

На правах рукописи



Луганченко Никита Максимович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ПРИНЦИПАХ ЦИФРОВОГО СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические
системы страны, ее регионов и городов,
организация производства на транспорте

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Научный руководитель –

Числов Олег Николаевич,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Станции и грузовая работа» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

Официальные оппоненты –

Ларин Олег Николаевич,

доктор технических наук, профессор кафедры «Цифровые технологии управления транспортными процессами» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», г. Москва

Четчуев Максим Владимирович,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), г. Санкт-Петербург

Ведущая организация –

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС), г. Новосибирск

Защита состоится «11» декабря 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.03 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 (главный корпус, читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2, и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.03
доктор технических наук, профессор



В. А. Финоченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В условиях цифровой трансформации экономики и реализации программ Индустрии 4.0 приоритетное значение приобретает переход железнодорожного транспорта на принципы интеллектуального управления. Стратегия цифровой трансформации ОАО «РЖД» предусматривает внедрение технологий искусственного интеллекта, больших данных и цифровых двойников. Однако методы формализации транспортно-технологических процессов (ТТП), особенно в сложных узловых и мультиагентных припортовых системах, не в полной мере отвечают современным вызовам и остаются недостаточно проработанными. Существующие эмпирические подходы зачастую не учитывают динамику и вариативность грузо- и поездопотоков и, что особенно важно, транспортные конфликты – состояния, при которых множеству транспортных средств в один и тот же момент времени требуется одна и та же последовательность технологических операций (алгоритм действий, аксиомата) или транспортные маршруты имеют одноуровневые пересечения. Это приводит к простоям подвижного состава, снижению пропускной способности и недостаткам в управлении.

Возникает объективная необходимость в разработке новых цифровых принципов управления транспортным производством, основанных на формализации ТТП с применением аксиоматного подхода, позволяющего не только анализировать, но и прогнозировать конфликтные ситуации на принципах цифрового системотехнического моделирования с применением рекуррентных нейронных сетей (РНС), теории нечётких множеств (ТНМ), теории активных систем (ТАС). Необходимость научно-методического развития вышеприведенных технологий определяет цель, задачи и актуальность темы диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие теории управления железнодорожными станциями и узлами, цифровизации и интеллектуализации транспортных процессов внесли такие учёные, как И.Я. Аксенов, В.И. Апатцев, В.Д. Верескун, А.Э. Горев, Ю.И. Ефименко, В.Н. Зубков, В.И. Колесников, М.В. Колесников, П.В. Куренков, Н.Н. Лябах, Э.А. Мамаев, Л.Б. Миротин, В.А. Персианов, О.Д. Покровская, Е.Н. Розенберг, О.Н. Числов и др.

Вопросы цифровизации, интеллектуализации и моделирования транспортно-технологических процессов отражены в трудах М.В. Бакалова, А.С. Балалаева, С.А. Бессоненко, С.П. Вакуленко, М.А. Виноградова, В.Г. Галабурды, Д.В. Ефанова, В.М. Задорожного, В.В. Зырянова, С.Н. Корнилова, А.П. Кузнецова, Б.М. Лapidуса, О.Н. Ларина, О.В. Москвичева, А.В. Новичихина, В.Е. Нутович, А.Т. Осьминина, Р.Н. Паршиной, М.Б. Петрова, В.В. Повороженко, Н.В. Правдина, Ю.О. Пазойского, Т.А. Прокофьевой, А.Н. Рахмангулова, С.М. Резера, П.К. Рыбина, А.А. Климова, А.А. Сидракова, А.А. Смехова, Е.Н. Тимухиной, В.В. Хана, В.А. Шарова, И.В. Штефко, Е.А. Чеботаревой, М.В. Четчуева, Н.Г. Янковской и др., а также в работах зарубежных исследователей: Кофмана А., Лалонда Б., Гули Т., Хардера, Рене де Костера, Уорда Р.Э., Хау Л.Л., Йованович П., Уотсона М., Поттгоффа Г., Шеннон К., Дэниела Дж. Дюбуа, Гордон Ф. Ньюэлл и др.

Однако, как показал анализ, вопросы формализации ТТП с использованием аксиоматного подхода и последующей интеллектуализации управления с применением рекуррентных нейронных сетей, учитывающих классификацию транспортных конфликтов, остаются недостаточно изученными. Отсутствуют или

слабо развиты комплексные подходы к интеграции динамических моделей прогнозирования в системы поддержки принятия решений.

Целью диссертационной работы является развитие теоретических и методических положений по цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на основе аксиоматного моделирования с применением элементов искусственного интеллекта (рекуррентных нейронных сетей, теории нечётких множеств и теории активных систем).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- выполнить анализ существующих методов моделирования и интеллектуализации управления железнодорожными ТТП (линейное и целочисленное программирование, имитационное моделирование, метаэвристики, машинное обучение), выявить их достоинства и недостатки;
- развить метод аксиоматного моделирования транспортно-технологических процессов (АМТТП), предложив формализацию базовой (АМТТП-Б) и модернизированной (АМТТП-М) моделей с использованием рекуррентных нейронных сетей, теории нечётких множеств и теории активных систем;
- разработать системную классификацию железнодорожных транспортных конфликтов (I, II и III рода) и сформировать комплекс вероятностных моделей для расчёта загрузки инфраструктуры в условиях конфликтов;
- предложить методы повышения стационарности баз данных параметров управления ТТП (дифференцирование, логарифмическое преобразование, сезонное дифференцирование, скользящие средние) для повышения точности прогнозирования в интеллектуальных транспортных системах;
- реализовать разработанные методы в виде программного комплекса и выполнить экспериментальную проверку на примере транспортных объектов.

Объектом исследования железнодорожные транспортно-технологические процессы и системы управления ими, обеспечивающие многовариантность решений с учетом узлового взаимодействия видов транспорта.

Предметом исследования являются методы, модели и алгоритмы цифрового аксиоматного системотехнического моделирования управления железнодорожными ТТП, включая формализацию транспортных конфликтов и повышение стационарности баз данных параметров управления.

Диссертация выполнена в рамках паспорта научной специальности 2.9.1 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте»: п. 1. «Транспортные системы и сети страны, их структура, комплексное развитие», п. 8. «Организация и технологии транспортного производства. Цифровизация на транспорте», п. 9. «Управление транспортным производством и перевозками в организационно-технических системах».

Теоретико-методологической основой исследования явились научные труды ведущих учёных в области управления транспортными системами, теории нечётких множеств, теории активных систем, рекуррентных нейронных сетей, методов математической статистики и теории вероятностей, комбинаторных методов, а также законодательные и нормативные документы РФ, отчётные данные ОАО «РЖД» и результаты исследований автора.

Положения, выносимые на защиту:

- метод аксиоматного моделирования транспортно-технологических процессов (АМТП), включая совершенствование базовой (АМТП-Б) и интеграцию с модернизированной (АМТП-М) моделью на основе рекуррентных нейронных сетей, теории нечётких множеств и теории активных систем;
- системная классификация железнодорожных транспортных конфликтов I, II и III рода и комплекс вероятностных моделей расчёта загрузки элементов инфраструктуры;
- комплексный метод повышения стационарности баз данных параметров управления транспортно-технологическими процессами;
- модель двухуровневой РНС-архитектуры (стратегический уровень и тактический уровень) для прогнозирования вероятностей транспортных конфликтов и классификации предконфликтных состояний;
- программные комплексы и результаты автоматизированной экспериментальной проверки параметров транспортной работы на реальных объектах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в развитии теоретических и методических положений по цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на основе аксиоматного моделирования с применением принципов интеллектуального анализа. Конкретные элементы новизны заключаются в следующем:

- развит метод аксиоматного моделирования транспортно-технологических процессов (АМТП), включая формализацию базовой (АМТП-Б) и модернизированной (АМТП-М) моделей, отличающихся использованием рекуррентных нейронных сетей, теории нечётких множеств и теории активных систем;
- впервые предложена системная классификация железнодорожных транспортных конфликтов (I, II и III рода), учитывающая одноуровневые пересечения маршрутов подвижного состава и конфликты аксиомат;
- сформирован комплекс регрессионных и вероятностных моделей для расчёта загрузки элементов узловой инфраструктуры в условиях транспортных конфликтов, позволивший определить продолжительность совпадений маршрутов и оценить степень нечёткости использования аксиомат;
- предложены методы повышения стационарности баз данных параметров управления ТТП (дифференцирование, логарифмическое преобразование, сезонное дифференцирование, скользящие средние), дающие возможность повысить точность прогнозирования в интеллектуальных транспортных системах.

Теоретическая и практическая ценность исследования заключается в развитии научных представлений о методах цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на основе аксиоматного моделирования, функционирующих в условиях транспортных конфликтов, нечёткости эксплуатационных параметров и динамически изменяющейся поездной обстановки, а также в разработке графологического подхода к формированию аксиомат, классификации транспортных конфликтов и определении параметров эффективного управления транспортным производством.

Практическая значимость научных результатов состоит в возможности ис-

пользования методологического аппарата диссертационного исследования региональными органами власти в области транспорта, дирекциями управления движением и дирекциями инфраструктуры ОАО «РЖД» при подготовке, оценке и реализации инфраструктурных проектов развития и выбора рациональных форм организации транспортной работы.

Разработаны программные комплексы «Axiomatic v.1» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681955), «ЛГРЦ v.1.0» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690984) «АМРВ v. 1.0» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026683768), позволяющие рассчитывать временные параметры транспортных процессов и получать логическую технологическую модель объекта. Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-29-00869.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались на международных научно-практических конференциях: «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, 2021–2026 гг.); «Транспорт и логистика» (Ростов-на-Дону, 2022–2026 гг.); «МехТрибоТранс» (Ростов-на-Дону, 2022–2023 гг.); «Цифровые технологии транспорта и логистики» (Москва, 2022 г.); «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте» (Липецк, 2024 г.); «Тихомировские чтения: наука и современная практика технологии перевозочного процесса» (Гомель, БелГУТ, 2023 г.); «Интеллектуальные транспортные системы» (Москва, 2024-2025 г.); юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию академика В.Н. Образцова и 100-летию кафедр «ЖСиТУ» и «УЭРиБТ» (Москва, 2024 г.); на заседаниях кафедры «Станции и грузовая работа» ФГБОУ ВО РГУПС. Результаты диссертационного исследования были представлены на конкурсах: «Молодые ученые транспортной области – 2022» (третье место в номинации «Модели устойчивого развития предприятий транспортной отрасли»); XII Всероссийском конкурсе научных работ среди студентов и аспирантов по транспортной проблематике (третье место в номинации «Повышение провозной способности железных дорог на основе систем автоматизированного управления движением поездов»), а также 2 место во Всероссийском конкурсе «Транспорт будущего» (2023).

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов основана на корректном применении основных положений фундаментальных и прикладных наук; использованием апробированного научно-методического аппарата, строгости и прослеживаемости математических преобразований, экспериментальными исследованиями и расчетами автора, апробацией результатов исследования на реальном объекте.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования используются в практической деятельности Сев.-Кав. Территориального центра фирменного транспортного обслуживания – филиал ОАО «РЖД», Сев.-Кав. Дирекции управления движением – филиал Центральной дирекции управления движением – филиал ОАО «РЖД» при решении задач цифровизации управления транспортно-технологическими процессами. Результаты диссертационного исследования также используются в учебном процессе и научно-исследовательской работе ФГБОУ ВО РГУПС при разработке учебно-методических

комплексов по дисциплине «Железнодорожные станции и узлы», а также в НИР студентов и дипломном проектировании. Имеются акты внедрения.

Публикации. Основное содержание диссертации и результаты исследования опубликованы в 19 научных работах, включая 15 статей общим объемом 20,23 п.л. (авторский вклад – 7,08 п.л.), одну коллективную монографию общим объемом 28,25 п.л. (авторский вклад – 4,71 п.л.), а также 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В том числе 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем работы определены целью и задачами, поставленными и решенными в ходе исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 226 наименований и 3 приложений. Работа изложена на 178 страницах основного текста, содержит 39 рисунков, 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены цель и задачи, предмет и объект исследования, теоретико-методологическая основа, научная новизна, практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Управление железнодорожными транспортно-технологическими процессами на принципах интеллектуализации и цифровизации: история и перспективы развития» исследована динамика общего грузооборота и пассажирооборота видов транспорта РФ, приведен исторический обзор развития принципов цифровизации железнодорожных управляющих транспортно-технологических систем. (рисунок 1). Также представлен анализ отечественных и зарубежных интеллектуальных транспортных систем (ИТС).



Рисунок 1 – Эволюция инструментария управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами

Отмечено, что внедрение цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами сопряжено со сложной и многоэтапной инфраструктурной реструктуризацией, решение комплексных проблем которой требуют всестороннего исследования. Актуальные факторы, влияющие на внедрение и развитие цифровизации управления транспортным производством представлены на рисунке 2.

Интеллектуальная транспортная система представлена структурой, включающей основные комплексы: 1 – комплекс управления транспортным производством; 2 – комплекс управления маркетингом, экономикой и финансами; 3 – комплекс управления инфраструктурой; 4 – комплекс управления персоналом и социальной сферой.



Рисунок 2 – Актуальные факторы внедрения цифровизации транспортных процессов
Общие принципы организации ИТС на транспорте представлены на рис. 3.



Рисунок 3 – Общие принципы функционирования интеллектуальных транспортных систем

В конце главы представлена последовательность диссертационного исследования по разработке теоретических и методических принципов совершенствования инструментария цифровизации управления транспортными процессами.

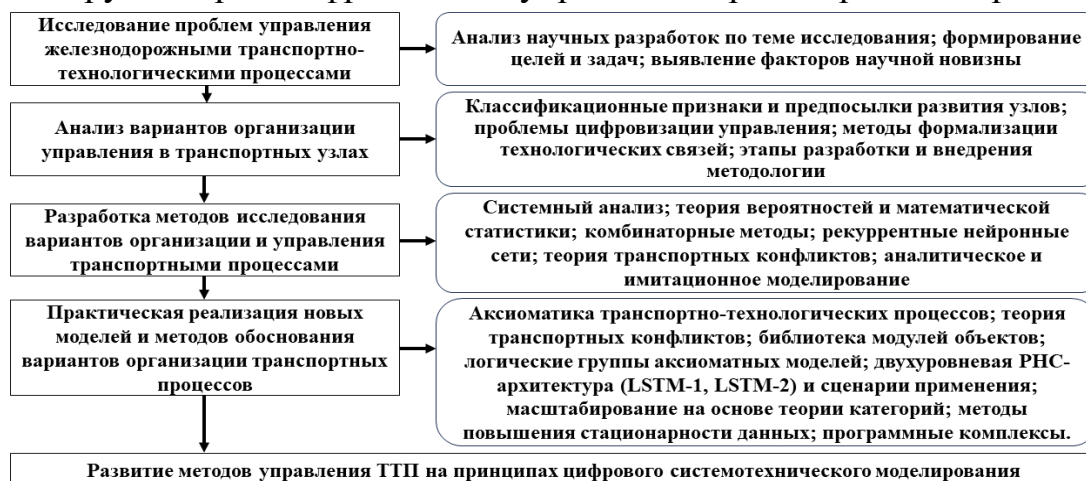


Рисунок 4 — Структура диссертационного исследования

Вторая глава «Теоретические основы цифровизации в методах решения прикладных задач управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами» посвящена исследованию отечественных и зарубежных научных разработок в области решения прикладных задач цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами.

В таблице 1 представлено исследование методов и моделей, применяемых в параметризации и решении задач управления ТТП, включая подходы к цифровизации и интеллектуализации транспортного производства.

Таблица 1 – Существующие методы и модели параметризации технологических связей при решении задач управления ТТП

№	Методы и модели	Расчетная формула	Область применения
1	Линейное программирование (минимизация затрат)	$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$, где c_{ij} – стоимость перевозки единицы груза от поставщика i к потребителю j ; x_{ij} – количество груза, перевозимого от поставщика i к потребителю j ; m – количество поставщиков; n – количество потребителей	Транспортная логистика, управление цепями поставок, распределение грузо- и вагонопотоков
2	Нелинейное программирование (модель задержки BPR)	$\min T = \sum_{k=1}^K \frac{x_k}{v_k(1 - \beta_k x_k)}$, где x_k – интенсивность потока на участке дороги k ; v_k – скорость свободного движения на участке k (скорость при отсутствии загрузки); β_k – коэффициент, отражающий влияние загрузки на скорость; K – количество участков в сети.	Моделирование заторов, оптимизация светофорного регулирования, проектирование дорожных сетей
3	Дифференциальные уравнения (модель LWER)	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q(\rho)}{\partial x} = 0$, где $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ – изменение плотности во времени – скорость изменения количества транспортных средств ρ в фиксированной точке дороги x с течением времени t ; $\frac{\partial q(\rho)}{\partial x}$ – изменение потока в пространстве – пространственная производная потока $q(\rho)$	Анализ волн заторов, адаптивное управление магистралями, оценка последствий дорожно-транспортных происшествий
4	Интегральные уравнения (время обслуживания)	$T_{\text{обс}} = \int_0^Q \frac{q}{u(s)} ds$, где Q – объём груза; $u(s)$ – интенсивность обработки грузов в зависимости от текущей загрузки s .	Планирование транспортной работы портов, складов
5	Логистическая регрессия (прогноз выбора)	$P(y = 1 x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}}$, где $P(y = 1 x)$ – общее время обслуживания груза объемом Q ; x_i – факторы, влияющие на выбор; β_i – коэффициенты влияния фактора.	Прогноз грузо- и пассажиропотоков, анализ влияния тарифов, оценка конкуренции видов транспорта
6	Множественная линейная регрессия	$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$ где Y – зависимая переменная (например, время доставки); X_i – независимые переменные (факторы влияния); β_i – коэффициенты регрессии; ε – случайная ошибка	Прогнозирование спроса, анализ затрат, выявление зависимостей в транспортных процессах

Продолжение таблицы 1

№	Методы и модели	Расчетная формула	Область применения
7	Имитационные модели (А – по пропускной способности, Б – по времени обработки)	А) $C = \frac{N}{\sum_{i=1}^N T_i} \cdot f(\alpha, \beta)$, где N – количество транспортных единиц; T_i – время прохождения i-й единицы; $f(\alpha, \beta)$ – корректирующий коэффициент для учета неравномерности (α) и задержек (β). Б) $T_{\text{терм}} = \sum_{k=1}^M \left(\frac{V_k}{\mu_k} + W_k \right)$, где V_k – объем груза k-й категории; μ_k – скорость обработки для категории k; W_k – время ожидания.	А) Оценка пропускной способности станций, узлов, транспортных магистралей с учетом случайных событий, Б) Оптимизация транспортной работы складов, грузораспределительных центров
8	Модель ARIMA (прогнозирование временных рядов)	$(1 - \sum \varphi_i L^i)(1 - L)^d Y_t = c + (1 - \sum \theta_i L^i) \varepsilon_t$, где L – оператор лага; φ, θ – параметры модели; d – порядок дифференцирования.	Прогноз грузо- и пассажиропотока, загруженности путей сообщения, учет сезонности, анализ задержек
9	Многокритериальная оптимизация	$F(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \dots + w_n f_n(x) \rightarrow \min$, где $f_i(x)$ – частные критерии; w_i – весовые коэффициенты.	Баланс противоречивых целей при планировании транспортной работы
10	Макромодель Гриншилдса (скорость-плотность)	$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_i} \right)$, где v – скорость потока; v_f – свободная скорость; k – скорость потока; k_i – свободная скорость.	Стратегическое планирование, оценка пропускной способности дорог, макроимитация
11	Микромодель ГИП (модель водителя)	$a(t) = \alpha \frac{\Delta v(t-\tau)}{s(t-\tau)} + \beta \frac{\Delta v(t-\tau)}{v(t-\tau)}$, где Δv – разность скоростей; τ – время реакции субъекта системы; α, β – параметры.	Моделирование движения, разработка систем адаптивного круиз-контроля
12	Модель потоков в сетях (Ford-Fulkerson)	$\max \sum_{s \in S} f_s$, при $\sum_i f_{ij} = \sum_k f_{jk} \forall j$, где f_{ij} – поток по ребру (i, j); S – источники транспортного потока.	Распределение трафика по альтернативным путям, оптимизация потоков структур управления.

Представлена разработка последовательности этапов внедрения методологии цифровизации управления параметрами транспортного производства, сопряженных со сложноформализуемыми и нечеткими динамическими параметрами (таблица 2).

Таким образом, данное научное направление требует поиска многофакторных и многовариантных решений, сопряженных со сложноформализуемыми и нечеткими параметрами управления в условиях динамичной транспортной обстановки.

Таблица 2 – Последовательность этапов разработки и внедрения методологии цифровизации управления параметрами транспортно-технологических процессов

Этапы	Концепция этапа
1) Декомпозиция	Формирование вектора управляющих параметров $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ на основе экспертного анализа
2) Синтез сценариев	Разработка альтернативных сценариев развития технологической ситуации S_k (пессимистичный, рациональный, оптимистичный), где $k = \overline{1, K}$.
3) Определение связей	Установление аналитической зависимости $S_k = f(N_j)$ между комбинациями значений параметров и сценариями.
4) Классификация параметров	Разделение параметров N_j на активные (управляемые) (N_j^a), ограниченно управляемые (N_j^o) и пассивные (N_j^n)
5) Расчет целевых значений	Определение оптимальных значений параметров N_j^* для целевого сценария S_k , обращением зависимости, заданной оператором f по формуле $N_j^* = f^{-1}(S_k^*)$, S_k^* - целевой сценарий управления
6) Поиск субоптимального решения	Нахождение достижимого набора параметров N_j^δ , максимально близкого к целевому N_j^* , с учетом ограничений. Это решается задачей минимизации специальной меры близости d по формуле $N_j^\delta = \arg_j \min d(N_j, N_j^*)$, где N_j – комбинация значений параметров; N_j^* – набор идеальных значений управляемых параметров.
7) Реализация	Трансформация найденных значений параметров в конкретные управляющие воздействия (корректированные технологические карты и графики, планы и этапы выполнения работ, программы и стратегии развития и т.п.)

В третьей главе «Развитие методов управления транспортно-технологическими процессами на принципах цифрового аксиоматного системотехнического моделирования» выполнена разработка авторского метода цифровизации управления транспортным производством с применением принципов нейросетевого анализа.

Постановка задачи: в транспортно-технологической системе (ТТС) при известных показателях транспортного производства требуется организовать технологическое управление в условиях нечеткого взаимодействия и возможных транспортных конфликтах, чтобы параметры ТП были наиболее рациональными, т.е найти минимум.

$$M^* = \arg \min_m \left(\frac{\sum_{c \in C} w_c \cdot P_c(t + \tau) \cdot I[c \in m]}{\sum_{m \in M} \lambda \cdot T(АСТТП_m)} \right), \quad (1)$$

где M - множество допустимых аксиомат (вариантов организации транспортной работы); m – конкретный вариант управления; C - множество идентифицированных транспортных конфликтов (I, II и III рода); w_c - безразмерный весовой коэффициент значимости c -го конфликта, определяемый на основе экономических потерь от простоев и сбоев; $P_c(t + \tau)$ - безразмерная прогнозируемая верхним уровнем РНС вероятность возникновения конфликта с на горизонте упреждения τ ; $I[c \in m]$ - индикаторная функция, принимающая значение 1, при реализации варианта m -конфликт c -потенциально возможен, и 0 - в противном

случае; λ - безразмерный коэффициент регуляризации, обеспечивающий баланс между стремлением минимизировать риски конфликтов и сократить время выполнения технологических операций; $T(АСТТП_m)$ - прогнозное время выполнения аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов при выборе варианта m .

Первый показатель - взвешенный риск возникновения транспортных конфликтов, представляющий собой безразмерную величину (принимает значения от 0 до 1) и учитывающий вероятность каждого конфликта с учётом его значимости. Второй показатель - прогнозное время выполнения аксиомат станционных транспортно-технологических процессов, измеряемое в минутах. Оба показателя рассматриваются совместно в виде векторного критерия, а решение задачи сводится к поиску множества Парето-оптимальных вариантов управления, то есть таких вариантов, которые не могут быть улучшены одновременно по обоим показателям. Выбор единственного варианта из этого множества осуществляется лицом, принимающим решения, или с помощью метода свёртки нормированных критериев. Задача формулируется как двухкритериальная, и для каждого варианта управления $m \in M$ определяются два показателя, образующие векторный критерий.

Критерии рациональности: 1 – минимальное время простоя подвижного состава в транспортной системе и выполнения аксиоматы; 2 – минимальное количество управленческих воздействий при выполнении максимальных объемов работы; 3 – минимальные организационные издержки системы управления, которые складываются из стоимости локомотиво-часов маневровой работы, вагоно-часов простоя и потерь от неотправленных грузов.

Для целей исследования были разработаны библиотеки модулей объектов транспортной инфраструктуры. Сформированы логические группы аксиоматных моделей вариантов взаимодействия видов транспорта в мультимодальных системах с учетом авторского метода разрешения транспортных конфликтов.

Аксиоматная модель включает три укрупненные составляющие: 1 – АСТТП, аксиоматы станционных транспортно-технологических передвижений (ж.-д. транспорт); 2 – АТПВТ, аксиоматы технологических процессов водного транспорта; 3 – ТСПВП, транспортно-складские погрузочно-выгрузочные процессы, обеспечивающие связь между логическими группами АСТТП и АТПВТ; 4 – АПРМ, аксиоматы погрузочно-разгрузочных машин при перевалке грузов.

Логические группы аксиоматных моделей вариантов работы транспортного узла, железнодорожной станции и транспортно-складского комплекса представлены на рисунках 5, 6 и 7.

Приняты следующие обозначения: GL1 - главный путь (пути); PG1 - грузовой парк; SU - сортировочное устройство; PS - сортировочный парк; GFP1 - грузовой фронт порта; PRM_i - погрузочно-разгрузочная машина; DWL - склад; Q_i - грузовая единица; WRH - складской комплекс; PER - причал; SH - судно; DEP - отход судна. Символ $\mu(\dots)$ обозначает нечёткое множество параметров соответствующего компонента, а символы « $\leftrightarrow$ » и « θ » - логические связки последовательности и альтернативы выполнения операций.

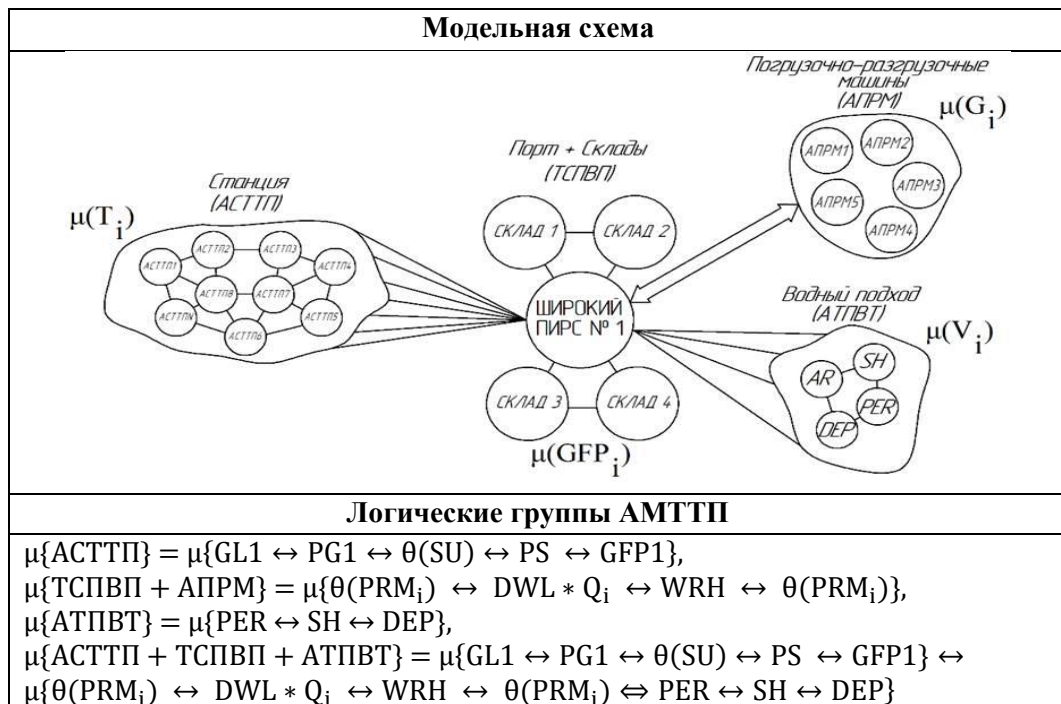


Рисунок 5 – Логические группы аксиоматических моделей работы транспортного узла

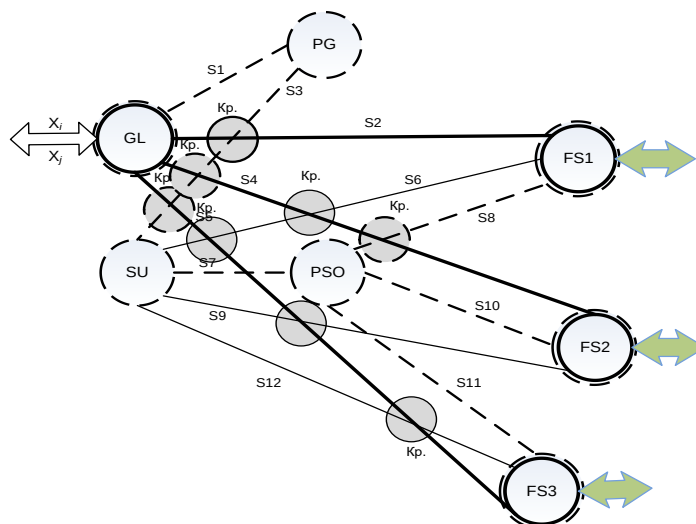


Рисунок 6 – Модельная схема и обозначения логических групп аксиоматических моделей транспортной работы железнодорожной станции

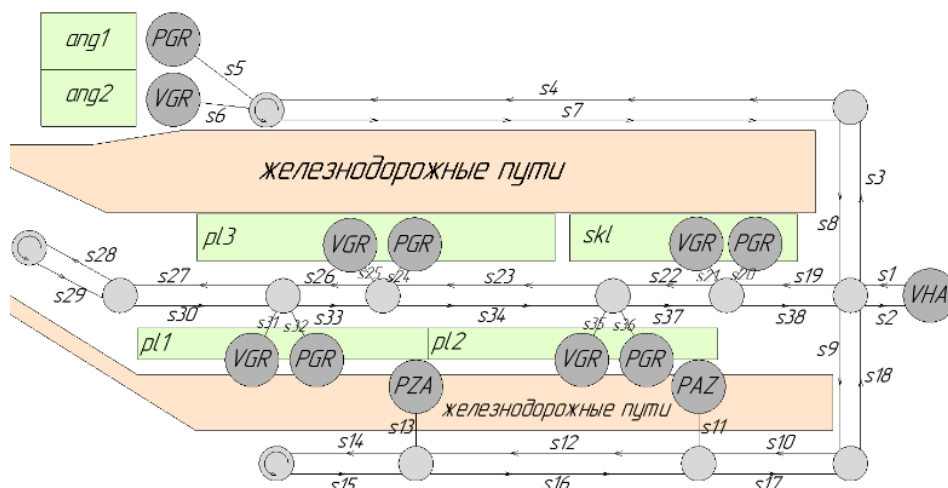
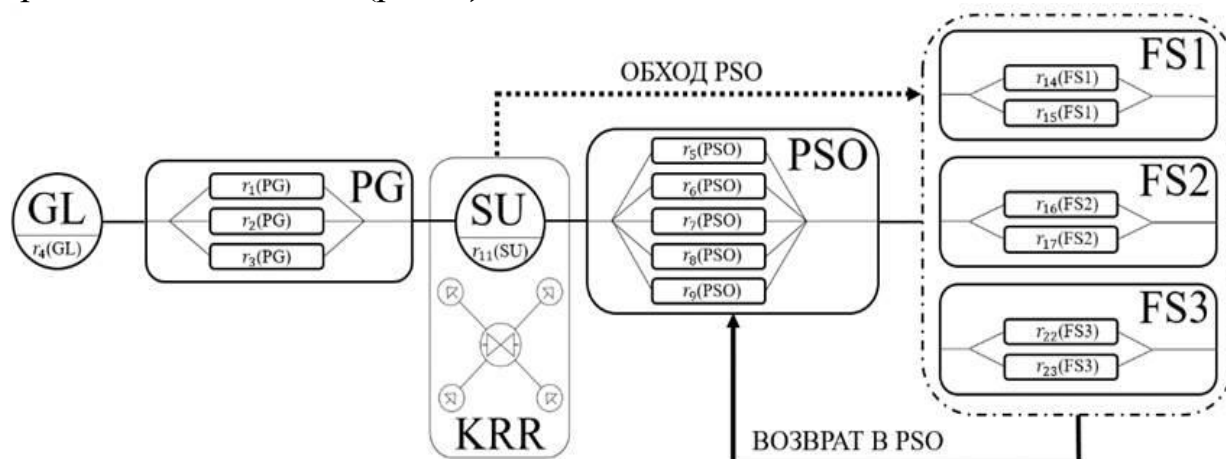


Рисунок 7 – Модельные схемы и обозначения логических групп аксиоматических моделей транспортной работы транспортно-складского комплекса

Разработана методика интерпретации представленных аксиоматных моделей с включением блока транспортных конфликтов в АМТПП на примере припортовой ж.-д. станции (рис. 8).



Примечание: GL - главный путь (пути); PG - грузовой парк; SU - сортировочное устройство; PSO - сортировочно-отправочный парк; FS1, FS2, FS3 - грузовые фронты; KRR - модуль одноуровневого пересечения маршрутов (ТК)

Рисунок 8 – Интерпретация АСТТП железнодорожной станции с включением блока транспортных конфликтов

Узел KRR (ТК) включает зону, где маршруты пересекаются на одном уровне, создающие потенциальные ТК II рода, которые являются объектом прогнозирования и управления в предложенной двухуровневой РНС-архитектуре. Проведена классификация ТК для основных типов объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) (таблица 3): мультимодальный транспортный узел (МТУ), железнодорожная станция (ЖДС) и транспортно-складской комплекс (ТСК).

Таблица 3 – Классификация ТК для типов ОТИ

ТК	Сущность	МТУ	ЖДС	ТСК
ТК I рода	Одна и та же аксиомата требуется двум или более транспортным единицам в один и тот же момент времени	К одному причалу одновременно подходят два судна под погрузку-выгрузку (аксиомата «швартовка к причалу №3»); одно становится на рейд	Два грузовых поезда одновременно прибывают на один свободный путь парка прибытия (аксиомата «занятие пути Р1»); один ожидает освобождения	Два автомобиля одновременно прибывают к одному доку склада под разгрузку (аксиомата «заезд на док №2»); второй ожидает в очереди
ТК II рода	Одноуровневое пересечение маршрутов двух разных аксиомат (маршрутов) в один момент времени	Состав подаётся под выгрузку на причал, одновременно с другого конца причала выезжает автомобиль, пересекая ж.-д. переезд	Маневровый состав идёт по стрелочной горловине на вытяжной путь, одновременно по этой же стрелке проходит поезд на припортовый фронт	Автомобиль выезжает из зоны склада через ворота А, одновременно погрузчик движется в ту же зону по той же дороге
ТК III рода	Смешанный конфликт, сочетающий признаки конфликтов I и II рода	Одному причалу одновременно требуются два судна (I род), при этом пути подхода к причалу заняты другими ТС, пересекающими маршруты подачи судов (II род)	Одновременно: одно сортировочное устройство нужно двум маневровым составам (I род) и маршруты их движения пересекаются на стрелочной горловине (II род)	Одновременно: один док нужен двум автомобилям (I род) и маршруты их движения по территории пересекаются (II род)

Разработаны блок-схемы решения ТК и выполнена их программная реализация в «АМПВ v.1» – модуль прогнозирования транспортных конфликтов на базе двухуровневой РНС (глава 4). В целях реализации нейросетевого анализа параметров управления транспортными процессами разработан переход моделей от АМТП-Б (базовой) к АМТП-М (модернизированной) на основе обработки данных на принципах рекуррентных нейронных сетей (РНС) и теории нечетких множеств (ТНМ).

Алгоритм развертки РНС (рисунок 9) при формировании АМТП включает девять последовательных шагов (W1–W9): ввод технико-технологических параметров и формирование модельной схемы станции (W1); ввод параметров местной работы и формирование маршрутов (W2); формирование аксиомат на основе вероятностной матрицы связей (W3); определение массива времен АМТП по условиям эксплуатации (W4); анализ графологических связей (W5); оценка степени нечеткости использования аксиомат (W6); формирование логических групп АМТП (W7); формирование АМТП с учетом транспортных конфликтов (W8); обучение РНС посредством отбора рациональных структур (W9).

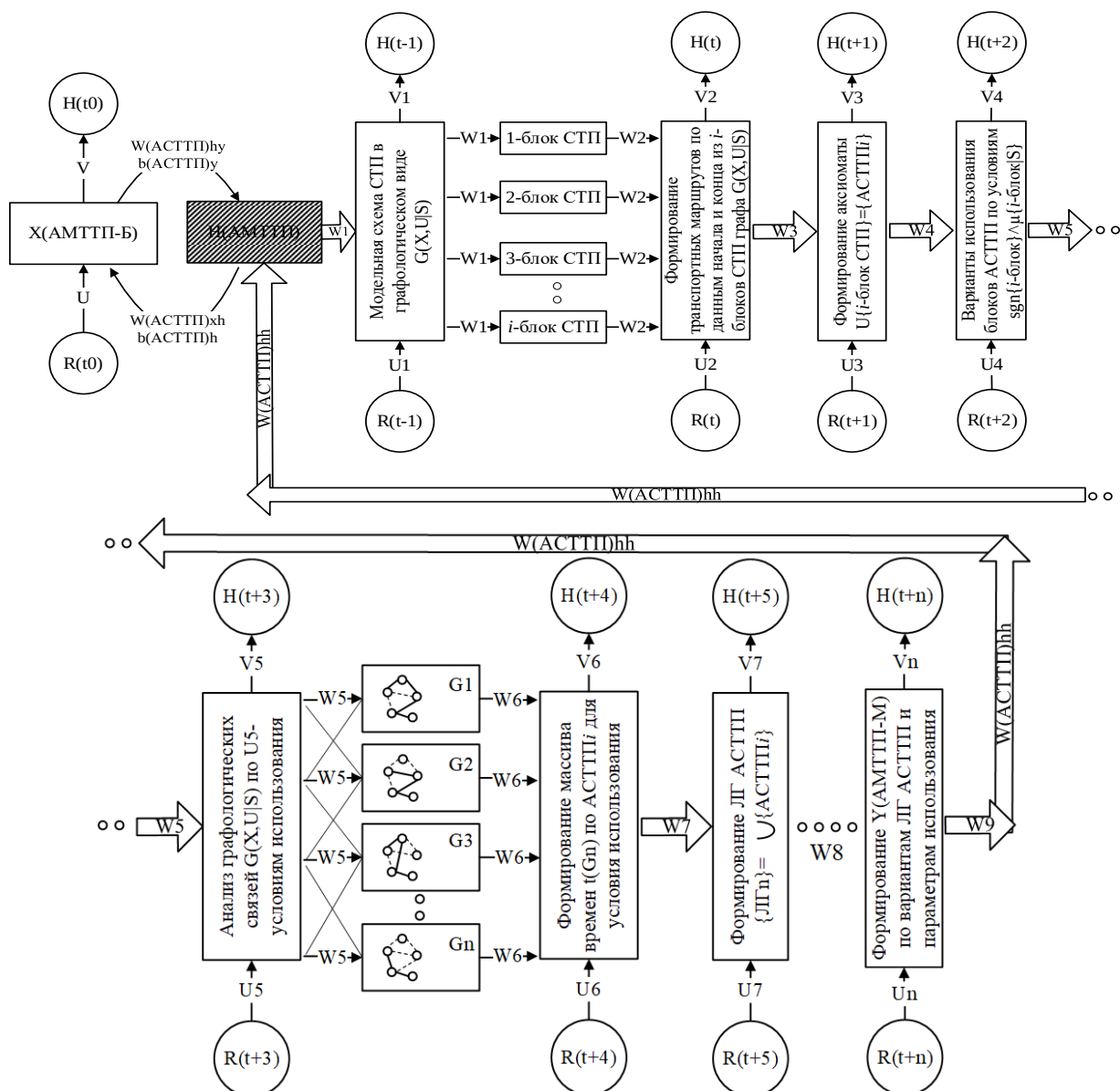


Рисунок 9 – РНС графологического формирования АМТП-М

Выполнена программная реализация в среде Python 3.10 методов повышения стационарности данных цифровизации управления АСТТП, на принципах: дифференцирования ($\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$), логарифмического преобразования ($\log(y_t)$), сезонного дифференцирования ($\Delta_s y_t = y_t - y_{t-s}$), скользящего среднего ($MA_t = \frac{1}{w} \sum_{i=0}^{w-1} y_{t-i}$).

Таким образом, в третьей главе развит метод аксиоматного моделирования ТТП, предложена системная классификация транспортных конфликтов I, II и III рода, а также разработаны теоретические основы организации двухуровневой архитектуры РНС для прогнозирования вариантов транспортной работы.

В четвертой главе «Программный комплекс прогнозирования транспортных конфликтов на основе двухуровневой РНС-архитектуры с масштабированием результатов» разработана программная среда двухуровневой двух-контурной архитектуры управления на основе рекуррентных нейронных сетей. Верхний уровень (LSTM-1) на основе ретроспективы состояний прогнозирует вероятности возникновения транспортных конфликтов первого, второго и третьего рода на горизонте 1–4 часа. Нижний уровень объединяет текущее состояние с полученным прогнозом через механизм внимания, после чего softmax-слой выдаёт вероятностное распределение по множеству аксиомат АСТТП. Разработаны архитектуры (рисунок 10) формирования РНС для работы с последовательностью АМТТП железнодорожных транспортных объектов. Известно, что новый временной параметр аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов (АСТТП)_{t+1} по новой модели АМТТП-М зависит от нормативного (эталонного) значения аксиомат (АСТТП)_t и прошлых значений аксиомат (АСТТП)_{t-1} по варианту уже выполненной работы – базовой АМТТП-Б.

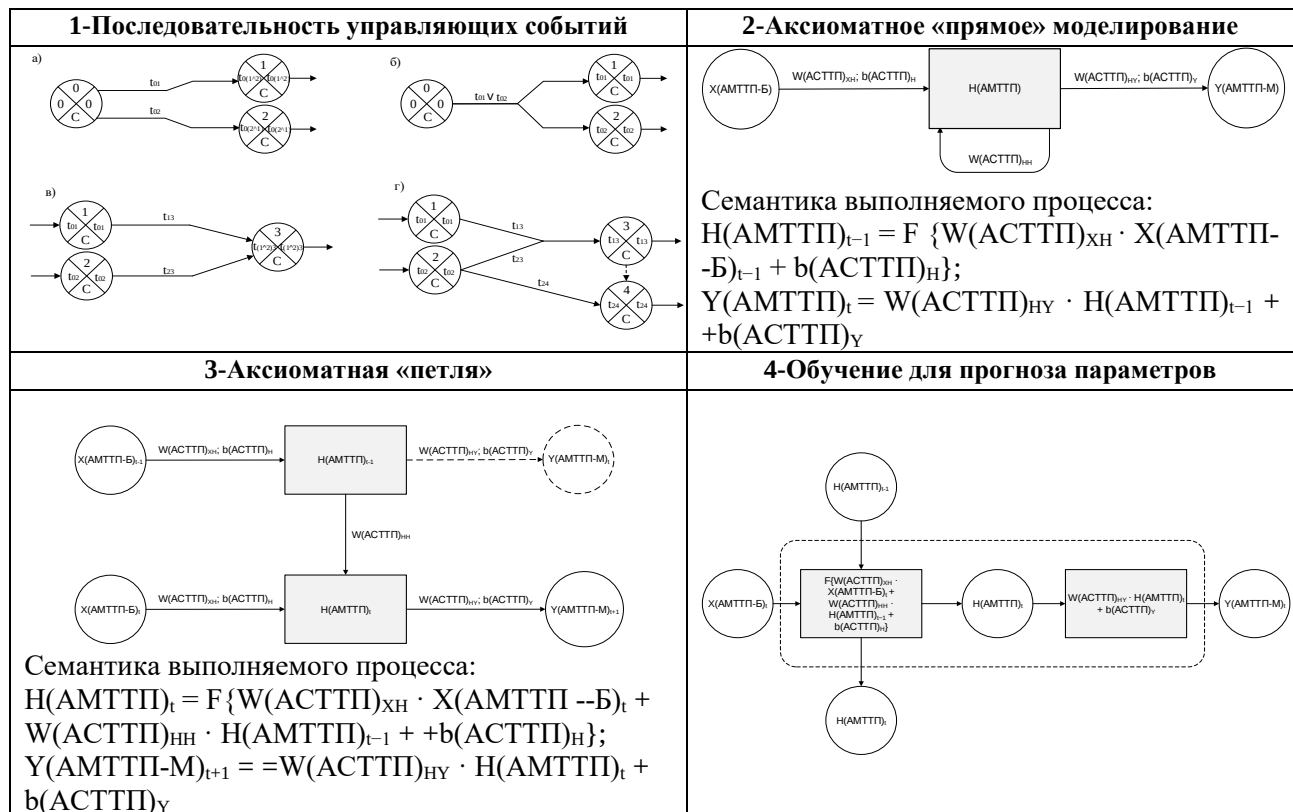


Рисунок 10 – Архитектуры этапов РНС-моделирования

В зависимости от того, сколько входов X – аксиомат АМТПП-Б и выходов Y – аксиомат АМТПП-М «подключаются» в конкретном прогнозировании варианта управления местной работой станции при одном разворачивании ячеек РНС во времени, возможны различные типы архитектуры РНС АМТПП:

а) – «много в один» («МвО»): из множества аксиомат входа X (АМТПП-Б) выбирается одна наиболее рациональная аксиомата выхода Y (АМТПП-М) для данного варианта управления;

б) – «один во много» («ОвМ»): аксиомата входа X (АМТПП-Б) в прогнозируемом варианте управления разделяется на несколько аксиомат выхода Y (АМТПП-М);

в) – «много во много» («МвМ»): либо соответствие количества входов и выходов аксиомат X (АМТПП-Б) = Y (АМТПП-М), либо нет – X (АМТПП-Б) $\neq$ Y (АМТПП-М). Примечание: при моделировании АМТПП чаще всего используется архитектура «МвМ».

Верхний уровень РНС (стратегический – LSTM-1) предназначен для долгосрочного прогнозирования вероятностей транспортных конфликтов на горизонте 1–4 часа. Используется LSTM-сеть типа «МвМ». На вход подаётся ретроспектива состояний за последние $K = 6$ тактов:

$$X_{strat}^{(t)} = [S_{t-K}, S_{t-K+1}, \dots, S_{t-1}, S_t], \quad (2)$$

где $S_t \in R^n$ – вектор состояния объекта (занятость элементов, временные параметры). Выход сети: $Y_{strat}^{(t+\tau)} = [P_{TK1}(t+\tau), P_{TK2}(t+\tau), P_{TK3}(t+\tau)]^T, \tau = 1, 2, 3, 4$.

Нижний уровень РНС (тактический – LSTM-2 + Attention) объединяет текущее состояние S_t с прогнозом верхнего уровня через механизм внимания. На вход подаётся конкатенация:

$$X_{tact}^{(t)} = [S_t \parallel Y_{strat}^{(t+1)}]. \quad (3)$$

Весовые коэффициенты внимания вычисляются как:

$$\alpha_\tau = \frac{\exp\left(v^T \tanh(W_a h_{t-1} + U_a Y_{strat}^{(t+\tau)})\right)}{\sum_{j=1}^4 \exp\left(v^T \tanh(W_a h_{t-1} + U_a Y_{strat}^{(t+j)})\right)} \quad (4)$$

Контекстный вектор: $c_t = \sum_{\tau=1}^4 \alpha_\tau Y_{strat}^{(t+\tau)}$.

Выходной слой softmax формирует вероятностное распределение по множеству аксиомат АМТПП:

$$P(a_j) = \frac{\exp(W_j \cdot h_t^{LSTM2} + b_j)}{\sum_{k=1}^m \exp(W_k \cdot h_t^{LSTM2} + b_k)} \quad (5)$$

Формализованное представление сценариев транспортного производства в терминах входных и выходных данных нейросетевого управления имеет следующий вид:

Сценарий 1 (регрессионное прогнозирование временных параметров): статический параметр $\theta(SU) = \text{const}$ заменяется динамическим прогнозом на основе GRU/LSTM-сети с глубиной анализируемой ретроспективы $K = 10$, входной вектор которой включает как временные параметры аксиомат $X_{ЖДС}^{(i)} = [t_{GL1}^{(i)}, t_{PG1}^{(i)}, t_{SU}^{(i)}, t_{PS}^{(i)}, t_{GFP1}^{(i)}]$, так и вектор контекстных параметров $X_{context}$ (текущая

загруженность инфраструктуры, погодно-климатические факторы, признак рабочей смены); сравнение с базовым подходом на статических нормативах показало снижение средней абсолютной ошибки (MAE) на 28 % для критической аксиоматы расформирования состава t_{SU} , что подтверждает преимущество динамического прогнозирования перед нормативным методом.

Сценарий 2 (классификация предконфликтных состояний): на основе последовательности выполненных аксиомат и соответствующих им временных меток классификатор относит текущую ситуацию к одному из четырех классов: $Y_{class} \in \{TK_1, TK_2, TK_3, TK_{нет}\}$, на горизонте упреждения $\Delta t \in [15, 30]$ минут; в ходе анализа выявлены характерные паттерны последовательностей аксиомат, предшествующих конфликтам: $GL1 \rightarrow GL1$ (поступление двух составов подряд без расформирования) $\rightarrow$ ТК-1 через 15–20 мин; $GL1 \rightarrow PG1 \rightarrow SU \rightarrow SU \rightarrow SU$ (затянувшееся расформирование) $\rightarrow$ ТК-2 через 10–15 мин. Достигнутая точность классификации на горизонте упреждения 15 минут составила $Assurasy = 0,91$, $F1\text{-score} = 0,90$, что свидетельствует о высокой надёжности модели как интеллектуального советчика диспетчерского персонала.

Сценарий 3 (вероятностное ранжирование аксиомат): последовательность выбора АМТПП интерпретируется как временной ряд, в котором каждое последующее решение зависит от предыдущих. Выходной слой тактического контура реализует распределение вероятностей по множеству допустимых аксиомат графологической модели $G(X, U|S)$:

$$P(a_j) = \text{softmax}(W \cdot h_t^{LSTM-2} + b), \quad (6)$$

где $a_j - j$ -я аксиомата из множества допустимых альтернатив, h_t^{LSTM-2} – скрытое состояние LSTM-ячейки второго уровня, W и b – матрица весов и вектор смещения выходного слоя соответственно.

Задача выбора следующей аксиоматы решалась с помощью LSTM-сети «МвМ» с softmax-выходом, обученной на исторических последовательностях управленческих решений, что позволило существенно сократить время выбора рациональной АМТПП по сравнению с полным комбинаторным перебором при точности относительно глобального оптимума 91 %

Масштабирование результатов РНС (теория категорий). При переходе от базовой аксиоматной модели (АСТТП-Б) к модифицированной (АСТТП-М) результаты РНС масштабируются. На примере времени простоя местного вагона представлен расчет коэффициента масштабирования: $d = \frac{t_{\text{стандарт по ТП}}}{t_{\text{факт по расчёту}}}$. Для рассматриваемого примера: $d = 4,24/4,48 = 0,946$. Установлена степенная связь между фактическим и стандартным временем: $t_{\text{ст}} = t_{\text{факт}}^d$ или $t_{\text{факт}} = t_{\text{ст}}^{1/d}$. Коэффициент подобия (инвариант гиперболических распределений): $d = \log_{t_{\text{факт}}} t_{\text{ст}}$.

В терминах теории категорий (элементарный топос) вводится декартова замкнутость: $\text{hom}(t_{\text{факт}} \times C, t_{\text{ст}}) \cong \text{hom}(t_{\text{факт}}, t_{\text{ст}}^C)$, где $t_{\text{факт}} \in \{t_{\text{ф1}}, t_{\text{ф2}}, \dots, t_{\text{фn}}\}$ - вектор фактических результатов, полученных на базовом объекте, C - категория морфизмов, отражающих структурные различия между объектами, а $t_{\text{ст}}^C$ - экспоненциальный объект, соответствующий масштабированному прогнозу для целевой инфраструктуры.

Приведённое категорное тождество формализует следующую процедуру: вместо того чтобы заново обучать нейросетевую модель на данных целевой станции (что соответствует левой части тождества - $\text{hom}(t_{\text{факт}} \times C, t_{\text{ст}})$), достаточно применить к выходным прогнозам базовой модели степенное преобразование с показателем d (правая часть - $\text{hom}(t_{\text{факт}}, t_{\text{ст}}^d)$). Коэффициент d при этом играет роль функтора, отображающего вероятностное пространство исходной станции в вероятностное пространство целевой. Степенная связь $t_{\text{ст}} = t_{\text{факт}}^d$ позволяет пересчитывать результаты РНС при переносе модели с одного объекта на другой без повторного обучения. Вычислительный эксперимент по переносу модели между двумя грузовыми станциями Ростовского региона показал, что погрешность прогноза времени простоя вагона после масштабирования не превысила 7 % относительно модели, обученной на целевой станции «с нуля».

Разработаны авторские программные комплексы: «Axiomatic v.1» - программа расчета параметров транспортных процессов, «ЛГРЦ v.1 - программа автоматизированной оптимизации распределения грузопотоков в транспортном узле, и «АМПВ v. 1» - модуль прогнозирования транспортных конфликтов на базе двухуровневой РНС.

Для верификации разработанной методики выполнены вычислительные эксперименты на объектах транспортной инфраструктуры: припортовых железнодорожных станциях «Г», «ТГ», «А» и транспортно-складском комплексе «РЗ». Общее количество экспериментов составило 21 400. Отсутствие конфликтов III рода на всех рассмотренных объектах объясняется тем, что технологические процессы регламентированы ТРА и технологическими картами, которые исключают одновременное возникновение конфликтов I и II рода за счёт временного разделения операций. Критические зоны пересечения маршрутов (стрелочные горловины) и зоны «конкуренции за ресурсы» (сортировочные устройства, грузовые парки) пространственно разнесены.

Наибольшее количество конфликтов I рода характерно для маршрутов с многократным использованием сортировочных устройств (SU) и грузовых парков (PG). Конфликты II рода выявлены только на маршрутах, содержащих повторяющиеся технологические зоны. Для ТСК «РЗ» конфликты II и III рода отсутствуют в силу единой точки входа/выхода и отсутствия повторяющихся зон.

Для подтверждения масштабируемости предложенного подхода выполнена оценка его применимости на 20 объектах транспортной инфраструктуры: 15 припортовых железнодорожных станциях Азово-Черноморского бассейна, 2 узловых сортировочных станциях и 3 транспортно-складских комплексах. Для четырёх объектов выполнен полный цикл вычислительных экспериментов с использованием программного комплекса «АМПВ v.1.0» (станции «Г», «ТГ», «А», ТСК «РЗ»); для остальных 16 объектов использованы аналитические оценки, полученные на основе обработки ретроспективных данных за 2017–2024 гг. в рамках НИР по гранту РФФИ № 24-29-00869.

Сводные результаты по типам объектов представлены в табл. 4, которые отражают: универсальность разработанной методики аксиоматного моделирования, среднее количество формализованных аксиомат для ЖДС составляет 18,6,

для ТСК - 7,0; стабильность интегральной оценки в диапазоне 88,61-96,34 % со средним значением 92,70 % и стандартным отклонением 2,0 %; определимость транспортных конфликтов I рода – зафиксированы на всех ЖДС (от 64 до 91 шт.), что обусловлено конкуренцией за ресурсы (пути, сортировочные устройства). ТК II рода выявлены только на станциях со сложной путевой структурой (от 36 до 56 шт.). ТК III рода не зафиксированы, что подтверждает корректность организации технологических процессов; эффективность аксиоматики ТТП ТСК - наилучшие интегральные показатели (92,18-95,12 %) вследствие простоты технологических схем и отсутствию конфликтов II и III рода. Объекты с полным расчётом (№ 1-4) демонстрируют значения интегрального показателя, сопоставимые с объектами аналитической оценки (диапазон 91,83-95,12 % против 88,61-96,34 %), что подтверждает корректность использованных методов и возможность применения аналитических оценок для расширения номенклатуры объектов без потери точности.

Таблица 4 – Результаты РНС-анализа для объектов транспортной инфраструктуры

Тип объекта	Кол-во объектов	Кол-во АМТП	Среднее время АМТП, мин	ТК 1Р (диапазон)	ТК 2Р (диапазон)	Интегральный показатель эффективности, %
Припортовые ЖДС	15	12–45	85,2–100,5	64–91	36–56	88,61–96,34
Узловые сортировочные станции	2	20–22	87,9–89,7	64–68	38–40	90,72–91,05
Транспортно-складские комплексы	3	4–10	35,6–45,8	18–28	0	92,18–95,12

В ходе вычислительного эксперимента на синтезированных данных, имитирующих работу железнодорожной станции в условиях нестационарного вагонопотока (обучающая выборка – 50 000 итераций, тестовая – 5 000), подтверждена эффективность предложенной двухуровневой РНС-архитектуры.

Сравнение базового варианта управления и результатов работы двухуровневой РНС-архитектуры представлено в таблице 5. Анализ таблицы 5 демонстрирует устойчивое снижение рисков возникновения транспортных конфликтов всех трёх родов при применении разработанной двухуровневой РНС-архитектуры. Наиболее существенное относительное снижение (19,0 %) достигнуто для ТК I рода, что объясняется высокой чувствительностью стратегического контура LSTM-1 к занятости критических одноуровневых пересечений. Снижение вероятностей конфликтов II и III рода составило 16,2 % и 12,9 % соответственно. Усреднённые результаты по 20 объектам транспортной инфраструктуры подтверждают стабильность полученных эффектов: интегральный показатель эффективности повысился с 84,2 % до 92,7 %, что соответствует приросту 8,5 %.

Таблица 5 – Сравнение базового варианта и управленческих решений РНС-архитектуры

Метрика	Базовый вариант	Двухуровневая РНС	Δ	%
Вероятность ТК первого рода	0,040	0,032	-0,008	-19,0 %
Вероятность ТК второго рода	0,065	0,054	-0,011	-16,2 %
Вероятность ТК третьего рода	0,030	0,026	-0,004	-12,9 %
Время простоя местного вагона (ч)	4,48	4,24	-0,24	-5,3 %
Точность прогноза ТК за 30 мин	0,71	0,91	+0,19	+26,4 %
Точность прогноза времени t_{SU} (MAE, мин)	4,9	3,6	-1,3	-27,1 %

Прирост интегрального показателя эффективности по типам объектов составил: для припортовых ЖДС показатель вырос с 83,8 % до 92,4 % (+8,6 %), для узловых ЖДС - с 84,2 % до 90,9 % (+6,7 %), для ТСК - с 87,5 % до 94,6 % (+7,1 %). В среднем по всем 20 объектам интегральный показатель повысился с 84,2 % до 92,7 %, прирост составил +8,5 %. Замена статической вероятностной оценки транспортного конфликта динамическим прогнозом позволила снизить вероятность конфликтов I рода на 19,0 %, II рода — на 16,2 %, III рода — на 12,9 %, сократить время простоя местного вагона на 5,3 %, а также повысить точность прогноза конфликтов за 30 минут с 0,72 до 0,91. Стационарность остатков прогнозной модели подтверждена тестом Дики–Фуллера ($p < 0,05$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных научных исследований сделаны основные выводы:

1. Выполнен анализ отечественного и зарубежного научного опыта в области моделирования задач интеллектуализации управления железнодорожными транспортными системами (линейное и целочисленное программирование, имитационное моделирование, метаэвристики, машинное обучение). Установлено, что наиболее перспективным является машинное обучение, однако его эффективному применению препятствует недостаточная цифровая формализация транспортно-технологических процессов (ТТП).

2. Развита метод аксиоматного моделирования ТТП (АМТТП). Введено авторское определение «аксиоматная модель». Формализованы базовая (АМТТП-Б) и модернизированная (АМТТП-М) модели, отличающиеся использованием принципов рекуррентных нейронных сетей (РНС), теории нечётких множеств (ТНМ) и теории активных систем (ТАС). Определены уровни сложности АМТТП-М.

3. Впервые предложена системная классификация транспортных конфликтов (ТК): I рода (одна и та же аксиомата требуется в один момент времени), II рода (одноуровневое пересечение маршрутов), III рода (смешанный конфликт). Сформированы модельные схемы АМТТП объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры.

4. На основе комбинаторных методов и теории вероятностей построена вероятностная модель условий возникновения транспортных конфликтов и предконфликтных ситуаций ОТИ.

5. Разработаны программные комплексы «Axiomatic v.1» (свидетельство № 2022681955), «ЛГРЦ v.1.0» (свидетельство № 2024690984), «АМПВ v. 1.0» (свидетельство № 2026683768), реализующие АМТТП на примере ОТИ. Выделены логические группы аксиомат и реализован принцип их взаимодействия: АСТТП (ж.-д. станция), АТПВТ (водный транспорт), АТСП (складские процессы), АПРМ (погрузочно-разгрузочные машины).

6. Предложены методы повышения стационарности баз данных параметров управления транспортными процессами (дифференцирование, логарифмическое преобразование, сезонное дифференцирование, скользящие средние). С помощью теста Дики–Фуллера подтверждена нестационарность исходных данных; применение методов позволяет повысить точность прогнозирования в ИТС.

7. Разработан алгоритм развёртки РНС формирования АМТТП ОТИ (шаги W1–W9), включающий анализ графологических связей, оценку степени нечёткости использования аксиомат и обучение РНС посредством отбора рациональных структур.

8. Развитие методики аксиоматного моделирования подтверждает её потенциал как отдельной теории цифровизации ТТП. Предложенный подход позволяет не только вычислять параметры и выбирать рациональные варианты, но и строить новые логические последовательности транспортных событий, повышая эффективность управления. Экспериментально подтверждено, что применение двухуровневой РНС-архитектуры позволяет снизить частоту транспортных конфликтов всех трёх родов на 12,9–19,0 %, а также сократить простой местного вагона на 5,3 %. Апробация разработанной методики на четырех объектах с полным циклом вычислительных экспериментов и аналитическая оценка для 16 объектов (всего 20 объектов) показали устойчивый прирост интегральной эффективности: для припортовых станций на 8,6 %, для узловых станций на 6,7 %, для транспортно-складских комплексов на 7,1 %. В среднем по всем 20 объектам интегральный показатель эффективности повысился с 84,2 % до 92,7 %.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме:

1. Разработанный метод аксиоматного моделирования может быть внедрен в практику диспетчерского управления на ж.-д. станциях в качестве модуля ситуационного прогнозирования. Для этого требуется адаптация библиотеки аксиомат под конкретные технологические процессы с последующей калибровкой временных параметров на основе ретроспективных данных за 3–5 лет.

2. Предложенная двухуровневая РНС-архитектура (LSTM-1 + LSTM-2) может быть масштабирована на управление транспортными процессами в масштабе целого железнодорожного полигона. Для этого необходимо дополнительное исследование возможности интеграции модельных схем станций в единую графологическую модель узла (полигона) с учётом межстанционных логических связей.

3. Разработанные методы повышения стационарности баз данных рекомендуется использовать при подготовке массивов данных для нейросетевого прогнозирования на других видах транспорта (автомобильном, водном) с адаптацией параметров преобразований под специфику соответствующих временных рядов.

4. Программные комплексы «Axiomatic v.1», «ЛГРЦ v. 1», «АМПВ v. 1» целесообразно развивать в направлении создания полноценного цифрового двойника ОТИ с функцией автоматической генерации сценариев транспортного производства. Для этого необходима дальнейшая работа по формализации аксиомат (включая аварийные и нештатные ситуации) и расширение функционала нейросетевого блока.

Основное содержание диссертационного исследования отражено в публикациях

Публикации в изданиях ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Луганченко, Н.М.** Критериальная оценка баз данных параметров управления технологическими процессами в транспортных системах / Н.М. Луганченко, О.Н. Числов // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 2 (110). – С. 72–77.

2. Числов, О.Н. Развитие методики цифрового аксиоматного моделирования объекта транспортной инфраструктуры / О.Н. Числов, **Н.М. Луганченко**, В.В. Хан, Н.М. Магомедова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. -2024.-№ 1(68).-С.22–32.

3. Числов, О.Н. Генетический компоновочный алгоритм размещения объектов транспортного узла: постановка задачи, формирование и использование массивов данных, методика решения / О.Н. Числов, Е.Е. Мизгирева, **Н.М. Луганченко** // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2025. – Т. 22. – № 1. – С. 32–46.

Монографии:

4. Размещение инфраструктурно-технологических объектов транспортных узлов в условиях сложноформализуемых факторов : коллективная монография / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, Е. Е.

Мизгирева, Н. М. Луганченко ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2026. – 243 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681955 Российской Федерация. Axiomatic v. 1 – программа расчета параметров транспортных процессов : № 2022681124 : заявл. 07.11.2022 : опубл. 17.11.2022 / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко, Д. С. Безусов [и др.]. – EDN PBZIMB.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690984 Российской Федерация. ЛГРЦ v. 1 - программа автоматизированной оптимизации распределения грузопотоков в транспортном узле : № 2024683276 : заявл. 07.10.2024 : опубл. 18.12.2024 / В. В. Трапенов, О. Н. Числов, С. В. Поляков [и др.]. – EDN UGBTFR.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026683768 Российская Федерация. «АМПИВ v. 1.0 - Аксиоматное моделирование параметров вагонопотоков» : заявл. 20.07.2026 : опубл. 04.08.2026 / Н. М. Луганченко, О. Н. Числов, В. М. Задорожний [и др.]. – EDN KKXRUU.

Публикации в журналах и научных сборниках:

8. **Луганченко, Н.М.** Общие принципы аксиоматики узловых транспортных процессов / Н.М. Луганченко, Е.Е. Мизгирева, А.О. Полунина, Е.В. Дараселия // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (60). – С. 53–58.

9. Мизгирева, Е. Е. варианты оценки возможности цифровой трансформации технологических процессов транспортных узлов / Е. Е. Мизгирева, **Н. М. Луганченко**, С. А. Колошин // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы : Материалы международной научно-практической конференции, Москва, 28 сентября 2022 года / Институт управления и цифровых технологий. Кафедра «Цифровые технологии управления транспортными процессами». – Москва: Российский университет транспорта, 2022. – С. 28-34. – EDN ANRRTQ.

10. Трапенов, В. В. Особенности разработки имитационной модели работы транспортно-складского комплекса / В. В. Трапенов, **Н. М. Луганченко** // Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и оперативного управления : VI международная научно-практическая конференция, Ростов-на-Дону, 04–05 февраля 2022 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 233-236. – EDN FZVUUA.

11. Полунина, А. О. Повышение эффективности работы транспортных предприятий на основе процессного производства / А. О. Полунина, **Н. М. Луганченко**, Е. Е. Мизгирева // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3(64). – С. 93-99. – EDN NNDLNG.

12. **Luganchenko, N. M.** Concept of transport-and-technological interaction of railway station and port / N. M. Luganchenko // Актуальные проблемы транспортной отрасли в России и за рубежом : Материалы IV Всероссийской студенческой научно-практической конференции на иностранных языках, Новосибирск, 03 ноября 2022 года. – Новосибирск: СГУПС, 2023. – Р. 37-42. – EDN UZCOFQ.

13. Числов, О. Н. Пример моделирования взаимодействия видов транспорта в Новороссийском узле / О. Н. Числов, **Н. М. Луганченко** // Тихомировские чтения: наука и современная практика технологии перевозочного процесса : Материалы Международной научно-практической конференции, Гомель, 20–21 октября 2022 года. – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2023. – С. 318-321. – EDN BCZHCB.

14. Числов, О. Н. Графологический подход к выбору вариантов цифровых управленческих решений в транспортном производстве железнодорожных станций / О. Н. Числов, **Н. М. Луганченко** // Транспортная наука и инновации : Материалы международной научно-практической конференции, Самара, 01–02 июня 2023 года. – Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 314-318. – EDN NVAMJA.

15. Числов, О. Н. О вопросах интеллектуализации в математическом моделировании железнодорожных транспортно-технологических систем и процессов / О. Н. Числов, Д. С. Безусов, **Н. М. Луганченко** // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 27 сентября 2023 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 248-255. – EDN ICRDGR.

16. Числов, О. Н. Моделирование транспортных конфликтов в интеллектуальных системах управления технологическими процессами припортовых железнодорожных станций / О. Н. Числов, **Н. М. Луганченко** // XVI Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультikonференции. В 4 т., Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Том 4. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 108-111. – EDN KERMHY.

17. Числов, О. Н. Принципы интеллектуализации в прикладных задачах моделирования железнодорожных транспортно- технологических процессов / О. Н. Числов, **Н. М. Луганченко**, Е. Е. Мизгирева // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте : Сборник статей международной научно-практической конференции, Липецк, 18–19 апреля 2024 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2024. – С. 399-404. – EDN QRLTER.

18. **Луганченко, Н. М.** Принципы интеллектуализации в методах моделирования железнодорожных транспортно-логистических процессов / Н. М. Луганченко, О. Н. Числов // Интеллектуальные транспортные системы : Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 239-246. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-239-246. – EDN DEHSAD.

19. **Луганченко, Н. М.** О вопросе формирования и использования массивов данных в задачах интеллектуализации управления железнодорожными транспортными процессами / Н. М. Луганченко, М. В. Колесников // Транспорт и логистика: развитие в условиях цифровизации экономики : Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 06–07 февраля 2025 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2025. – С. 151-155. – EDN OGXWVZ.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Работы [8, 12] подготовлены единолично. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работах [1, 2, 3, 4] выполнены формализация аксиоматных моделей, разработка методов повышения стационарности баз данных и анализ результатов моделирования; в работах [6, 7, 8, 9, 10, 11, 14] проведён анализ узловых транспортных процессов, разработаны принципы аксиоматики и графологического подхода; в работах [15, 16, 17, 18, 19] выполнены анализ математических методов моделирования, систематизация подходов к интеллектуализации управления, разработка концепции единого информационного пространства и анализ применения методов искусственного интеллекта для оптимизации транспортных процессов; в свидетельствах [5, 6, 7] участие в разработке архитектуры программных комплексов и алгоритмов расчёта параметров транспортных процессов.

Луганченко Никита Максимович
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ
ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ПРИНЦИПАХ ЦИФРОВОГО СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 28.09.2026. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета: 344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2, www.rgups.ru