.^{1,1}, Reshetnikova I. V.^{2,2}

¹ Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Rostov-on-Don, Russia.

² Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russia.

E-mail: ¹ kuzenkov98@mail.ru, ² irina_reshetnikova@mail.ru

Abstract. The presented article describes an adaptive algorithm for processing measurements of sensors of inertial navigation systems of unmanned aerial vehicles. Its verbal and analytical descriptions are presented, as well as a comparison with existing algorithms: exponentially weighted moving average (software low-pass filter) and α - β filter. The novelty of the work lies in the development of an adaptive filter, which, unlike the well-known adaptive moving averages (for example, the Kaufman adaptive moving average), where the smoothing coefficient is determined by volatility or other statistical characteristics of the signal, uses the averaged (by means of an exponentially weighted moving average) difference of the measured signal values to dynamically adjust the filtering parameter. Additionally, automatic delay compensation is implemented through an exponentially smoothed error between the filtered and the original signal. The relevance of the work lies in the fact that the proposed algorithm ensures high accuracy of signal smoothing at a high response rate to signal changes, which is especially important for controlling maneuverable unmanned vehicles.

Keywords: *unmanned aerial vehicles (UAVs), inertial navigation systems (INS), autonomous navigation, MEMS sensors, accelerometer, signal processing, low-pass filter.*

References

- [1] Turk G.G., Karachev N.K. Ispolzovaniye bespilotnykh letatelnykh apparatov (BPLA) v geodezii (Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in geodesy). *Vektor GeoNauk (Vector of Geo Sciences)*, 2023, no. 6 (2), pp. 56-60. DOI: 10.24412/2619-0761-2023-2-56-60. (in Russian)
- [2] Zubarev Yu.N., Fomin D.S., Chashchin A.N., Zabolotnova M.V. Ispolzovaniye bespilotnykh letatelnykh apparatov v selskom khozyaystve (Use of unmanned aerial vehicles in agriculture). *Vestnik PFITs (Bulletin of PFIC)*, 2019, no. 2, pp. 47-51. DOI: 10.7242/2658-705X/2019.2.5. (in Russian)
- [3] Mashnenkov D.V. Perspektivy ispolzovaniya BPLA v logistike (Prospects for the use of UAVs in logistics). *Innovatsii i investitsii (Innovations and Investments)*, 2023, no. 6, pp. 168-171. (in Russian)
- [4] Barabanov O.N., Naumova E.V. Sovremennyy vooruzhennyy konflikt: evolyutsiya i vliyaniye bespilotnykh letatelnykh apparatov (Modern armed conflict: evolution and impact of unmanned aerial vehicles). *Rossiya v globalnom mire (Russia in the Global World)*, 2025, vol. 28, no. 2, pp. 35-53. DOI: 10.48612/RG/RGW.28.2.3. (in Russian)
- [5] Lipanov I.D., Khomonenko A.D. Tekhnologii i metody planirovaniya peremeshcheniya BPLA po marshrutnym tochkam (Technologies and methods for planning UAV movement along waypoints). *Intellektualnyye tekhnologii na transporte (Intelligent Technologies in Transport)*, 2024, no. 3, pp. 30-42. (in Russian)

For citation:

Kuzenkov E. A., Reshetnikova I. V. Adaptive inertial measurement processing algorithm for high-precision navigation systems of unmanned objects. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 58-70. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-58-70. (in Russian)

- [6] MultiWii Multi-Copter Flight Control Board. – URL: https://wiki.geeetech.com/index.php/MultiWii_Multi-Copter_Flight_Control_Board (accessed 08.07.2026). (in Russian)
- [7] Gurlev K.V. Obzor perspektiv ispolzovaniya poletnogo kontrollera Pixhawk PX4 dlya BPLA malogo klassa (Review of prospects for using the Pixhawk PX4 flight controller for small-class UAVs). Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «VESTNIK NAUKI» (International Scientific Journal «Bulletin of Science»), 2024, vol. 3, no. 6 (75), pp. 1511-1514. (in Russian)
- [8] Goloshchapov A. Primeneniye MEMS-tehnologii v navigatsii (Application of MEMS technology in navigation). Datchiki i komponenty (Sensors and Components), 2014, no. 4, pp. 65-69. (in Russian)
- [9] Timoshenkov S.P., Kulchitskiy A.P. Primeneniye MEMS-sensorov v sistemakh navigatsii i orientatsii podvizhnykh ob'yektov (Application of MEMS sensors in navigation and orientation systems for moving objects). Izvestiya vuzov. ELEKTRONIKA (Proceedings of Universities. Electronics), 2012, no. 6 (98), pp. 51-55. (in Russian)
- [10] Exponential Filter. URL: <https://gregstanleyandassociates.com/whitepapers/FaultDiagnosis/Filtering/Exponential-Filter/exponential-filter.htm> (accessed 22.03.2026).
- [11] Akselerometr i giroskop MPU6050 (Accelerometer and gyroscope MPU6050). URL: <https://cxem.net/mc/mc324.php> (accessed 22.03.2026). (in Russian)
- [12] Roduner D.D. Izmereniye uskoreniya po trem koordinatam s akselerometra na baze mikroprotsessornoy sistemy arduino (Measurement of acceleration in three coordinates from an accelerometer based on the Arduino microprocessor system). Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «VESTNIK NAUKI» (International Scientific Journal «Bulletin of Science»), 2024, vol. 3, no. 2 (71), pp. 557-562. (in Russian)
- [13] The Alpha-Beta Filter. URL: <http://www.pennelynn.com/Documents/CUJ/HTML/93HTML/199301CC.HTM> (accessed 22.03.2026).
- [14] Ermakov P.G., Gogolev A.A. Programmnyy kompleks algoritmov avtonomnogo opredeleniya parametrov uglovoy orientatsii bespilotnykh letatelnykh apparatov (Software complex of algorithms for autonomous determination of angular orientation parameters of unmanned aerial vehicles). Trudy MAI (Proceedings of MAI), 2022, no. 124, pp. 1-39. DOI: 10.34759/trd-2022-124-17. (in Russian)
- [15] Zo Myo Naing, Shagin A.V., Le Vinh Thang, Htin Lynn U. Komplementarnyy filtr dlya otsenki ugla s ispolzovaniyem mikroelektromekhanicheskoy sistemy giroskopa i akselerometra (Complementary filter for angle estimation using a microelectromechanical system gyroscope and accelerometer). Inzhenernyy vestnik Dona (Engineering Bulletin of the Don), 2020, no. 3. (in Russian)
- [16] Brich I.A. Sravnitelnyy analiz algoritmov filtratsii dannykh inertialnykh datchikov (Comparative analysis of filtering algorithms for inertial sensor data). Politekhicheskii molodezhnyy zhurnal (Polytechnic Youth Journal), 2023, no. 2. (in Russian)
- [17] Madgwick Orientation Filter. URL: <https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/filters/madgwick.html> (accessed 22.03.2026).
- [18] Issa M., Ahmad A. Otsenka orientatsii s pomoshchyu sliyaniya inertialnykh dannykh na osnove ne-lineynykh filtrov (Makhoni i Madzhvik) (Orientation estimation using inertial data fusion based on nonlinear filters (Mahony and Madgwick)). Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «VESTNIK NAUKI» (International Scientific Journal «Bulletin of Science»), 2024, vol. 1, no. 11 (80), pp. 871-882. (in Russian)

УДК 656.13

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-71-91

МЕТРИКИ ДОСТОВЕРНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ИНЦИДЕНТОВ ПОДСИСТЕМОЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ИНЦИДЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Свистельников А.А.^{1,1}, Малихина П.В.^{1,2}, Торопов Н.Ю.^{1,3}

¹ Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт» (ФАН «РОСДОРНИИ»), Москва, Россия.

E-mail: ¹ svistelnikovaa@rosdornii.ru, ² malykhinapv@rosdornii.ru, ³ toropov@rosdornii.ru

Аннотация. В статье исследуется проблема оценки достоверности функционирования подсистем выявления дорожных инцидентов (ПВДИ) на основе технологии компьютерного зрения. Отмечается, что действующая нормативно-техническая база Российской Федерации, включая ГОСТ Р 71159-2023, не содержит количественных критериев оценки эффективности выявления инцидентов, что затрудняет валидацию систем и сопоставление решений различных производителей. Внутренние параметры «достоверности» в программных комплексах не поддаются независимой верификации, а точность пространственно-временной привязки зависит от множества факторов, снижающих надежность учета событий. Цель статьи: определение ключевых метрик оценки функциональных характеристик ПВДИ и обоснование их пороговых значений на основе анализа технологических возможностей, эксплуатационных требований и международного опыта. В результате проведенной работы была разработана система взаимодополняющих метрик, включающая полноту обнаружения, точность детектирования, ошибки классификации и уровень ложных срабатываний. А также предложены критерии, рекомендованные в качестве методологической основы для формирования нормативно-технических требований к ПВДИ.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, выявление дорожных инцидентов, компьютерное зрение, метрики оценки эффективности, достоверность выявления.

Введение

Подсистема выявления дорожных инцидентов (далее – ПВДИ) в составе интеллектуальных транспортных систем (далее ИТС) предназначена для автоматизированного обнаружения, верификации, локализации и классификации событий, влияющих на безопасность и устойчивость дорожного движения. Результаты работы такой подсистемы используются операторами центров управления дорожным движением, смежными подсистемами ИТС и внешними информационными системами. На рисунке 1 представлено место ПВДИ в функциональной архитектуре ИТС.

Для цитирования:

Свистельников А.А., Малихина П.В., Торопов Н.Ю. Метрики достоверности выявления дорожных инцидентов подсистемой выявления инцидентов на основе технологии компьютерного зрения. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 71–91. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-71-91.

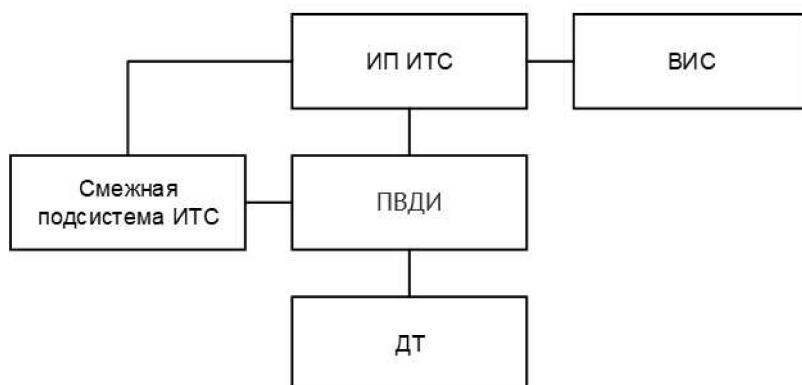


Рис. 1: Место ПВДИ в функциональной архитектуре ИТС

По результатам проведения испытаний подсистемы выявления дорожных инцидентов, проведенных ФАУ «РОСДОРНИИ» на Пилотной зоне ИТС в Республике Татарстан [1] представляющей собой комплекс технологического оборудования и программного обеспечения, предназначенный для проведения исследований и испытаний технологий ИТС, а также анализа эксплуатационных характеристик систем видеоаналитики, была выявлена необходимость формирования комплекса количественных критериев (метрик) для оценки функциональных характеристик ПВДИ, в частности функции выявления дорожных инцидентов.

Целью статьи является формирование системы ключевых метрик (полнота, точность и др.) оценки достоверности функционирования ПВДИ и обоснование их пороговых значений на основе анализа технологических возможностей, эксплуатационных требований и международного опыта. ПВДИ представляет собой подсистему ИТС, реализующую функции автоматического обнаружения нестандартных ситуаций: аварийных остановок, выезда на полосу встречного движения, появления препятствий на проезжей части, движения задним ходом в запрещённых зонах и иных событий, непосредственно влияющих на безопасность и пропускную способность улично-дорожной сети.

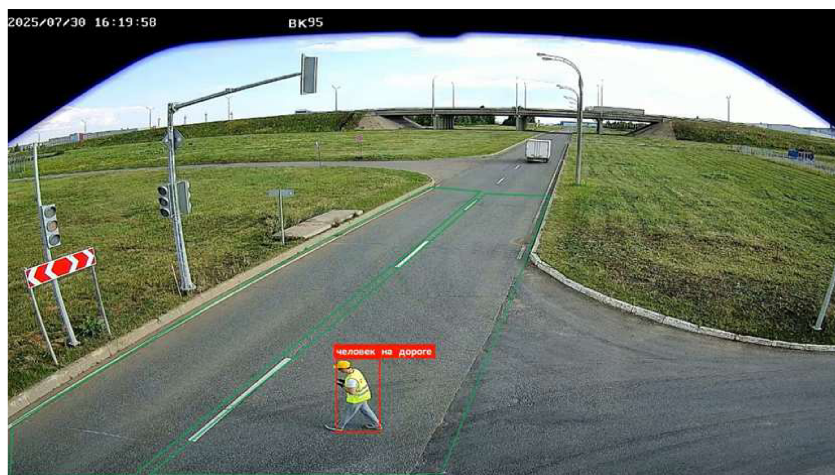


Рис. 2: Пример работы ПВДИ

В действующей нормативно-технической и правовой базе Российской Федерации, регулирующей сферу интеллектуальных транспортных систем (далее – ИТС), отсутствуют требования к показателям достоверности распознавания инцидентов. Несмотря на наличие стандарта ГОСТ Р 71159-2023¹, определяющего общие принципы построения и функционирования подсистемы выявления дорожных инцидентов, не установлены количественные критерии оценки выполнения основной функции подсистемы – выявление инцидентов. Это создает предпосылки для неоднозначной интерпретации функциональных возможностей систем, а также затрудняет сопоставление решений различных производителей и выбор оптимальных конфигураций при проектировании и внедрении ИТС [2].

Номинально в интерфейсах программных комплексов может присутствовать параметр, обозначаемый как «достоверность» или «уровень достоверности», однако его значение формируется внутренними алгоритмами обработки данных и не поддается прямой интерпретации или верификации. Ввиду того, что алгоритмическая логика работы систем видеоаналитики, включая методы классификации объектов, трекинга и принятия решений, является тяжело доступной или вовсе недоступной для независимого анализа, использование указанного параметра в качестве основы для оценки эффективности ПВДИ не представляется возможным.

Особое внимание требует вопрос пространственно-временной привязки инцидентов, который напрямую влияет на достоверность и полноту учета событий. В современных системах привязка осуществляется на основе геометрической калибровки видеопотока по координатам камеры, а также с использованием данных от внешних источников – ГЛОНАСС/GPS-треков транспортных средств или радиолокационных детекторов. Однако точность локализации инцидента в пространстве зависит от множества факторов: угла обзора камеры, искажений объектива, высоты установки, а также синхронизации времени между различными узлами системы. В условиях плотной застройки, сложной конфигурации проезжей части или при использовании поворотных камер возникают систематические погрешности, снижающие надежность привязки. Кроме того, инциденты, происходящие вне зоны видимости камер или в «слепых зонах», могут не фиксироваться либо фиксироваться с существенной временной задержкой, что искажает картину динамики транспортного потока и снижает оперативность реагирования.

В этих условиях актуальным становится проведение комплексного анализа текущего состояния методов автоматического обнаружения инцидентов, включая оценку применяемых алгоритмов видеоаналитики, методов пространственно-временной привязки событий, а также выявление ключевых факторов, влияющих на достоверность распознавания.

В целях разработки научно-обоснованных предложений по определению показателя или группы показателей, характеризующих достоверность выявления дорожных инцидентов и его граничных значений, проводится:

- анализ существующих подходов к автоматическому обнаружению и пространственно-временной привязки инцидентов на основе видеоаналитики (раздел 1);

¹ГОСТ Р 71159-2023. Интеллектуальные транспортные системы. Подсистема выявления дорожных инцидентов. Общие требования. – М.: Российский институт стандартизации, 2024

- анализ существующих практик и исследований по достижимым уровням функциональной корректности при тестировании существующих систем выявления инцидентов на базе видеоаналитики (раздел 2);
- разработка предложений по определению критериев достоверности выявления дорожных инцидентов ПВДИ (раздел 3);
- формирование результирующих значений критериев достоверности выявления дорожных инцидентов ПВДИ (раздел 4).

1. Анализ применяемых методов автоматического обнаружения и методов пространственно-временной привязки инцидентов на основе видеоаналитики

В современных ПВДИ ключевую роль в автоматизации процесса детектирования инцидентов на автомобильных дорогах играют технологии видеоаналитики. Основой функционирования таких систем является комплексный алгоритмический подход, включающий последовательное или параллельное применение нескольких взаимосвязанных процедур обработки видеопотока, каждая из которых направлена на решение определенной аналитической задачи в рамках программного обеспечения.

На текущий момент в практике эксплуатации систем видеоаналитики, применяемых в составе ПВДИ, выделяются следующие функции:

1. Обнаружение (детекция) объектов определенного класса на отдельном кадре. Данный этап является фундаментальным для последующих процедур анализа. Современные алгоритмы видеоаналитики позволяют классифицировать объекты по заранее определенным категориям, которые включают транспортные средства, пешеходов, животных, препятствия на проезжей части (включая выпавший или просыпанный груз), а также последствия стихийных явлений (камнепад, затопление) [3]. Эффективность детекции зависит от разрешения видеопотока, условий освещения, угла обзора камеры и степени загруженности обрабатываемого кадра.
2. Построение траектории движения каждого отдельного объекта по серии кадров. На основе данных детекции выполняется построение траектории объектов, что позволяет отслеживать их перемещение во времени и пространстве. Данный процесс особенно важен при анализе поведения транспортных средств в условиях плотного транспортного потока, а также при выявлении аномальных маневров, таких как резкое торможение, объезд препятствия или движение задним ходом.
3. Измерение параметров движения отдельных объектов. К числу измеряемых параметров относятся скорость, ускорение, направление движения и продолжительность нахождения объекта в определенной зоне. Эти данные используются для распознавания таких инцидентов, как превышение скорости, остановка в запрещенной зоне, движение по встречной полосе или по велосипедной дорожке.

4. Измерение параметров транспортного потока. Включает в себя подсчет интенсивности движения – количества транспортных средств, пересекающих виртуальную линию или находящихся в заданной зоне наблюдения за единицу времени. Анализ динамики потока позволяет выявлять косвенные признаки инцидентов, такие как внезапное снижение скорости, формирование затора или неравномерное распределение интенсивности по полосам движения.

Указанные процедуры, как правило, комбинируются в зависимости от типа распознаваемого инцидента. Например, обнаружение дорожно-транспортного происшествия (далее – ДТП) может основываться на взвешенной сумме нескольких признаков: остановка транспортного средства в полосе движения, резкое снижение скорости, изменение конфигурации транспортного потока, появление посторонних объектов на проезжей части. Порог срабатывания в таких системах задается эвристически и может быть настроен пользователем в зависимости от специфики участка дороги и требований к чувствительности.

Основной процедурой для ПВДИ на базе видеоаналитики в настоящее время является «Обнаружение (детекция) объектов определенного класса на отдельном кадре». В современных алгоритмах ПВДИ все, как правило, строится на ее основе. При этом в зависимости от требуемого вида инцидента к автоматическому обнаружению добавляется определенный класс или классы объектов.

К алгоритмам обнаружения в рассматриваемой области формально можно отнести алгоритмы детекции объектов на изображении. Классификация в таких алгоритмах неразрывно связана с локализацией. Различают две разновидности методов:

1. Двухэтапный метод, или «метод, основанный на регионах» – подход, разделенный на два этапа. На первом этапе селективным поиском или с помощью специального слоя нейронной сети выделяются регионы интереса. На втором этапе выбранные области рассматриваются классификатором для определения принадлежности исходным классам и регрессором, уточняющим местоположение ограничивающих рамок.
2. Одноэтапный метод – подход, не использующий отдельный алгоритм для генерации регионов, вместо этого предсказывающий координаты определенного количества ограничивающих рамок с различными характеристиками, такими как результаты классификации и степень уверенности, и в дальнейшем корректирующий местоположение рамок.

Одноэтапные методы видеоаналитики используются для высокодинамичных сцен, характерных для транспортного потока. Рассмотрим использование такого метода на примере алгоритма «YOLO (You Only Look Once)» [4], который предназначен для обработки видеопотока в режиме реального времени и обеспечивает высокую скорость анализа за счет выполнения всех этапов обработки – от генерации регионов интереса до классификации и локализации – в рамках единого прохода нейронной сети.

Алгоритм YOLO разделяет входное изображение на сетку ячеек и для каждой ячейки предсказывает число ограничивающих рамок, ассоциированных с ними вероятностями принадлежности к определенному классу и показателем достоверности [4].

Выходные данные алгоритма представляют собой структурированный набор векторов, каждый из которых включает:

- Координаты ограничивающей рамки в нормализованном формате: (x – координата, y – координата, глубина, высота).
- Класс объекта – категория обнаруженного объекта, такая как «автомобиль», «пешеход», «грузовик», «мотоцикл» и др.
- Показатель достоверности – скалярное значение в диапазоне от 0 до 1, отражающее степень уверенности алгоритма в корректности детекции объекта в пределах рамки.

Результат работы алгоритма YOLO представляет собой список детектированных объектов, каждый из которых описывается набором параметров.

В задачах, требующих высокой точности пространственной локализации объектов и детального анализа сцены, применяются двухэтапные методы детекции, среди которых наиболее развитым и широко используемым является семейство алгоритмов Region-based CNN (R-CNN) [5].

Алгоритм R-CNN реализует двухэтапный подход к детекции объектов [6]:

1. Генерация регионов-предложений – на первом этапе с использованием специализированных модулей выделяются потенциальные области интереса.
2. Классификация и уточнение положения – на втором этапе каждый из предложенных регионов подвергается анализу с помощью сверточной нейронной сети.

Сравнительная характеристика основных подходов к детекции объектов – одноэтапных (например, YOLO) и двухэтапных (например, R-CNN) методов – по ключевым параметрам, связанных с пространственной локализацией, представлена в таблице 1.

Таблица 1: Сравнение характеристик алгоритмов YOLO и R-CNN

Параметр	YOLO	R-CNN
Скорость работы алгоритма	45-155 FPS (YOLOv8)	5-7 FPS (Faster R-CNN)
Точность локализации	Средняя (ошибка 5-10%)	Высокая (ошибка 2-5%)
Сегментация	Нет (кроме YOLO ACT)	Да (Mask R-CNN)
Использование	Реальное время	Высокоточная локализация

Методы пространственной привязки предназначены для перехода от пиксельных координат к геопространственным. Применяются следующие подходы:

1. Геометрическая привязка по калиброванной камере (точность 0.2-1.0 м).
2. Использование эталонных ориентиров (точность 0.5-2 м).
3. Перспективное преобразование (точность 0.5-3 м).
4. Определение положения с использованием 3D-моделей объектов (точность до 1 м).

Для оценки точности локализации в координатах изображения используется метрика Intersection over Union (IoU), рассчитываемая по следующей формуле:

$$IoU = \frac{S(A \cap B)}{S(A \cup B)}, \quad (1)$$

где A – предсказанная системой ограничивающая рамка, B – эталонная (истинная) рамка.

Метрика принимает значения от 0 до 1:

- $IoU = 0$ – рамки не пересекаются,
- $IoU = 1$ – рамки полностью совпадают.

Как правило, детекция считается корректной при $IoU \geq 0.5$ и верной классификации объекта.

Точность временной привязки определяется погрешностью часов устройства, синхронизацией с NTP/PTP-серверами, временем обнаружения и верификации.

Исходя из вышесказанного, эффективность ПВДИ определяется компромиссом между скоростью обработки (одноэтапные методы) и точностью локализации (двухэтапные методы), а также корректностью реализации методов геопривязки и временной синхронизации.

Таким образом, рассмотренные алгоритмические подходы и методы пространственно-временной привязки непосредственно определяют достижимые значения ключевых метрик достоверности функционирования ПВДИ. В частности, выбор между одноэтапными (YOLO) и двухэтапными (R-CNN) архитектурами формирует компромисс между скоростью обработки и точностью локализации объектов, что напрямую влияет на показатели полноты и точности обнаружения инцидентов. Пороговое значение показателя уверенности детекции, формируемое на выходе нейронной сети, определяет баланс между долей ложноотрицательных результатов и количеством ложноположительных результатов. Качество классификации объектов и корректность методов геопривязки, в свою очередь, обуславливают уровень ошибок классификации инцидентов и точность их пространственно-временной локализации. Указанные взаимосвязи обосновывают необходимость комплексной системы метрик, формируемой в разделе 3.

2. Анализ существующих практик и исследований по функциональной корректности систем

Оценка достоверности в реальных условиях требует анализа данных независимых испытаний. В рамках проекта «Testing and Evaluation of Thermal Camera-based and Video-analytic Systems»² системы тестировались на мостах Саншайн-Скайвей и Говарда Франкланда Система на основе тепловизионного анализа показала точность обнаружения пешеходов – 100%, остановленного транспортного средства (далее – ТС) – 94.3%, движения по встречной полосе – 100%. Система видеоаналитики показала точность обнаружения ДТП – 84.6%.

²Testing and Evaluation of Thermal Camera-based and Video-analytic Systems on Wrong-Way Driving, Stopped Vehicles, and Pedestrians. – URL: <https://www.cutr.usf.edu/wp-content/uploads/2020/06/Testing-and-Evaluation-of-Thermal-Camera-based-and-Video-analytic-Systems-on-Wrong-Way-Driving-Stopped-Vehicles-and-Pedestrians.pdf>

Исследование Департамента транспорта Флориды (FDOT) было направлено на оценку систем обнаружения движения в неверном направлении [7]. Испытания проводились по нескольким сценариям (дневные/ночные условия, имитация движения в неверном направлении). Результаты показали, что системы способны обеспечивать высокий уровень обнаружения (точность выявления инцидентов до 93.78%, фактическая точность до 97.93%) при корректной настройке, но их эффективность снижается в условиях слабого освещения. Статистический анализ подтвердил значимое влияние выбора поставщика на функциональные характеристики.

Исследование «Next Generation Traffic Data and Incident Detection from Video» (Preisen and Deeter, 2014) [8] оценивало эффективность систем в задачах измерения параметров потока и обнаружения инцидентов. Точность подсчета интенсивности составила 83-91%, измерения скорости – 94-98%. Точность классификации ТС варьировалась от 56% (небольшие грузовики, день) до 87% (легковые автомобили, день), снижаясь в ночное время. Подтвержденные срабатывания на остановившиеся ТС и посторонние предметы составили 72% (ложные срабатывания – 23%), неопределенные случаи составили 5%.

Формирование обоснованных нормативных значений требует учета двух взаимодополняющих аспектов:

1. Технологической реализуемости, определяемой достижимыми характеристиками систем видеоаналитики, предлагаемыми производителями и разработчиками;
2. Эксплуатационной целесообразности, отражающей практические потребности и операционные возможности пользователей – операторов центров управления дорожным движением и служб реагирования.

Для обеспечения баланса между этими аспектами в рамках настоящего исследования был применен метод экспертного анкетирования, направленный на системное сопоставление технологических возможностей и операционных требований. В качестве экспертов выступили 16 организаций разработчиков соответствующих технологий и ПВДИ. В ходе работы была сформирована опросная форма производителей подсистем видеоаналитики, включающая в себя информацию о следующих метриках: полнота, точность, ошибки классификации, среднее время обнаружения и ложные срабатывания.

По результатам ранжирования параметров качества были получены следующие приоритеты:

- коэффициент правильного обнаружения (включающий в себя полноту, точность, ошибки классификации) – высший приоритет (7 организаций);
- среднее время обнаружения – средний приоритет;
- частота ложных срабатываний – низший приоритет.

Выявлена четкая корреляция между временем обнаружения и ожидаемым уровнем полноты:

- для 70% обнаружения: 30-60 секунд;
- для 80% обнаружения: 30-90 секунд;

- для 90% обнаружения: 5-120 секунд.

Это свидетельствует о готовности производителей увеличивать время анализа для достижения более высокой полноты обнаружения.

В части нагрузки на оператора допустимое количество сигналов об инциденте в час варьируется от 1-3 до более 20, а допустимое число ложных срабатываний – от 0 до 2-5 в час. Некоторые производители отметили, что современные ПВДИ должны функционировать в автоматическом режиме без постоянного участия оператора.

Для определения эксплуатационной целесообразности и операционных потребностей конечных пользователей было проведено анкетирование операторов центров управления дорожным движением и служб реагирования, использующих данные от ПВДИ.

Выявлены две группы подходов к определению требований:

- Базовый уровень (полнота и точность $\geq 70\%$): характерен для систем с узкой функциональностью;
- Высокий уровень (полнота и точность $\geq 90-95\%$): предъявляется операторами крупных центров организации дорожного движения, где критична достоверность для принятия управленческих решений.

На основании экспертного анкетирования получены следующие усредненные значения по показателям, представленные в таблице 2.

Таблица 2: Усредненные значения по показателям

Показатель	Среднее	Медиана
Полнота	83.6%	90%
Точность	82.1%	80%
Ошибки классификации	5.9%	5%
Ложные срабатывания	5.1%	5%

Общие выводы анализа практик:

- Достижимые показатели эффективности сильно зависят от условий эксплуатации (освещенность, погода, плотность потока).
- Критическим параметром является частота ложных срабатываний, влияющая на доверие операторов.
- Для объективной оценки необходимы стандартизированные сценарии испытаний и комплекс метрик.

3. Разработка предложений по определению метрик достоверности выявления дорожных инцидентов

Современные подсистемы выявления дорожных инцидентов на основе видеоаналитики представляют собой сложные человеко-машинные системы, эффективность функционирования которых, по результатам анализа, проведенного в предыдущих разделах, определяется совокупностью характеристик обнаружения, классификации и пространственно-временной привязки событий. Существующая нормативно-техническая база Российской Федерации не содержит количественных критериев оценки функционирования таких систем, что создает значительные сложности при их валидации и проведении сравнительного анализа.

В этих условиях возникает необходимость разработки единообразной, прозрачной и измеримой системы метрик, позволяющей осуществлять комплексную оценку функционирования ПВДИ в части выявления дорожных инцидентов. Поэтому для объективной оценки достоверности ПВДИ предлагается использовать набор взаимодополняющих метрик, каждая из которых отражает отдельный аспект качества функционирования. В качестве методологической основы предлагается использовать положения ГОСТ Р 59898-2021³, который формализует подходы к оценке систем, использующих ИИ-технологии, в том числе на основе показателей точности, полноты, работоспособности и интерпретируемости результатов. Однако подходы и метрики требуют адаптации и корректного описания в соответствии со спецификой ИТС и ПВДИ.

На основе теории бинарной классификации и с учетом специфики предметной области (наличие многоклассовой классификации инцидентов) предложена следующая типология результатов обработки видеопотока [9]:

1. Истинно положительный результат (далее – ИП) – дорожный инцидент присутствовал в зоне наблюдения и был выявлен системой.
2. Ложноположительный результат (далее – ЛП) – система сгенерировала событие при фактическом отсутствии инцидента.
3. Ложноотрицательный результат (далее – ЛО) – инцидент произошел, но не был зафиксирован системой.

Дополнительно выделяются показатели:

- Ошибка классификации (далее – ОК) – инцидент был обнаружен, но его тип определен неверно.
- Ложное срабатывание (далее – ЛС) – ложноположительный результат ПВДИ в контексте эксплуатации системы.

На основе данной типологии формируется система базовых метрик, описанных с учетом особенностей выявления, предложенных для включения в методику оценки достоверности ПВДИ:

³ГОСТ Р 59898-2021. Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021

Полнота

Полнота – доля выявленных системой инцидентов относительно общего количества инцидентов, произошедших в зоне контроля за отчетный период [10].

$$P = \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛО}} \cdot 100\% \quad (2)$$

В контексте задач ИТС полнота обнаружения напрямую определяет эффективность функционирования ПВДИ и представляет собой комплексный показатель, охватывающий несколько критически важных аспектов:

- Пространственный охват – возможность системы идентифицировать инциденты в зоне осуществления мониторинга, включая проблемные участки с ограниченной видимостью, зоны с ограниченным обзором и области с различными геометрическими параметрами дорожного полотна.
- Временная непрерывность – обеспечение детектирования инцидентов во всех временных интервалах, включая периоды с неблагоприятными условиями наблюдения (ночное время, осадки, недостаточная освещенность).
- Событийный охват – способность системы обнаруживать все категории инцидентов, предусмотренные таксономией событий: от критических (движение во встречном направлении, ДТП) до менее значимых, но потенциально опасных событий (посторонние предметы, пешеходы в неположенных местах).

Низкий показатель полноты означает, что значительная часть происходящих на дороге инцидентов остается незафиксированной системой, что приводит к системным последствиям:

- некомплектность оперативной картины: оператор получает искаженное представление о дорожной обстановке, где часть активных инцидентов отсутствует в системе мониторинга;
- риск эскалации инцидентов: пропущенное незначительное событие (например, остановившееся ТС на обочине) может развиваться в крупный затор или ДТП;
- снижение доверия к автоматизации: высокий процент пропусков подрывает доверие персонала к системе и вынуждает дублировать ее функции ручным контролем.

Согласно анализу международного опыта, современные системы, проведенного в рамках научно-исследовательской работы «Разработка предварительного национального стандарта «Интеллектуальные транспортные системы. Подсистемы выявления дорожных инцидентов. Объекты и методы испытаний»» видеоаналитики в благоприятных условиях демонстрируют полноту обнаружения инцидентов на уровне 94-100%. Однако в сложных условиях эксплуатации, таких как ночное время суток, плохая видимость или высокая плотность трафика, этот показатель снижается до 80-85%.

Для объективной оценки полноты в ходе испытаний необходима эталонная выборка инцидентов, верифицированная независимыми методами. При анализе эксплуатационных данных эталоном может служить ретроспективная разметка архивных видеозаписей.

Точность

Точность – доля выявленных системой инцидентов относительно общего количества всех срабатываний, включая ошибочные (ложные срабатывания).

$$T = \frac{\text{ИП}}{\text{ИП} + \text{ЛП}} \cdot 100\% \quad (3)$$

В контексте задач ИТС точность детектирования является ключевым показателем эффективности обработки информации в ПВДИ, характеризующим несколько критически важных аспектов ее функционирования:

- Качество алгоритмических решений – способность системы минимизировать ложные срабатывания, вызванные сложными погодными условиями, наличием освещенности, теней, отражений и другими артефактами видеопотока.
- Оптимизация ресурсов – снижение операционной нагрузки на операторов за счет фильтрации нерелевантных событий и предотвращения «алертной усталости»⁴ операторов.
- Эффективность использования инфраструктуры – минимизация ложных активаций систем оповещения и необоснованного задействования экстренных служб

Низкий показатель точности означает, что значительная часть ресурсов системы расходуется на обработку и верификацию ошибочных срабатываний, что приводит к следующим системным последствиям:

- снижение операционной эффективности: оператор вынужден расходовать рабочее время на фильтрацию и анализ ложных тревог, что снижает скорость реакции на реальные инциденты;
- девальвация системы оповещений: частые ложные тревоги приводят к снижению доверия к автоматизированным предупреждениям и могут провоцировать их игнорирование персоналом;
- нерациональное использование ресурсов: необоснованное задействование служб реагирования приводит к дополнительным эксплуатационным расходам и снижению их готовности к реальным инцидентам.

Согласно анализу международного опыта, современные системы видеоаналитики способны достигать точности детектирования на уровне 85-95% для основных категорий инцидентов в стандартных условиях. Однако в сложных условиях эксплуатации (интенсивное движение, сложные погодные условия, недостаточное освещение) данный показатель может снижаться до 70-80%.

⁴Состояние, при котором возникает стойкое чувство упадка сил, не проходящее даже после отдыха, а также снижаются умственная и физическая работоспособность

Для объективной оценки точности в ходе испытаний необходима тщательная верификация всех срабатываний системы методами независимого контроля. При анализе эксплуатационных данных рекомендуется использовать систему двойной проверки с привлечением нескольких операторов для минимизации субъективного фактора. Компромиссная зависимость между точностью и полнотой требует оптимального балансирования параметров системы: повышение порогов детектирования улучшает точность, но снижает полноту, и наоборот. Калибровка этого баланса должна осуществляться с учетом приоритетов конкретной дорожной ситуации и критичности различных типов инцидентов.

Ошибка классификации

Ошибка классификации – доля неверно определенных типов инцидентов относительно общего количества всех выявленных и классифицированных инцидентов, произошедших в зоне контроля за отчетный период.

$$OK = \frac{N_{OK}}{ИП} \cdot 100\% \quad (4)$$

В контексте задач ИТС показатель ошибки классификации характеризует смысловую достоверность информации в ПВДИ и охватывает несколько критически важных аспектов:

- Семантическая точность данных – способность системы не только обнаруживать факт инцидента, но и корректно интерпретировать его природу, что определяет адекватность протоколов реагирования.
- Качество распознавания паттернов – эффективность различения визуально схожих, но семантически различных событий (например, «остановка» или «затор», «ДТП» или «вынужденная остановка»).
- Контекстная адаптивность – способность алгоритмов учитывать пространственно-временной контекст при классификации событий.

Высокий показатель ошибки классификации приводит к следующим системным последствиям:

- неадекватность реагирования: некорректное определение типа инцидента ведет к применению неподходящих протоколов реагирования и неоптимальному задействованию служб;
- искажение статистического учета: накопление ошибок классификации в базах данных приводит к нерепрезентативной аналитике и некорректным долгосрочным решениям;
- снижение полезности системы: операторы теряют доверие к автоматически присваиваемым категориям и вынуждены осуществлять дополнительную верификацию.

Согласно анализу международного опыта, современные системы видеоаналитики демонстрируют уровень ошибок классификации от 5% до 15% для базовых категорий инцидентов в стандартных условиях. Для сложных и редко встречающихся типов событий данный показатель может достигать 25-40%.

Ложные срабатывания

Ложные срабатывания – доля ошибочных срабатываний системы относительно общего количества всех зафиксированных системой событий.

$$ЛС = \frac{ЛП}{ИП + ЛП} \cdot 100\% \quad (5)$$

В контексте задач ИТС показатель ложных срабатываний является ключевым индикатором селективности системы и характеризует:

- Устойчивость алгоритмов – способность системы отличать целевые события от артефактов видеопотока, изменений освещенности, погодных явлений и других нерелевантных изменений в зоне мониторинга.
- Эргономичность интерфейса – степень соответствия между частотой ложных предупреждений и психофизиологическими возможностями операторов по их обработке.
- Экономическую эффективность – влияние ложных срабатываний на расход ресурсов системы и служб реагирования.

Высокий показатель ложных срабатываний приводит к следующим негативным последствиям:

- алертная усталость операторов: постоянный поток ложных предупреждений вызывает психологическое привыкание и повышает вероятность пропуска реальных инцидентов;
- неэффективное использование ресурсов: время операторов тратится на фильтрацию и анализ ложных событий вместо работы с реальными инцидентами;
- девальвация системы оповещений: снижается доверие ко всем автоматическим уведомлениям системы, включая корректные.

Для систем постоянного мониторинга значение ложных срабатываний целесообразно рассматривать с учетом операционной нагрузки на оператора. В рамках настоящего исследования значение не более 5% рассматривается как целевой ориентир, обеспечивающий приемлемый уровень доверия к системе. Диапазон 10-15% может рассматриваться как верхняя граница допустимости, превышение которой приводит к росту числа нерелевантных уведомлений и снижению эффективности человеко-машинного взаимодействия. В сложных условиях эксплуатации допустимо кратковременное повышение данного показателя до 20-25% при условии применения дополнительных фильтров верификации.

Оба показателя – ошибки классификации и ложные срабатывания – требуют постоянного мониторинга и корректировки пороговых значений алгоритмов для достижения баланса между полнотой обнаружения и точностью работы системы.

Предложенная система критериев достоверности выявления дорожных инцидентов основана на общепринятых принципах оценки систем искусственного интеллекта и адаптирована к специфике интеллектуальных транспортных систем. Многокритериальный подход позволяет учитывать как полноту охвата событий, так и качество их интерпретации, а также надежность взаимодействия с оператором.

Конкретные пороговые значения для каждой из метрик сформированы в рамках выполненной НИР и настоящего исследования на основе:

- результатов анкетирования производителей и разработчиков ПВДИ, направленного на выявление достижимых характеристик в реальных условиях эксплуатации;
- анализа практических требований операторов;
- сопоставления с международными практиками;
- результатов натурных испытаний ФАУ «РОСДОРНИИ» на Пилотной зоне ИТС в Республике Татарстан.

Таким образом, финальные критериальные значения будут сформированы с учетом технологической реализуемости, эксплуатационной целесообразности и приоритетности, что обеспечит их практическую применимость при разработке и закупке ПВДИ.

4. Формирование результирующих значений критериев достоверности выявления дорожных инцидентов ПВДИ

Для обеспечения репрезентативности и объективности значений критериев достоверности был применен метод сравнительного анализа данных, полученных в ходе экспертного анкетирования операторов и производителей систем, а также учтены результаты международных исследований в области испытаний систем видеоаналитики.

Для метрики «Полнота» предлагается установить пороговое значение на уровне не менее 85% на основании следующего:

- результаты статистического анализа данных анкетирования операторов демонстрируют медианное значение требований в 90% при среднем арифметическом 83.6%;
- исследование технологических возможностей показывает, что достижение полноты 90% реализуемо, но сопряжено с увеличением времени обнаружения до 120 секунд;
- сравнение с международным опытом свидетельствует, что в сложных условиях эксплуатации (ночное время, неблагоприятные погодные условия) показатели полноты современных систем составляют 80-85%.

Таким образом, значение 85% представляет собой оптимальный баланс между требованиями операторов и технологическими ограничениями, обеспечивающий приемлемое время реакции системы.

Для метрики «Точность» предлагается установить пороговое значение на уровне не менее 85% на основании следующего:

- анализ требований операторов выявил медианное значение 80% при среднем арифметическом 82.1%;

- при определении порогового значения учитывалась взаимосвязь показателей точности и полноты, характерная для алгоритмов видеоаналитики: повышение порога уверенности при формировании события, как правило, снижает количество ложноположительных результатов, однако может увеличивать вероятность ложноотрицательных результатов, то есть пропуска фактически произошедших дорожных инцидентов;
- расчет операционной нагрузки демонстрирует, что значение точности 85% соответствует допустимой доле ложных срабатываний (15%), что находится в пределах психофизиологических возможностей оператора.

Установленный порог позволяет минимизировать количество ложных тревог без существенного снижения полноты обнаружения инцидентов.

Таким образом, значение точности не менее 85% принято в качестве компромиссного ориентира, сформированного на основе сопоставления результатов НИР, данных экспертного анкетирования производителей и операторов ПВДИ, а также анализа международных исследований в области испытаний систем видеоаналитики. Указанное значение позволяет ограничить долю ложноположительных срабатываний без чрезмерного ужесточения порога формирования события, которое может привести к снижению полноты выявления дорожных инцидентов.

Для метрики «Ошибки классификации» предлагается установить пороговое значение на уровне не более 5% на основании следующего:

- результаты анкетирования операторов показали медианное значение требований 5% для критических типов инцидентов;
- семантическая корректность классификации непосредственно влияет на адекватность протоколов реагирования и релевантность статистических данных;
- сравнительный анализ с международными исследованиями подтверждает достижимость значения 5% для основных категорий инцидентов в стандартных условиях эксплуатации.

Данное пороговое значение обеспечивает необходимый уровень смысловой достоверности информации для принятия оперативных решений.

Для метрики «Ложные срабатывания» предлагается установить пороговое значение на уровне не более 5% на основании следующего:

- эксплуатационные требования операторов варьируются в диапазоне 3-5% с альтернативным предложением не более 0.5 ложных срабатываний в сутки на систему;
- технологический анализ подтверждает возможность обеспечения 1-5 ложных срабатываний в час на камеру, что коррелирует с процентным значением 5-10%;
- психологические исследования эффективности человеко-машинного взаимодействия свидетельствуют, что превышение порога 10-15% приводит к девальвации системы оповещений.

Предложенное значение обеспечивает поддержание доверия к системе при сохранении технологической реализуемости.

Вместе с тем представленные значения не являются рекомендацией для включения в нормативно-технические требования, а служат ориентиром для формирования технических требований и дальнейшей доработки с учетом конкретного контекста применения.

5. Обсуждение

Проведенное исследование позволило систематизировать современные подходы к оценке достоверности функционирования подсистемы выявления дорожных инцидентов на основе видеоаналитики. В результате выполненной работы получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что существующая нормативно-техническая база Российской Федерации не содержит количественных критериев оценки эффективности ПВДИ, что создает значительные сложности при валидации систем и проведении сравнительного анализа решений различных производителей.
2. На основе анализа современных алгоритмов видеоаналитики (YOLO, R-CNN) и методов пространственно-временной привязки разработана система взаимодополняющих метрик, включающая полноту обнаружения, точность детектирования, ошибки классификации и уровень ложных срабатываний.
3. Выявлены и количественно оценены системные компромиссы между ключевыми метриками, в частности, обратная зависимость между полнотой обнаружения и точностью детектирования.
4. На основе сравнительного анализа данных экспертного анкетирования производителей и операторов ПВДИ, а также с учетом международного опыта испытаний систем видеоаналитики, научно обоснованы следующие пороговые значения метрик:
 - Полнота: не менее 85% – значение, обеспечивающее баланс между требованиями операторов (медиана 90%) и технологическими ограничениями;
 - Точность: не менее 85% – порог, позволяющий минимизировать ложные тревоги без существенного снижения полноты обнаружения;
 - Ошибки классификации: не более 5% – значение, обеспечивающее необходимый уровень смысловой достоверности информации для критических типов инцидентов;
 - Ложные срабатывания: не более 5% – порог, поддерживающий доверие к системе при сохранении технологической реализуемости.
5. Установлена корреляция между временем обнаружения и достижимым уровнем полноты: для обеспечения полноты 90% требуется увеличение времени анализа до 120 секунд, что подтверждает необходимость балансировки параметров системы в зависимости от операционных приоритетов.

Предложенные значения носят рекомендательный характер и предназначены для использования в качестве базиса при разработке ведомственных нормативов и технических заданий, подлежащий дальнейшей детализации и адаптации с учетом:

- типа дорожной инфраструктуры и условий эксплуатации;
- критичности различных категорий инцидентов;
- архитектурных особенностей конкретных реализаций систем;
- требований ко времени обнаружения для различных типов инцидентов.

Разработанная система критериев с обоснованными пороговыми значениями представляет собой методологическую основу для формирования и уточнения нормативно-технических требований к оценке достоверности функционирования подсистемы выявления дорожных инцидентов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на апробацию предложенных значений в реальных условиях эксплуатации ПВДИ.

Вместе с тем, необходимо отметить важность проведения дальнейших исследований данной тематики, в том числе для обеспечения возможности создания системы проверки соответствия.

Выводы

Проведенное исследование направлено на устранение существующего пробела в нормативно-технической базе, заключающегося в отсутствии количественных критериев оценки достоверности (ПВДИ). На основе анализа архитектурных особенностей алгоритмов компьютерного зрения и положений ГОСТ Р 59898-2021 разработана система взаимодополняющих метрик (полнота, точность, ошибки классификации и уровень ложных срабатываний), адаптированная к специфике интеллектуальных транспортных систем. Предложенный многокритериальный подход обеспечивает комплексную и прозрачную оценку как корректности детектирования.

Список литературы

- [1] Свистельников А.А., Ковешников А.А., Феофанов В.В., Малыхина П.В. Востребованность испытаний и исследований интеллектуальных транспортных систем и отдельных ее элементов // Вестник НЦ БЖД. – 2024. – № 3 (61). – С. 87-95
- [2] Журавлев А.Д., Торопов Н.Ю. Концептуальные подходы к оценке эффективности функционирования интеллектуальных транспортных систем // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2026. – № 1 (84). – С. 129-136.
- [3] Свистельников А.А., Малыхина П.В., Григорьева А.М., Кумалов Т.З. Методы испытаний для оценки соответствия подсистемы дорожного видеонаблюдения в составе интеллектуальных транспортных систем // Интеллектуальный транспорт. – 2025. – № 4 (36). – С. 65-75.
- [4] Редмон Дж., Диввала С., Гершик Р., Фархади А. You Only Look Once: унифицированное детектирование объектов в реальном времени // Труды конференции IEEE по компьютерному зрению и распознаванию образов (CVPR). – 2016. – С. 779-788. – DOI: 10.1109/CVPR.2016.91. – URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91> (дата обращения: 11.02.2026).
- [5] Гершик Р., Донахью Дж., Даррелл Т., Малик Дж. Богатые иерархии признаков для точного детектирования объектов и семантической сегментации // Труды конференции IEEE по компьютерному зрению и распознаванию образов (CVPR). – 2014. – С. 580-587. – DOI: 10.1109/CVPR.2014.81. – URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81> (дата обращения: 13.02.2026).
- [6] Жэнь Ш., Хэ К., Жиришк Р., Сунь Ц. Faster R-CNN: к детектированию объектов в реальном времени с помощью сетей региональных предложений // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2017. – Vol. 39. – No. 6. – P. 1137-1149. – DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031. – URL: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031> (дата обращения: 16.02.2026).
- [7] Лин П.-С., Фабрегас А., Куртеллис А., Лолл Ш., Бато М. Улучшенные меры регулирования дорожного движения для предотвращения неправильных поворотов на железнодорожных переездах: окончательный отчет / Национальный центр исследований городского транспорта Университета Южной Флориды. – Тампа, 2013. – № BDK85 977-45. – 87 С. – URL: <https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/research/reports/fdot-bdk85-977-45-rpt.pdf> (дата обращения: 16.02.2026).
- [8] Прейзен Э., Дитер Д. Обнаружение данных о дорожном движении и инцидентах следующего поколения с помощью видео // Ежегодное собрание Совета по исследованиям в области транспорта (TRB). – 2014. – Доклад № 14-1478. – URL: <https://trid.trb.org/view/1286006> (дата обращения: 16.02.2026).
- [9] Padilla R., Passos W.L., Dias T.L., Netto S.L., da Silva E.A.B. A Comparative Analysis of Object Detection Metrics with a Companion Open-Source Toolkit // Electronics. – 2021. – Vol. 10. – No. 3. – Article 279. – DOI: 10.3390/electronics10030279. – URL: <https://doi.org/10.3390/electronics10030279> (дата обращения: 16.02.2026).
- [10] Arefin M. S., Mahin M. I. S., Mily F. A. Real-time rapid accident detection for optimizing road safety in Bangladesh // Heliyon. – 2025. – Vol. 11. – No. 3. – Article e42432. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42432. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42432> (дата обращения: 16.02.2026).

METRICS OF THE RELIABILITY OF ROAD INCIDENT DETECTION BY TRAFFIC INCIDENT DETECTION SUBSYSTEM BASED ON COMPUTER VISION TECHNOLOGY

Svistelnikov A. A.^{1,1}, Malykhina P. V.^{1,2}, Toropov N. Yu.^{1,3}

¹ Federal Autonomous Institution «Russian Road Research Institute» (FAI «ROSDORNII»), Moscow, Russia.

E-mail: ¹ svistelnikovaa@rosdornii.ru, ² malykhinapv@rosdornii.ru, ³ toropov@rosdornii.ru

Abstract. This article examines the problem of assessing the reliability of traffic incident detection subsystems (TIDS) based on computer vision technology. It is noted that the current regulatory framework of the Russian Federation, including GOST R 71159-2023, does not contain quantitative criteria for assessing the effectiveness of incident detection, which complicates the validation of systems and the comparison of solutions from different manufacturers. Internal «reliability» parameters in software systems cannot be independently verified, and the accuracy of spatial and temporal referencing depends on numerous factors that reduce the reliability of event recording. The purpose of the article is to determine key metrics for assessing the functional characteristics of the TIDS and justify their threshold values based on an analysis of technological capabilities, operational requirements and international experience. As a result of this work, a system of complementary metrics was developed, including detection completeness, detection accuracy, classification errors, and false positive rate. Criteria were also proposed, recommended as a methodological basis for developing regulatory and technical requirements for TIDS.

Keywords: *intelligent transport systems, traffic incident detection, computer vision, performance evaluation metrics, detection reliability.*

References

- [1] Svistelnikov A.A., Koveshnikov A.A., Feofanov V.V., Malykhina P.V. Vostrebovannost ispytaniy i issledovaniy intellektualnykh transportnykh sistem i otdelnykh yeye elementov (Demand for testing and research of intelligent transport systems and their individual elements). Vestnik NTs BZhD (Bulletin of the Scientific Center for Life Safety), 2024, no. 3 (61), pp. 87-95. (in Russian)
- [2] Zhuravlev A.D., Toropov N.Yu. Kontseptualnyye podkhody k otsenke effektivnosti funktsionirovaniya intellektualnykh transportnykh sistem (Conceptual approaches to assessing the efficiency of intelligent transport systems). Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) (Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)), 2026, no. 1 (84), pp. 129-136. (in Russian)
- [3] Svistelnikov A.A., Malykhina P.V., Grigorieva A.M., Kumalov T.Z. Metody ispytaniy dlya otsenki sootvetstviya podsistemy dorozhnogo videonablyudeniya v sostave intellektualnykh transportnykh sistem (Test methods for assessing the compliance of the road video surveillance subsystem as part of intelligent transport systems). Intellektualnyy transport (Intelligent Transport), 2025, no. 4 (36), pp. 65-75. (in Russian)

For citation:

Svistelnikov A. A., Malykhina P. V., Toropov N. Yu. Metrics of the reliability of road incident detection by traffic incident detection subsystem based on computer vision technology. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 71-91. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-71-91. (in Russian)

- [4] Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 779-788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91. URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91> (accessed 11.02.2026).
- [5] Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014, pp. 580-587. DOI: 10.1109/CVPR.2014.81. URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81> (accessed 13.02.2026).
- [6] Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, vol. 39, no. 6, pp. 1137-1149. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031. URL: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2577031> (accessed 16.02.2026).
- [7] Lin P.-S., Fabregas A., Kurtellis A., Lall S., Bato M. Enhanced Traffic Control Measures for Prevention of Wrong-Way Movements at Railroad Crossings: Final Report. National Center for Urban Transportation Research, University of South Florida, Tampa, 2013, no. BDK85 977-45, 87 p. URL: <https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/research/reports/fdot-bdk85-977-45-rpt.pdf> (accessed 16.02.2026).
- [8] Preisen E., Dieter D. Next Generation Video-Based Traffic and Incident Data Detection. Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), 2014, Paper No. 14-1478. URL: <https://trid.trb.org/view/1286006> (accessed 16.02.2026).
- [9] Padilla R., Passos W.L., Dias T.L., Netto S.L., da Silva E.A.B. A Comparative Analysis of Object Detection Metrics with a Companion Open-Source Toolkit. Electronics, 2021, vol. 10, no. 3, Article 279. DOI: 10.3390/electronics10030279. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics10030279> (accessed 16.02.2026).
- [10] Arefin M.S., Mahin M.I.S., Mily F.A. Real-time rapid accident detection for optimizing road safety in Bangladesh. Heliyon, 2025, vol. 11, no. 3, Article e42432. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42432. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42432> (accessed 16.02.2026).

УДК 656.13:346.7:006.013

DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-92-106

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ РЕГУЛЯРНОГО МОНИТОРИНГА ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Давыдов Р.Д.^{1,1}, Ахмадов Г.Д.^{1,2}, Жабриков М.В.^{1,3}

¹ Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт» (ФАН «РОСДОРНИИ»), Москва, Россия.

E-mail: ¹ davydov@rosdornii.ru, ² akhmadov@rosdornii.ru, ³ maxpkey@mail.ru

Аннотация. В статье представлен методический подход к регулярному мониторингу периферийного оборудования и программного обеспечения интеллектуальных транспортных систем (далее – ИТС) на автомобильных дорогах общего пользования Российской Федерации. Актуальность исследования обусловлена отсутствием единого воспроизводимого механизма сбора и обработки информации об элементах ИТС (периферийном оборудовании и программном обеспечении), что приводит к фрагментарности данных и затрудняет принятие управленческих решений в области развития цифровой дорожной инфраструктуры. Предложен организационно-методический подход к системному мониторингу, охватывающий полный цикл работы с первичной статистической информацией: формирование респондентской базы, разработку стандартизированных опросных форм, организацию методической поддержки участников мониторинга и процедуры обработки первичных данных. Подход ориентирован на распределенный сбор сведений о периферийном оборудовании и программном обеспечении ИТС, эксплуатируемых на трех уровнях дорожной сети (федеральном, региональном, местном) силами порядка 120 организаций-операторов различной ведомственной принадлежности. Особое внимание уделено обеспечению полноты, достоверности и сопоставимости информации от владельцев (операторов) ИТС. В рамках предложенного подхода разработаны процедуры нормализации данных, дедупликации записей и форматно-логического контроля, направленные на минимизацию влияния человеческого фактора и повышение качества аналитических результатов. Предложенный подход обеспечивает воспроизводимость мониторинга и может использоваться как инструмент регулярного наблюдения за состоянием инфраструктуры ИТС, а также как основа для формирования государственного заказа, стратегического планирования и организации статистического наблюдения в сфере ИТС.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, мониторинг ИТС, сбор данных, форматно-логический контроль, статистическое наблюдение.

Для цитирования:

Давыдов Р.Д., Ахмадов Г.Д., Жабриков М.В. Методический подход к организации регулярного мониторинга элементов интеллектуальных транспортных систем на автомобильных дорогах общего пользования. *Интеллектуальный транспорт*. 2026. № 2(38). С. 92–106. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-92-106.

Введение

Современный этап развития ИТС в Российской Федерации характеризуется активным внедрением цифровых решений на автомобильных дорогах общего пользования различных уровней управления [1, 2]. В транспортную инфраструктуру интегрируются подсистемы мониторинга транспортных потоков, видеонаблюдения, метеомониторинга, диспетчеризации служб содержания дорог, а также программные платформы управления дорожным движением и информационного взаимодействия [3]. Расширение применения таких технологий формирует значительный массив данных о технических и программных элементах ИТС, распределенных по территории страны [4].

Одновременно с ростом масштабов внедрения ИТС возрастает потребность в системном учете и анализе информации о составе и состоянии данной инфраструктуры. Однако на практике сведения о периферийном оборудовании и программном обеспечении ИТС формируются фрагментарно, в рамках отдельных региональных инициатив или ведомственных проектов. Отсутствие унифицированных подходов к сбору и обработке информации приводит к низкой сопоставимости данных, затрудняет формирование объективной картины развития ИТС и ограничивает возможности стратегического планирования в сфере цифровой дорожной инфраструктуры [5, 6].

Дополнительную сложность представляет распределенный характер управления дорожной сетью. Владельцами и операторами элементов ИТС выступают различные организации, включая органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации, федеральные казенные учреждения и государственные компании. Информация о составе инфраструктуры ИТС находится у различных участников, что вызывает необходимость формирования единого механизма регулярного мониторинга и стандартизации процедур сбора данных [7, 8].

При этом использование исключительно автоматизированных способов сбора информации в настоящее время затруднено вследствие неоднородности используемых технических решений, отсутствия унифицированных интерфейсов информационного взаимодействия и различий в форматах хранения данных у различных владельцев и операторов инфраструктуры ИТС. В этих условиях возникает необходимость в воспроизводимом организационно-методическом подходе к мониторингу элементов ИТС, обеспечивающем централизованный сбор и сопоставимость первичных сведений об их составе и состоянии.

Целью настоящего исследования является разработка и методическое обоснование воспроизводимого подхода к организации регулярного мониторинга элементов ИТС на автомобильных дорогах общего пользования Российской Федерации, обеспечивающего полноту охвата владельцев и операторов инфраструктуры ИТС, сопоставимость собираемых данных и возможность централизованного формирования структурированной информационной базы элементов ИТС.

Исследование исходит из предположения, что применение унифицированных опросных форм и регламентированных процедур обработки данных позволяет повысить сопоставимость сведений об элементах ИТС, поступающих от различных владельцев и операторов инфраструктуры.

Научная новизна исследования заключается в разработке и формализации организационно-методического подхода к регулярному мониторингу элементов ИТС в условиях распределенного управления дорожной инфраструктурой, включая унифицированные процедуры сбора, нормализации, дедупликации и форматно-логического контроля данных. В отличие от подходов, ориентированных на автоматизированный обмен данными в рамках единой телеметрической инфраструктуры или унифицированных интерфейсов типа DATEX II [9] и референтных архитектур ISO 14813-1 [10], предложенный подход ориентирован на распределенный сбор первичных эксплуатационных сведений о составе и состоянии оборудования ИТС на трех уровнях дорожной сети в условиях отсутствия единых ведомственных и межведомственных автоматизированных источников данных [11, 12].

1. Методы и подходы

Распределенный характер управления дорожной сетью выражается в наличии трех уровней дорожной сети – федерального, регионального и местного, на которых эксплуатацию элементов ИТС обеспечивают порядка 120 организаций различной ведомственной принадлежности. Именно эта структура определяет масштаб задачи периферийного мониторинга и требует унифицированных процедур сбора первичных сведений.

Аналогичные задачи обеспечения сопоставимости данных в международной практике решаются на основе стандартизированных спецификаций обмена данными в сфере транспорта, включая семейство CEN/TS 16157 (DATEX II) [9], регламентирующее структуру и форматы данных для информационного взаимодействия между участниками транспортной инфраструктуры. В европейской системе стандартизации ИТС в рамках деятельности технического комитета CEN/TC 278 [13] особое внимание уделяется унификации процедур информационного взаимодействия, обеспечению совместимости данных и стандартизации обмена сведениями между различными участниками транспортной инфраструктуры. Базовая референтная архитектура построения ИТС на международном уровне закреплена в стандарте ISO 14813-1 [10], определяющем перечень сервисных областей, групп и сервисов ИТС и формирующем общий каркас для построения национальных и отраслевых архитектур. В исследованиях, посвященных интеграции и обработке данных в ИТС [11, 12], отмечается, что эффективность интеллектуальных транспортных систем в условиях распределенных источников сведений в значительной степени определяется применяемыми подходами к согласованию и объединению информации, а также качеством, структурированностью и практической применимостью собираемых данных. Применение подобных спецификаций требует предварительной унификации моделей данных и интерфейсов; в существующих российских ведомственных и региональных информационных системах сведения об элементах ИТС, как правило, представлены в несопоставимом виде либо охватывают только отдельные сегменты инфраструктуры.

С учетом указанных особенностей разработан организационно-методический подход к системному мониторингу элементов ИТС, основанный на последовательной реализации процедур сбора, структурирования и обработки первичной информации, поступающей от владельцев и операторов инфраструктуры [13, 14]. Подход предусматривает формирование респондентской базы, разработку унифицированных инструментов сбора информации, организацию методической поддержки участников мониторинга и применение процедур обработки и верификации полученных данных [14, 15].

Эффективность организации мониторинга определяется возможностью обеспечения:

- полного охвата владельцев и операторов элементов ИТС
- единообразия представления информации
- минимизации логических и форматных ошибок в исходных данных
- формирования сопоставимого массива сведений, пригодного для последующего аналитического и статистического анализа

Для последующего анализа сформированной информационной базы необходима количественная оценка качества и репрезентативности данных мониторинга ИТС. Данная задача требует отдельного методического рассмотрения и является предметом последующего исследования авторов.

Входными данными мониторинга являются заполненные респондентами опросные формы, выходными данными – структурированный массив сведений об элементах ИТС, прошедший процедуры нормализации, дедупликации и форматно-логического контроля.

2. Формирование респондентской базы

Формирование респондентской базы мониторинга осуществлялось на основе принципа полноты охвата всех уровней управления дорожной инфраструктурой Российской Федерации. В состав респондентов были включены органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации, федеральные казенные учреждения, находящиеся в ведении Федерального дорожного агентства, а также государственная компания «Российские автомобильные дороги» (ГК «Автодор»).

В рамках мониторинга были привлечены представители 89 субъектов Российской Федерации, ответственные за функционирование улично-дорожной сети и внедрение элементов ИТС, а также 30 федеральных казенных учреждений, осуществляющих управление автомобильными дорогами общего пользования федерального значения. Дополнительно в состав респондентской базы включена ГК «Автодор», эксплуатирующая участки федеральных автомобильных дорог на условиях долгосрочного доверительного управления. Таким образом, в состав базы мониторинга вошло 120 респондентов.

Такой состав респондентской базы обеспечивает охват федерального, регионального и муниципального уровней дорожной сети, включая объекты, находящиеся в эксплуатации государственных компаний и частных операторов в рамках государственно-частного партнерства. Отбор участников мониторинга осуществлялся исходя из их административной подведомственности и юридической ответственности за эксплуатацию элементов ИТС на соответствующих участках дорожной инфраструктуры.

Таким образом, практическая реализация подхода обеспечила формирование респондентской базы из 120 участников мониторинга, представляющих федеральный, региональный и муниципальный уровни управления дорожной инфраструктурой. Сформированная респондентская база позволила обеспечить репрезентативность собираемых данных и охват различных типов дорожной инфраструктуры, включая федеральные, региональные и местные автомобильные дороги, что является необходимым условием формирования целостной информационной базы мониторинга элементов ИТС.

3. Разработка опросных форм

Сбор информации о составе и состоянии элементов ИТС осуществлялся с использованием стандартизированной опросной формы, разработанной в рамках выполнения научно-исследовательской работы. Опросная форма предназначена для системного учета периферийных технических средств и программного обеспечения, применяемых при организации безопасного движения транспорта и пешеходов на автомобильных дорогах общего пользования.

Структура опросной формы сформирована с учетом необходимости обеспечения сопоставимости данных, поступающих от различных владельцев и операторов ИТС, а также возможности их последующей автоматизированной обработки. В этой связи она была разделена на несколько функциональных частей, включающих информацию о респонденте, сведения о периферийном оборудовании и сведения о программном обеспечении.

Адресная часть формы предназначена для идентификации организации-респондента и содержит сведения о наименовании организации, ее почтовом адресе, а также контактные данные ответственных лиц, осуществляющих заполнение формы. Указанные сведения позволяют обеспечить корректную идентификацию источника данных и возможность уточнения представленной информации при проведении последующей проверки и обработки данных.

Основные сведения о составе инфраструктуры ИТС фиксируются в табличных разделах формы. Указанные разделы предназначены для учета периферийного оборудования и программного обеспечения. В таблице учета оборудования отражаются такие характеристики, как тип оборудования, его полное наименование, производитель, год производства, год внедрения, а также количество установленного оборудования за предыдущий и текущий отчетные периоды. В таблице учета программного обеспечения фиксируются полное наименование программного продукта, его производитель, год внедрения, количество лицензий за предыдущий и текущий отчетные периоды, срок действия лицензий и объекты управления, для которых используется соответствующее программное обеспечение.

Структура разработанной опросной формы представлена на рисунке 1.

Дополнительно при формировании формы был составлен закрытый перечень типов периферийного оборудования ИТС, включающий дорожные контроллеры, детекторы транспорта, метеостанции, видеокамеры, динамические информационные табло, знаки переменной информации, системы фотовидеофиксации нарушений и другие элементы дорожной инфраструктуры. Использование закрытого перечня типов оборудования позволяет обеспечить единообразие классификации инфраструктурных элементов и повысить сопоставимость данных, поступающих от различных респондентов.

СВЕДЕНИЯ О ПЕРИФЕРИЙНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ И ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ, РЕАЛИЗУЮЩИХ МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА И ПЕШЕХОДОВ

Дата заполнения: _____

Наименование отчитывающейся организации: _____

Почтовый адрес: _____

Контакты ответственных лиц за заполнение формы (организации, должности, Ф.И.О., рабочая почта и телефон): _____

Элементы обустройства автомобильных дорог (оборудование)

№ строки	Тип оборудования ¹	Полное наименование ²	Производитель ²	Год производства	Год внедрения	Количество за предыдущий отчетный период	Количество за текущий отчетный период
	1	2	3	4	5	6	7

Программное обеспечение элементов обустройства автомобильных дорог

№ строки	Полное наименование ³	Производитель	Год внедрения	Количество лицензий за предыдущий отчетный период	Количество лицензий за текущий отчетный период	Срок действия	Объекты управления ⁴
	1	2	3	4	5	6	7

Рис. 1: Структура опросной формы мониторинга периферийного оборудования и программного обеспечения ИТС

Отдельным требованием к заполнению формы является обеспечение сопоставимости показателей между отчетными периодами. В случае отсутствия изменений сведения за предыдущий отчетный период дублируются в текущем периоде, а при наличии изменений в составе оборудования или программного обеспечения респондент предоставляет актуализированные данные с пояснением причин изменений. Такой подход позволяет отслеживать динамику изменения инфраструктуры ИТС и формировать временные ряды данных мониторинга.

Разработанная опросная форма сопровождается методическими указаниями по ее заполнению, содержащими описание используемых параметров и примеры заполнения отдельных граф. Наличие таких материалов позволяет снизить вероятность ошибок при вводе данных и обеспечить единообразие представления информации, поступающей от различных участников мониторинга.

4. Организация методической поддержки

Эффективность сбора первичной информации во многом зависит от корректности заполнения опросных форм респондентами. В связи с этим в рамках проведения мониторинга была организована система методической поддержки участников, направленная на обеспечение единообразного понимания структуры формы, состава показателей и требований к представлению данных.

На начальном этапе респондентам были направлены официальные письма с опросными формами и методическими указаниями по их заполнению, содержащими описание используемых параметров и примеры заполнения отдельных граф. Дополнительно для представителей организаций, участвующих в мониторинге, проводились обучающие вебинары, на которых демонстрировался порядок заполнения форм и разъяснялись особенности представления сведений о периферийном оборудовании и программном обеспечении ИТС.

В период сбора данных участникам мониторинга предоставлялась консультационная поддержка по телефону и электронной почте, позволяющая оперативно разрешать возникающие вопросы, связанные с интерпретацией отдельных показателей и порядком заполнения опросных форм. В случаях, требующих детального рассмотрения представляемых сведений, проводились индивидуальные консультации с использованием средств видеоконференцсвязи.

Дополнительно в целях повышения полноты и качества представляемых сведений в ходе проведения мониторинга было проведено более 290 телефонных консультаций с представителями респондентов, включая 126 консультаций с федеральными казенными учреждениями, подведомственными Федеральному дорожному агентству, и 165 консультаций с представителями субъектов Российской Федерации. Проведение консультационной поддержки позволило повысить оперативность представления сведений, снизить количество ошибок при заполнении опросных форм и повысить сопоставимость информации, поступающей от различных владельцев и операторов элементов ИТС.

5. Процедуры обработки данных

После получения первичных статистических данных осуществляется последовательная процедура их обработки, направленная на обеспечение корректности, сопоставимости и структурированности первичных данных, поступающих от различных респондентов. Обработка данных включает несколько взаимосвязанных этапов, позволяющих выявить и устранить возможные ошибки заполнения, привести информацию к единому формату и сформировать структурированную базу данных мониторинга элементов ИТС [15, 16].

Общая последовательность обработки данных представлена на рисунке 2.



Рис. 2: Этапы обработки данных мониторинга элементов ИТС

На первом этапе осуществляется сбор первичных данных от участников мониторинга. Сведения о периферийном оборудовании и программном обеспечении ИТС предоставляются респондентами в установленной форме и аккумулируются в единой базе данных. На данном этапе производится регистрация поступивших форм и формирование первичного массива информации для дальнейшей обработки.

Следующим этапом является первичный контроль полученных данных. В рамках данного этапа выполняется проверка наличия обязательных полей, корректности формата заполнения отдельных параметров, а также отсутствия пустых строк в ключевых колонках таблиц. Дополнительно проверяется соответствие отдельных значений установленным форматам записи, например представление года в формате четырехзначного числового значения. Проведение первичного контроля позволяет выявить очевидные ошибки заполнения форм и определить сведения, требующие дополнительного уточнения у респондентов.

Практическая реализация первичного контроля показала необходимость проведения дополнительного цикла уточнения данных. На промежуточном этапе мониторинга ответы были получены от 90 из 120 респондентов. В рамках первичной обработки было обработано более 200 опросных форм, содержащих 33 141 ячейку с информацией. На данном этапе были выявлены 481 незаполненная ячейка, 41 ячейка с логическими противоречиями и аномалиями, а также 2863 ячейки, содержащие ошибки формата представления данных.

После проведения консультаций, уточнения сведений и получения ответов от всех 120 респондентов итоговый массив данных был расширен до 36 131 информационной ячейки. При этом количество незаполненных ячеек было сокращено до 1, а число ячеек с ошибками формата представления данных снижено до 616.

Количественные характеристики проведенного цикла обработки данных свидетельствуют о результативности применяемых организационных процедур. По результатам форматно-логического контроля на доработку респондентам было возвращено около 18,5% полученных опросных форм, содержавших незаполненные поля, логические противоречия или несоответствия установленным форматам представления данных. После завершения уточняющего цикла возврат опросных форм составил 100% от исходной респондентской базы, а общий объем первичной информации возрос с 33 141 до 36 131 информационной ячейки (на 8,99%). Количество незаполненных ячеек сократилось с 481 до 1 (на 99,8%), а количество ячеек с ошибками формата представления данных – с 2 863 до 616 (на 78,5%, или в 4,6 раза). Приведенные показатели характеризуют операционную результативность цикла сбора и обработки информации. Формализованная количественная оценка полноты и достоверности сформированного массива данных через систему интегральных индексов рассматривается в отдельной методической работе авторов.

После завершения первичного контроля осуществляется нормализация данных, направленная на приведение текстовых и категориальных значений к унифицированному виду. В процессе нормализации используются контролируемые справочники производителей оборудования и программного обеспечения, типов оборудования, а также стран происхождения продукции. Применение таких справочников позволяет устранить вариативность написания наименований и обеспечить единообразие представления информации в базе данных.

Далее выполняется процедура дедупликации сведений, направленная на выявление и устранение повторяющихся записей. Повторные записи могут возникать при представлении сведений из различных источников или при наличии дублирующей информации в опросных формах.

Идентификация потенциально дублирующихся записей осуществляется на основе составного ключа, включающего:

- тип оборудования;
- производителя оборудования;
- модель оборудования;
- год производства;
- год ввода в эксплуатацию;
- принадлежность к объекту инфраструктуры.

В случае совпадения указанных параметров записи рассматриваются как потенциальные дубликаты и подлежат дополнительной проверке. При подтверждении дублирования сведения объединяются, а количественные показатели корректируются с учетом исключения повторного учета оборудования.

Использование составного ключа позволяет минимизировать вероятность ложного объединения записей и обеспечить корректность итогового массива данных мониторинга.

Количественная характеристика результатов процедуры дедупликации, включая долю объединенных записей и их влияние на структуру итогового массива данных мониторинга, рассматривается в составе оценки качества сформированной информационной базы в последующей работе авторов.

Заключительным этапом обработки данных является форматно-логический контроль, направленный на выявление технических, логических и структурных несоответствий в представленных данных.

В рамках форматного контроля выполняется:

- проверка заполнения обязательных полей;
- контроль допустимых форматов значений;
- проверка корректности числовых и текстовых параметров;
- контроль использования унифицированных справочников типов оборудования и производителей.

Логический контроль предусматривает проверку взаимосвязанных параметров данных. В частности:

- год ввода оборудования в эксплуатацию не должен быть меньше года производства;
- тип оборудования должен соответствовать заявленным функциональным характеристикам;
- сведения о программном обеспечении должны соответствовать типу объекта управления;
- количественные показатели не должны принимать отрицательные значения, а нулевые значения допускаются только в случаях, предусмотренных логикой заполнения формы.

Записи, содержащие выявленные несоответствия, направляются респондентам на уточнение или корректировку. Таким образом, мониторинг реализуется как циклический процесс сбора, проверки, уточнения и повторной верификации сведений, а не как разовый пассивный сбор отчетности.

Реализация описанных процедур обработки данных позволяет сформировать структурированную и сопоставимую информационную базу мониторинга элементов ИТС, пригодную для последующего анализа развития цифровой дорожной инфраструктуры.

6. Сопоставление с альтернативными методами сбора данных

При формировании подхода к мониторингу элементов ИТС рассматривались альтернативные методы сбора информации о составе и состоянии инфраструктуры, применяемые в российской и международной практике. Каждый из таких методов обладает определенными преимуществами, однако ни один из них в текущих условиях не обеспечивает централизованный сопоставимый сбор сведений об элементах ИТС в масштабах автомобильных дорог общего пользования Российской Федерации.

Автоматизированная телеметрия с периферийного оборудования и интеграционных платформ ИТС позволяет получать оперативные сведения о техническом состоянии оборудования и параметрах его работы непосредственно из эксплуатируемых систем. Вместе с тем неоднородность применяемых программных платформ, использование различных моделей данных и отсутствие унифицированных интерфейсов информационного взаимодействия между владельцами и операторами инфраструктуры ограничивают возможность сквозного автоматизированного сбора данных о составе элементов ИТС в национальном масштабе.

Использование региональных и ведомственных информационных систем учета транспортной инфраструктуры обеспечивает детализированные сведения в пределах конкретных субъектов Российской Федерации или зон ответственности отдельных организаций. Однако такие системы построены на различных подходах к структурированию информации, не охватывают всех уровней управления дорожной сетью и не предоставляют сопоставимого среза данных по элементам ИТС в целом по стране.

Стандартизированные интерфейсы информационного взаимодействия в ИТС, включая семейство спецификаций обмена данными CEN/TS 16157 (DATEX II) и архитектурную референтную модель ISO 14813-1 [9, 13], рассматриваются в международной практике как целевой механизм организации сопоставимого обмена сведениями между участниками транспортной инфраструктуры. Однако их полноценное применение требует предварительной унификации моделей данных и интерфейсов на уровне эксплуатируемых программных платформ, что в условиях Российской Федерации находится на этапе формирования.

Использование систем технического обслуживания и Service Desk владельцев и операторов инфраструктуры позволяет получать сведения о состоянии оборудования и инцидентах его эксплуатации, однако такие системы ориентированы на задачи поддержки эксплуатации, а не на учет состава инфраструктуры, и их данные требуют значительной дополнительной обработки для целей мониторинга.

С учетом изложенного применение стандартизированных опросных форм и регламентированных процедур взаимодействия с владельцами и операторами инфраструктуры рассматривается как переходный организационно-методический этап централизованного сбора сведений об элементах ИТС, обеспечивающий сопоставимость данных в условиях текущей неоднородности информационных систем и создающий основу для последующего внедрения автоматизированных и стандартизированных механизмов обмена данными.

7. Ограничения подхода и направления дальнейшего развития

Предложенный подход к организации мониторинга элементов ИТС ориентирован на формирование централизованной и сопоставимой информационной базы в условиях распределенного характера управления дорожной инфраструктурой. Вместе с тем использование опросных форм и взаимодействие с респондентами предполагают наличие ряда ограничений, связанных с возможностью возникновения субъективных ошибок при заполнении форм, различиями в уровне детализации представляемых сведений и необходимостью дополнительной верификации информации.

Отдельным ограничением является зависимость мониторинга от актуальности сведений, представляемых владельцами и операторами инфраструктуры, включая данные о фактическом эксплуатационном состоянии оборудования.

Использование полностью автоматизированного сбора данных на текущем этапе развития ИТС затруднено вследствие неоднородности применяемых программных платформ, различий в форматах хранения данных и отсутствия унифицированных интерфейсов информационного взаимодействия между владельцами и операторами инфраструктуры. В связи с этим применение стандартизированных опросных форм рассматривается как промежуточный организационно-методический этап формирования единой системы мониторинга элементов ИТС.

Заключение

В статье разработан организационно-методический подход к регулярному мониторингу элементов ИТС на автомобильных дорогах общего пользования Российской Федерации. Предложенный подход включает:

- формирование респондентской базы владельцев и операторов инфраструктуры ИТС;
- применение стандартизированных опросных форм;
- организацию методической поддержки участников мониторинга;
- процедуры нормализации, дедупликации и форматно-логического контроля данных.

Практическая реализация предложенного подхода выполнена в рамках формирования сводного перечня периферийного оборудования ИТС на автомобильных дорогах общего пользования Российской Федерации с участием 89 субъектов Российской Федерации, 30 федеральных казенных учреждений и ГК «Автодор». Проведенные процедуры форматно-логического контроля и взаимодействия с респондентами обеспечили уточнение представленных сведений и сокращение количества незаполненных ячеек и ошибок формата представления данных.

Результаты исследования подтверждают возможность формирования централизованной и сопоставимой информационной базы элементов ИТС в условиях распределенного управления дорожной инфраструктурой.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой методики количественной оценки полноты, достоверности и качества данных мониторинга ИТС на основе системы интегральных показателей, а также с проведением апробации указанной методики на сформированном массиве данных мониторинга элементов ИТС и статистической оценкой ключевых параметров инфраструктуры ИТС, включая оценку репрезентативности полученной выборки.

Список литературы

- [1] Егоров С.В., Шационок П.В., Ерпылева А.И., Жарков Д.И. Мировой и российский опыт применения интеллектуальных транспортных систем // Транспортное дело России. – 2022. – № 2. – С. 130-136. – DOI: 10.52375/20728689_2022_2_130.
- [2] Солодкий А.И. Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 10-19. – DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10.
- [3] Кривошеин Д.И., Попов А.А. Умные дороги и интеллектуальная транспортная система // Достижения науки и технологий – ДНИТ-2021: сб. науч. статей по материалам Всерос. науч. конф. – Красноярск, 2021. – С. 249-258.
- [4] Гребенкина С.А., Гребенкина И.А. Интеллектуальные транспортные системы в разрезе национальных интересов Российской Федерации: новые вызовы и угрозы // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 444-450. – DOI: 10.21603/2500-3372-2022-7-4-444-450.
- [5] Федюкин Ю.В. Внедрение интеллектуальных транспортных систем в России // Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее: сб. ст. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2022. – С. 138-145. – DOI: 10.47581/2022/AX-04/Fedukin.01.
- [6] Минниханов Р.Н., Дагаева М.В., Махмутова А.З. Развитие интеллектуальных транспортных систем: единые цифровые платформы для безопасного управления транспортной системой // Безопасность дорожного движения. – 2022. – № 3. – С. 19-22.
- [7] Габдурахманов Л.Р., Минниханов Р.Н., Тинчурин Р.Ф. Интеллектуальные транспортные системы – современная концепция обеспечения безопасности дорожного движения // Научный портал МВД России. – 2022. – № 1 (57). – С. 41-50.
- [8] Жанказиев С.В., Воробьев А.И., Гаврилюк М.В. Принципы формирования государственной системы сертификации элементов интеллектуальных транспортных систем в Российской Федерации // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 1-2 (92-93). – С. 3-6.
- [9] CEN/TS 16157. Intelligent transport systems – DATEX II data exchange specifications for traffic management and information. – Brussels: European Committee for Standardization. – 2022.
- [10] ISO 14813-1:2015. Intelligent transport systems – Reference model architecture(s) for the ITS sector – Part 1: ITS service domains, service groups and services. – Geneva: International Organization for Standardization. – 2015.
- [11] Торопов Н.Ю., Анохов И.В. Цифровизация автомобильных дорог: учиться на уроках прошлого // Автомобильные дороги. – 2025. – № 9 (1126). – С. 104-109.
- [12] CEN/TC 278 Intelligent Transport Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.itsstandards.eu/> (дата обращения: 30.04.2026).
- [13] El Faouzi N.-E., Leung H., Kurian A. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – A survey // Information Fusion. – 2011. – Vol. 12. – No. 1. – P. 4-10. – DOI: 10.1016/j.inffus.2010.06.001.
- [14] Lana I., Sanchez-Medina J., Vlahogianni E. From Data to Actions in Intelligent Transportation Systems: A Prescription of Functional Requirements for Model Actionability // IEEE Access. – 2020. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2969144.

-
- [15] Андреев Е.О., Жанказиев С.В., Зырянов В.В., Павлов А.С. Развитие архитектуры интеллектуальных транспортных систем // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18. – № 1. – С. 38-43. – DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43.
- [16] Давыдов Р.Д., Ахмадов Г.Д., Белов М.Ю., Панкратов А.И. Методология анализа технических и программных элементов как основы эффективного управления национальной сетью интеллектуальных транспортных систем // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 4 (83). – С. 67-78.

METHODOLOGICAL APPROACH TO ORGANIZING REGULAR MONITORING OF INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS ELEMENTS ON PUBLIC ROADS

Davydov R. D.^{1,1}, Akhmadov G. D.^{1,2}, Zhabrikov M. V.^{1,3}

¹ Federal Autonomous Institution «Russian Road Research Institute» (FAI «ROSDORNII»), Moscow, Russia.

E-mail: ¹ davydov@rosdornii.ru, ² akhmadov@rosdornii.ru, ³ maxpkey@mail.ru

Abstract. The article presents a methodological approach to regular monitoring of peripheral equipment and software of intelligent transport systems (hereinafter referred to as ITS) deployed on public roads in the Russian Federation. The relevance of the study is driven by the absence of a unified and reproducible mechanism for collecting and processing information on ITS elements (peripheral equipment and software), which results in fragmented datasets and complicates managerial decision making related to the development of digital road infrastructure. An organizational and methodological approach to systematic monitoring is proposed, covering the full cycle of primary statistical data management: formation of a respondent base, development of standardized survey forms, organization of methodological support for monitoring participants, and procedures for processing primary data. Particular attention is paid to ensuring the completeness, reliability, and comparability of information provided by ITS owners and operators. Within the proposed approach, procedures for data normalization, record deduplication, and format and logical validation are developed to minimize the influence of the human factor and improve the quality of analytical results. The proposed approach ensures the reproducibility of monitoring processes and can be used as a tool for regular observation of ITS infrastructure, as well as a basis for public procurement planning, strategic planning, and the establishment of statistical observation in the field of ITS.

Keywords: *intelligent transport systems, ITS monitoring, data collection, format logical validation, statistical observation.*

References

- [1] Egorov S.V., Shatsionok P.V., Erpyleva A.I., Zharkov D.I. Mirovoy i rossiyskiy opyt primeneniya intellektualnykh transportnykh sistem (World and Russian experience in the application of intelligent transport systems). *Transportnoye delo Rossii* (Transport Business of Russia), 2022, no. 2, pp. 130-136. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_130. (in Russian)
- [2] Solodkiy A.I. Razvitiye intellektualnykh transportnykh sistem v Rossii: problemy i puti ikh resheniya. Novyy etap (Development of intelligent transport systems in Russia: problems and solutions. A new stage). *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* (Intellect. Innovations. Investments), 2020, no. 6, pp. 10-19. DOI: 10.25198/2077-7175-2020-6-10. (in Russian)
- [3] Krivoshein D.I., Popov A.A. Umnyye dorogi i intellektualnaya transportnaya sistema (Smart roads and intelligent transport system). *Dostizheniya nauki i tekhnologii – DNIT-2021: sb. nauch. statey po materialam Vseros. nauch. konf. (Achievements of Science and Technology – DNIT-2021: collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian Scientific Conference)*, Krasnoyarsk, 2021, pp. 249–258. (in Russian)

For citation:

Davydov R. D., Akhmadov G. D., Zhabrikov M. V. Methodological approach to organizing regular monitoring of intelligent transport systems elements on public roads. *Intelligent transport*, 2026, no. 2(38), pp. 92–106. DOI: 10.24412/3033-6007-2026-238-92-106. (in Russian)

- [4] Grebenkina S.A., Grebenkina I.A. Intellekturnyye transportnyye sistemy v razreze natsionalnykh interesov Rossiyskoy Federatsii: novyye vyzovy i ugrozy (Intelligent transport systems in the context of the national interests of the Russian Federation: new challenges and threats). *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskiye, sotsiologicheskiye i ekonomicheskiye nauki* (Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic Sciences), 2022, vol. 7, no. 4, pp. 444–450. DOI: 10.21603/2500-3372-2022-7-4-444-450. (in Russian)
- [5] Fedyukin Yu.V. Vnedreniye intellektualnykh transportnykh sistem v Rossii (Implementation of intelligent transport systems in Russia). *Avtomobili, transportnyye sistemy i protsessy: nastoyashcheye, proshloye i budushcheye: sb. st. IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Automobiles, Transport Systems and Processes: Present, Past and Future: collection of articles of the IV International Scientific and Technical Conference)*, Kursk, 2022, pp. 138–145. DOI: 10.47581/2022/AX-04/Fedukin.01. (in Russian)
- [6] Minnihanov R.N., Dagaeva M.V., Makhmutova A.Z. Razvitiye intellektualnykh transportnykh sistem: yedinye tsifrovyye platformy dlya bezopasnogo upravleniya transportnoy sistemoy (Development of intelligent transport systems: unified digital platforms for safe management of the transport system). *Bezopasnost dorozhnogo dvizheniya (Road Safety)*, 2022, no. 3, pp. 19–22. (in Russian)
- [7] Gabdurakhmanov L.R., Minnihanov R.N., Tinchurin R.F. Intellekturnyye transportnyye sistemy – sovremennaya kontseptsiya obespecheniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya (Intelligent transport systems – a modern concept for ensuring road safety). *Nauchnyy portal MVD Rossii (Scientific Portal of the Ministry of Internal Affairs of Russia)*, 2022, no. 1 (57), pp. 41–50. (in Russian)
- [8] Zhankaziev S.V., Vorobiev A.I., Gavriluk M.V. Printsipy formirovaniya gosudarstvennoy sistemy sertifikatsii elementov intellektualnykh transportnykh sistem v Rossiyskoy Federatsii (Principles of forming a state certification system for intelligent transport system elements in the Russian Federation). *Transport Rossiyskoy Federatsii (Transport of the Russian Federation)*, 2021, no. 1-2 (92-93), pp. 3–6. (in Russian)
- [9] CEN/TS 16157. Intelligent transport systems — DATEX II data exchange specifications for traffic management and information. Brussels, European Committee for Standardization, 2022.
- [10] ISO 14813-1:2015. Intelligent transport systems — Reference model architecture(s) for the ITS sector – Part 1: ITS service domains, service groups and services. Geneva, International Organization for Standardization, 2015.
- [11] Toropov N.Yu., Anokhov I.V. Tsifrovizatsiya avtomobilnykh dorog: uchitsya na urokakh proshlogo (Digitalization of roads: learning from the lessons of the past). *Avtomobilnyye dorogi (Automobile Roads)*, 2025, no. 9 (1126), pp. 104–109. (in Russian)
- [12] CEN/TC 278 Intelligent Transport Systems. URL: <https://www.itsstandards.eu/> (accessed 30.04.2026).
- [13] El Faouzi N.-E., Leung H., Kurian A. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – A survey. *Information Fusion*, 2011, vol. 12, no. 1, pp. 4–10. DOI: 10.1016/j.inffus.2010.06.001.
- [14] Lana I., Sanchez-Medina J., Vlahogianni E. From Data to Actions in Intelligent Transportation Systems: A Prescription of Functional Requirements for Model Actionability. *IEEE Access*, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2969144.
- [15] Andreev E.O., Zhankaziev S.V., Zyryanov V.V., Pavlov A.S. Razvitiye arkhitektury intellektualnykh transportnykh sistem (Development of the architecture of intelligent transport systems). *T-Comm: Telekommunikatsii i transport (T-Comm: Telecommunications and Transport)*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 38–43. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43. (in Russian)
- [16] Davydov R.D., Akhmadov G.D., Belov M.Yu., Pankratov A.I. Metodologiya analiza tekhnicheskikh i programnykh elementov kak osnovy effektivnogo upravleniya natsionalnoy setyu intellektualnykh transportnykh sistem (Methodology for the analysis of technical and software elements as a basis for effective management of the national intelligent transport system network). *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) (Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI))*, 2025, no. 4 (83), pp. 67–78. (in Russian)

ПАМЯТИ УШЕДШИХ ЧЛЕНОВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ ЖУРНАЛА

С прискорбием сообщаем, что ушли из жизни члены редколлегии журнала «Интеллектуальный транспорт» Владимир Георгиевич Матюхин и Юрий Ошарович Пазойский.

Владимир Матюхин стоял у истоков создания Федерального агентства правительственной связи и информации при Президенте РФ (ФАПСИ), а в 1999-2003 годах являлся его генеральным директором. Занимал посты первого заместителя Министра обороны России и руководителя Федерального агентства по информационным технологиям.

В НИИАС Владимир Георгиевич возглавлял работы по созданию интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте – одного из наиболее масштабных и перспективных проектов цифровой трансформации отрасли. Благодаря усилиям Владимира Матюхина, НИИАС стал одним из ключевых центров развития интеллектуальных транспортных систем. Владимир Георгиевич являлся создателем научной школы сетецентрических систем адаптивного управления движением поездов на основе мультиагентных технологий, заложив фундамент для новых подходов к управлению перевозочным процессом, автоматизации и развитию цифровых железных дорог.

Юрий Пазойский был выдающимся учёным, развивал отечественную транспортную науку, написал большое количество трудов, в том числе по организации пассажирских перевозок в дальнем и пригородном сообщениях. Руководил научной школой «Организация пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте». Подготовил тысячи инженеров-эксплуатационников, более 250 дипломников, 14 кандидатов технических наук.

АО «НИИАС» выражает соболезнования родным и близким Владимира Матюхина и Юрия Пазойского.



Владимир Георгиевич Матюхин
д.т.н., председатель Экспертного совета
АО «НИИАС»



Юрий Ошарович Пазойский
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
«Железнодорожные станции
и транспортные узлы», РУТ (МИИТ)

