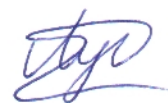


РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Числов Олег Николаевич

Ростов-на-Дону

2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список условных обозначений и сокращений	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 УПРАВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПРИНЦИПАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ.....	13
1.1 Исторический обзор развития железнодорожных цифровых и интеллектуальных управляющих транспортных систем.....	13
1.2 Формирование организационно-технических структур цифровизации управления транспортным производством.....	23
1.3 Транспортно-технологические процессы и параметры в системах цифрового организационно-технического управления.....	28
1.4 Современные парадигмы цифровизации управления железнодорожным организационно-технологическим взаимодействием в мультимодальных транспортных системах: отечественный и зарубежный опыт.....	33
1.5 Выводы по главе.....	42
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ В МЕТОДАХ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.....	45
2.1 Исследование научных разработок в области решения прикладных задач цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами.....	45
2.2 Параметризация технологических связей в мультимодальной транспортной организационно-технической системе.....	60
2.3 Декомпозиция и синтез параметров цифровизации структур управления транспортно-технологическими процессами.....	69

2.4 Нормативное обеспечение разработки и выбора систем управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на принципах цифровизации и интеллектуализации.....	73
2.5 Развитие критериев оценки степени эффективности цифровизации систем управления железнодорожным транспортным производством.....	78
2.6 Выводы по главе.....	84
3 РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПРИНЦИПАХ ЦИФРОВОГО АКСИОМАТНОГО СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	87
3.1 Методологические основы цифрового аксиоматного моделирования транспортной работы.....	87
3.2 Формирование структуры уровней цифрового аксиоматного моделирования мультимодальных транспортно-технологических процессов.....	95
3.3 Развитие метода решения транспортных конфликтов в системе цифрового аксиоматного моделирования.....	102
3.4 Логические группы жесткой (АСТТП-Б) и мягкой (АСТТП-М) цифровой аксиоматной модели транспортной работы.....	108
3.5 Графологическое формирование математического инструментария АСТТП в условиях нечеткого системотехнического моделирования управления транспортным производством.....	113
3.6 Критерии оценки эффективности цифровизации систем управления транспортным производством.....	121
3.7. Выводы по главе.....	128
4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ КОНФЛИКТОВ НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ РНС-АРХИТЕКТУРЫ С МАСШТАБИРОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	132
4.1 Постановка задачи прогнозирования транспортных конфликтов и логики выбора аксиомат.....	133

4.2 Архитектура двухуровневой РНС для прогнозирования транспортных конфликтов и сценарии транспортной работы.....	136
4.3 Масштабирование результатов РНС на основе теории категорий.....	139
4.4 Вычислительный эксперимент, оценка эффективности и программная реализация комплекса «Axiomatic v.1» и «АМПВ v. 1.0».....	141
4.5 Выводы по главе.....	146
Заключение.....	149
Список литературы	152
Приложение А.....	179
Приложение Б. Системотехнический анализ технологии работы объектов транспортной инфраструктуры.....	186
Приложение В. Акты внедрения.....	232

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

Аксиомата – устойчивая последовательность транспортного процесса, в которой заложена логическая последовательность исполняемых событий;

АС ППСС – автоматизированная система расчета пропускной и перерабатывающей способности станций;

АСТТП – аксиоматика станционных транспортно-технологических процессов;

АЧБ – Азово-Черноморский бассейн;

ГС – грузовая станция;

ГЧП – государственно-частное партнерство;

Ж.-д. – железнодорожный;

ЖРС – железорудное сырье;

ЛГ – логическая группа;

ЛПР – лицо, принимающее решения;

МР – маневровая работа;

МСС – модельная схема станции;

ПВФ – погрузочно-выгрузочный фронт;

ПрС – припортовая станция;

РП – районный парк;

СКЭР – Северо-Кавказский экономический регион;

СУГ – сжиженные углеводородные газы;

ТНМ – теория нечетких множеств;

ТРА – техническо-распорядительный акт;

ТТС – транспортно-технологическая система;

УС – узловая станция;

УСС – узловая сортировочная станция;

ЦА – ценологический анализ;

ЮФО – Южный федеральный округ;

ЭТП ГП – электронная торговая площадка грузовых перевозок.

ВВЕДЕНИЕ

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, 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 неэффективности управленческих решений.

В связи с этим возникает объективная необходимость в разработке новых методов управления транспортным производством, основанных на формализации ТТП с применением аксиоматического подхода, позволяющего не только анализировать, но и прогнозировать конфликтные ситуации на принципах цифрового аксиоматного 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 выбранной 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. 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. и др.

Однако, как показал анализ, вопросы системной классификации транспортных конфликтов, формализации ТТП с использованием аксиоматического подхода (включая базовую и модернизированную модели) и последующей интеллектуализации управления с применением рекуррентных нейронных сетей остаются недостаточно изученными. Отсутствуют или слабо развиты комплексные подходы к интеграции динамических моделей прогнозирования в системы поддержки принятия решений управленческого (диспетчерского) персонала.

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 технологическими процессами (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 реальных транспортных объектов.

Объектом исследования являются 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 собственных 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 узловой 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 технологическими процессами (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 оптимального управления транспортным производством.

Практическая значимость научных результатов состоит в возможности использования 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 транспортных узлов и выбора рациональных форм организации транспортной работы.

Разработаны программные комплексы «Axiomatic v.1» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681955), «АМПВ 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 РФ № 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).

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 для студентов 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 объёмом 20,23 п.л. (авторский вклад – 7,08 п.л.), одну коллективную монографию общим объёмом 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.

1 УПРАВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПРИНЦИПАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

1.1 Исторический обзор развития железнодорожных цифровых и интеллектуальных управляющих транспортных систем

Транспортный комплекс по праву считается важнейшей составной частью экономики любого государства, обеспечивая жизненно важные связи между отраслями промышленности и регионами. Его устойчивое и эффективное функционирование является ключевым фактором экономического роста, социального благополучия и национальной безопасности.

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат) [214], общий грузооборот транспорта в 2024 г. составил 5579,0 млрд т-км (таблица 1.1), а пассажирооборот — 599,5 млрд пасс-км (таблица 1.2). При этом железнодорожный транспорт традиционно играет ведущую роль в грузовых перевозках на дальние расстояния, обеспечивая порядка 45,3 % от общего грузооборота видов транспорта страны (рисунок 1.1). Так, объем перевозок грузов железнодорожным транспортом в том же периоде достиг 2 525,2 млрд т-км, а пассажирооборот составил 145,6 млрд пасс-км. Приведённые данные указывают на высокую загрузку транспортной инфраструктуры и подтверждают особое значение железных дорог для экономики страны.

Таблица 1.1 – Грузооборот по видам транспорта по РФ (млрд т-км)

Виды транспорта	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Транспорт - всего	5 488,0	5 635,5	5 678,2	5 401,1	5 712,8	5 582,1	5 550,9	5 579,0
железнодорожный	2 493,4	2 597,8	2 602,5	2 545,3	2 639,4	2 637,8	2 638,3	2 525,2
автомобильный	254,5	259,1	275,4	271,8	296,7	313,9	362,2	387,4
трубопроводный	2 614,9	2 667,8	2 686,2	2 470,1	2 653,0	2 514,8	2 423,0	2 531,6
морской	50,1	36,9	40,8	42,5	43,9	44,7	69,2	75,4
			65,9					
внутренний водный	67,2	66,1		64,3	70,6	68,0	56,6	57,5
воздушный	7,9	7,8	7,4	7,1	9,2	2,8	1,7	1,9

Таблица 1.2 – Пассажирооборот в РФ по видам транспорта (млрд пасс-км)

Виды транспорта	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Транспорт - всего	560,2	593,6	635,2	357,1	492,8	508,3	564,0	599,5
железнодорожный	123,1	129,5	133,6	78,6	104,2	124,0	138,0	145,6
автобусный	123,4	122,5	122,5	88,4	101,1	109,1	112,6	117,1
трамвайный	4,3	3,9	3,8	2,8	3,1	3,1	3,1	3,2
троллейбусный	5,2	4,7	4,2	2,9	3,1	3,1	3,3	3,5
метрополитен	44,1	45,4	47,4	30,7	37,5	40,4	41,6	43
морской	0,08	0,06	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03
внутренний водный	0,6	0,6	0,6	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7
воздушный	259,4	286,9	323,0	153,5	243,3	228,0	264,7	286,2

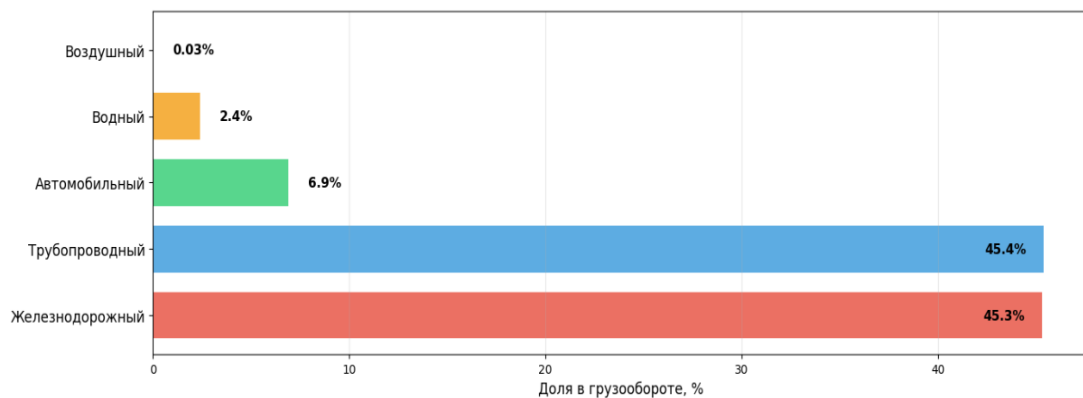


Рисунок 1.1 – Распределение грузооборота по видам транспорта за 2024 г.

Историческое развитие видов транспорта представляет собой последовательную цепь технологических революционных событий, каждое из которых отвечало на вызовы своего времени. От изобретения колеса и паруса человечество перешло к эпохе пара, ознаменовавшейся появлением железных дорог, которые кардинально изменили территориальное развитие государств. Дальнейшая электрификация и внедрение двигателей внутреннего сгорания позволили резко увеличить скорости и объемы перевозок. В XX веке началась эра автоматизации с внедрением первых автоматизированных систем управления (АСУ). Однако рост плотности движения, повышение требований к безопасности и эффективности на рубеже XX-XXI веков выявили ограниченность традиционных подходов к управлению транспортным производством.

Современные вызовы, такие как истощение пропускной способности ключевых магистралей, необходимость минимизации человеческого фактора как возможного источника рисков, а также потребность в снижении логистических издержек,

требуют принципиально новых решений. Ответом на эти вызовы стала интеллектуализация и цифровизация на транспорте, под которыми понимается интеграция передовых информационных технологий, средств связи, интернета вещей (IoT), искусственного интеллекта (AI) и т.п. в процессы управления транспортным производством. Эволюция инструментария управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами представлена на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Эволюция инструментария управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами

Важность и неотложность данного направления нашли прямое отражение в ряде ключевых государственных и отраслевых документов. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. определяет в качестве одного из стратегических направлений «повышение конкурентоспособности транспортной системы на основе ее цифровой трансформации» [215]. Более детально задачи для железнодорожной отрасли раскрыты в «Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года», где акцент делается на создание цифровых интеллектуальных систем управления и внедрение цифровых технологий. Конкретный план цифровой трансформации представлен в государственной программе «Цифровая трансформация транспортного комплекса». Практической дорожной картой для отрасли служит концепция «Цифровая железная дорога» (Белая книга ОАО «РЖД»), которая формулирует конкретные проекты, такие как

внедрение цифровизированных систем управления перевозками, цифровых станций и беспилотного движения поездов [216].

Известно, что вместе с развитием транспортной системы страны происходит её усложнение и увеличение объемов обрабатываемой информации, это требует внедрения современных технологий анализа и эксплуатации транспортной инфраструктуры, а именно – интеллектуальных транспортных систем (ИТС), которые получили широкое распространение в ведущих странах мира [2]. Развитие ИТС становится одним из важнейших инструментов повышения конкурентоспособности транспортного комплекса и экономики в целом.

ИТС активно развиваются в России: разработана Концепция развития интеллектуальных транспортных систем в РФ, формируется нормативная база создания и функционирования ИТС, прежде всего стандарты по ИТС [3]. Основы развития нашей страны в области ИТС также заданы целями Транспортной стратегии РФ в период до 2030 г., где разработка ИТС является одним из направлений «формирования единого транспортного пространства России на базе сбалансированного развития эффективной транспортной инфраструктуры» [4].

ИТС – это цифровая интеллектуальная система, использующая инновационные разработки в моделировании транспортных систем и регулировании транспортных потоков, качественно повышающая уровень взаимодействия участников движения по сравнению с обычными транспортными системами [5]. Также ИТС представляют собой совокупность информационных, коммуникационных систем или средств и систем автоматизации в совокупности с транспортной инфраструктурой, транспортными средствами и пользователями, обеспечивающая эффективность перевозочного процесса, его безопасности и качества. Другими словами, ИТС – интеграция информационно-коммуникационных и цифровых технологий применительно к ключевым составляющим транспортных процессов: пассажир/груз – транспортные средства – транспортная инфраструктура.

Концепция ИТС сформировалась в середине XX века. Предпосылкой к появлению ИТС стал ряд издержек массовой автомобилизации, с которыми в США

столкнулись еще в 1920-е годы, а в Европе и Японии – в 1960-е годы. К таким издержкам относились заторы на дорогах, и, как следствие, повышенный расход топлива и загрязнение воздуха, а также снижение средней скорости движения транспорта. Основными целями внедрения ИТС в транспортные системы можно назвать повышение мобильности населения и гибкости грузоперевозок за счет реструктуризации сформировавшихся транспортных потоков, повышения безопасности и эффективности функционирования транспортной системы.

До появления первых полноценных ИТС уже существовали различные автоматизированные системы управления (АСУ), аналоговые вариации которых появились в начале 1950-х годов. Однако прогнозировать движение транспортных потоков АСУ, в отличие от ИТС, не умели [7].

Первыми к разработке таких систем приступили в 1973 г. в Японии по реализации комплексной системы управления автомобильным транспортом. Затем, в начале 1980-х годов системами ИТС начали заниматься США. В 1990-х годах проекты по ИТС стартовали в Европе.

В результате, в мире образовалось три крупнейших центра развития ИТС: Азиатско-Тихоокеанский (Япония, Южная Корея, Китай, Малайзия, Австралия, Новая Зеландия), Американский (США и Канада) и Европейский.

В России активное внедрение ИТС в различных сферах транспортной работы произошло позже. Первые такие системы начали создавать в 2000-е годы. Тем не менее, автоматические системы управления на транспорте (АСУ), которые являются базисом для ИТС, во времена СССР также активно развивались и внедрялись. Первые такие проекты были реализованы еще в 1960-е годы, а в 1980-е годы, например, автоматизированная система управления дорожным движением (АСУ ДД) функционировала во всех городах СССР с населением более 1 млн. чел.

Развитие информационных технологий на отечественном железнодорожном транспорте началось в 70-х годах прошлого века [11-13]. Потребность в применении вычислительной техники была связана с необходимостью производить инженерные и эксплуатационные расчеты на активно развивающихся объектах железнодорожной транспортной инфраструктуры.

Для оптимизации оперативного, среднесрочного и долгосрочного планирования перевозок в 1971 г. было принято решение о создании автоматизированной системы управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ). Она предусматривала выделения 19 основных подсистем отрасли по хозяйствам: перевозок, грузовой и коммерческой работы, энергоснабжения и др.

В конце 1970-х – начале 1980-х годов был выделен новый тип информационных систем – комплексные системы. Вводится понятие «модель», как полное отображение технологических функций объекта. Была создана поездная модель, отражающая формирование, движение, и расформирование поездов, а также модель сортировочной станции, которая являлась основой автоматизированной системы управления работой сортировочной станцией (АСУ СС). На железных дорогах создаются АСУ СС, АСОУП, внедряются единые комплексы ИОДВ, ИОММ [14]. Параллельно с развитием вычислительной техники, в 1980-х были разработаны и введены в эксплуатацию на сетевом уровне системы автоматизированного диспетчерского центра управления (АДЦУ), а также информационные системы: ДИСКОР, КССП, АПН, ИСС ВТГ и др.

С появлением полноценных ЭВМ к концу 1980-х годов, началось создание автоматизированных рабочих мест работников (АРМ). АРМ позволили повысить общий уровень эффективности работы транспортных предприятий, послужив элементами для построения информационных сетей.

В 1990-х годах в транспортной отрасли произошла плановая модернизация программно-технических средств вычислительной техники, были определены и заложены принципы новых технологий, применяемых в эксплуатационных процессах транспортных объектов. В феврале 1996 г. были утверждены Концепция и Программа информатизации железнодорожного транспорта на период 1996-2005 годов, заложившие базовые принципы развития и модернизации. Реализуются новые стратегии хранения данных, осваиваются операционные системы (OS/390, СУБД ADABAS, ORACLE, DB2 и др.), новые инструментальные средства (SAS Institute и др.). За счет активного развития технического прогресса в области вычислительных технологий и электронных вычислительных машин появилась возможность

разрабатывать и внедрять автоматизированные системы управляющие эксплуатационными процессами транспортных предприятий в реальном времени [16].

Начиная с 2000-х годов, вводятся в эксплуатацию такие крупные автоматизированные системы, как ДИСПАРК, ДИСКОН, ЕК АСУФР и др. Общее количество информационных систем, задействованных в эксплуатации на железнодорожном транспорте в то время составляло более 200 единиц.

В настоящее время ОАО «РЖД» использует более 600 автоматизированных систем и приложений, и их число неуклонно растет [16]. С помощью различных информационных систем осуществляется общее управление перевозочным процессом, подвижным составом, корпоративной структурой, ресурсами и финансами, а также информационной безопасностью [17-18].

Одной из базовых систем в области управления перевозочным процессом на данный момент является автоматизированная система оперативного управления перевозками (АСОУП), которая постепенно комплексно развивается и модернизируется (рисунок 1.3). В состав данной системы входит уже более 6000 программ.

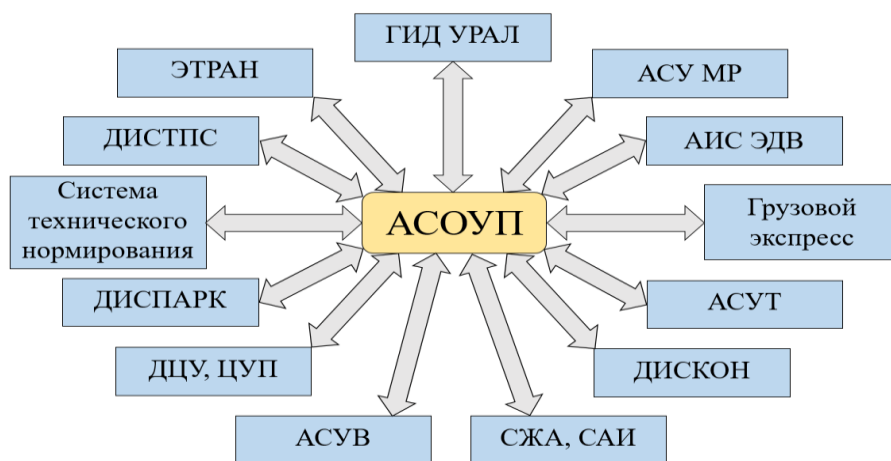


Рисунок 1.3. – Цифровые системы управления железнодорожным транспортом

Для достижения целей развития и оптимизации, а также структуризации информационных систем, они были разделены на 4 комплекса [20] (рисунок 1.4). Впервые подобная сепарация была формализована Концепцией и Программой информатизацией железнодорожного транспорта на 1996-2005 годы. В соответствии

с этими направлениями информационные системы, постепенно и комплексно развиваясь, классифицируются и в настоящее время.

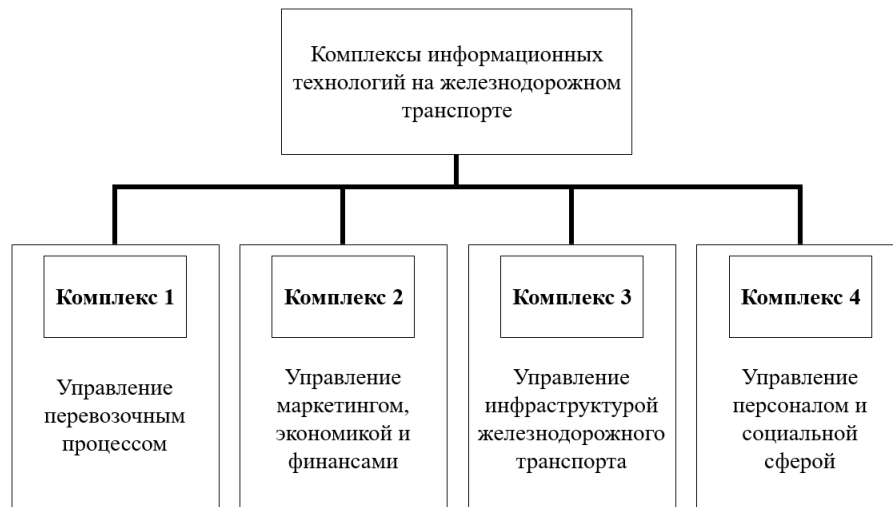


Рисунок 1.4. – Комплексы информационных технологий на ОАО «РЖД»

Первый комплекс – «Управление перевозочным процессом», включает в себя такие системы сетевого и дорожного уровня, как АСОУП, ДИСПАРК, ДИСКОН, ДИСТПС, ГИД УРАЛ, СИРИУС, ЭТРАН, ЭКСПРЕСС и т.д.), линейного уровня АСУ ЛР, АСУ ГС, АСУ КП и т.д.), а также единые диспетчерские центры управления (ЕДЦУ). Главенствующее положение в иерархии информационных систем комплекса «Управления перевозочным процессом» занимает АСОУП, осуществляя постоянное информационное взаимодействие между информационными системами.

Второй комплекс – «Управление маркетингом, экономикой и финансами», разработан для реализации маркетинговой политики в отрасли, а также для управления финансами и ресурсами. Главенствующее место в данном комплексе занимает СФТО – система фирменного транспортного обслуживания, реализующая маркетинговую политику в отрасли, а также ЕК АСУФР – система управления финансовой деятельностью.

Третий комплекс информационных технологий и систем – «Управление инфраструктурой железнодорожного транспорта», обеспечивающий устойчивую и

безопасную работу железнодорожного транспорта, осуществляя контроль технического состояния и обеспечивая эффективное использование подвижного состава, путевых сооружений, а также объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта. К таким информационным системам можно отнести СИРИУС – сетевую интегрированную российскую информационно-управляющую систему, разработанную для оптимизации эксплуатационной работы железнодорожного транспорта в режиме реального времени, а также СБД-И – систему баз данных по управлению инфраструктурой железнодорожного транспорта.

Четвертый комплекс – «Управление персоналом и социальной сферой» – осуществляет реализацию идеи системного подхода к организации управления персоналом и социальной сферой, осуществляя работу по организации, оплате и мотивации труда сотрудников железнодорожной отрасли.

ИТС подразделяются на ряд общих принципов, отражающие необходимые принципы организации и функционирования интеллектуальных транспортных систем [21] (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5. – Общие принципы ИТС на транспорте

Принцип системности закрепляет необходимость согласования и построения структуры элементов интеллектуальной системы между собой, обеспечивая целостность и функциональную полноту ИТС.

Принцип адаптивности предполагает наличие у интеллектуальной системы

возможностей улучшения качества работы на основе обучения эмпирическим путем (большое количество итераций системы). Адаптивные способности определяются объемом информации (памятью) системы и затратами времени на её обработку.

Принцип иерархичности закрепляет необходимость правильного согласования элементов системы между собой согласно выполняемым задачам и уровня значимости в системе, так как ИТС является сложной многоуровневой структурой и является основой для одновременного протекания множества транспортных процессов.

Принцип эквивинальности предполагает наличие у системы взаимосвязанных реакций на определенные воздействия, приводящих к одному и тому же практическому результату.

Принцип многоканальности осуществляет объединение информационных данных системы и дает более объективную и полную картину о происходящих процессах, позволяя иметь разнородную характеристику свойств среды.

Принцип динамического программирования позволяет создавать сложные оптимальные сценарии выполнения транспортных процессов, непрерывно корректируя их на основании анализа ситуации с учетом текущей действительности, прошлых событий и прогнозирования будущего.

Принцип взаимозависимости функциональных и структурных свойств определяет назначение интеллектуальной транспортной системы и непосредственно влияет на структуру системы в соответствии с наилучшей реализацией возможных функций ИТС.

Методологическую и инструментальную базу создания ИТС образуют реинжиниринг, системный подход, транспортное моделирование (анализ и прогнозирование), ситуационное управление и выбор решения (рисунок 1.4), развитие и внедрение методов и моделей искусственного интеллекта, включающих принципы «знания/ситуации/сценарии»; «вывод/рациональный выбор/принятие решения»; мультиагентную организацию с распределенным метаинтеллектом; интеллектуальный анализ данных и ситуаций, прогнозирование, когнитивное и эволюционное

моделирование.

Таким образом, эволюция транспортных систем и процессов, подкрепленная стратегическими установками на государственном уровне, закономерно привела к новому этапу комплексной интеллектуализации и цифровизации транспортного производства, что и определяет содержание и актуальность диссертационного исследования.

1.2 Формирование организационно-технических структур цифровизации управления транспортным производством

Целостность организационно-технических структур управления транспортным производством означает, что среди отношений множества ее элементов имеются инварианты (отношения), которые не меняются в течение всего времени существования системы [18, 108, 109]. Рассматриваемые системы являются человеко-машинными и относятся к типу организационных с делением на классы простых, сложных и больших систем.

Железнодорожные промышленные транспортно-технологические системы можно отнести к особому классу больших систем с характерной особенностью в том, что при целенаправленном развитии возможны отклонения фактического состояния от желаемого из-за неполной детерминированности отклика системы на управляющие воздействия.

Производственные подсистемы в такой классификации могут быть либо сложными системами, либо большими системами открытого типа. В большинстве случаев в них присутствуют по две подсистемы: функциональная и производственная. Первая включает основные виды деятельности предприятия: перевозочную и грузовую работу, информационно-техническую и управление. Вторая – производственная, обеспечивает транспортный процесс и состоит из путевого хозяйства, подвижного состава, ремонтных служб, средств связи и т.д.

Взаимодействие систем видов транспорта осуществляется на станциях стыкования (промышленных сортировочных, сырьевых, распределительных) или на

передаточных парках (приемо-сдаточных путях) а также портах, терминалах. Промышленные и общесетевые станции в узле работают по единой технологии с вагонами и локомотивами обеих систем, используя маневровые, поездные передвижения, включая кольцевые замкнутые маршруты.

В современных условиях функционирование транспортного узла, как правило, не ограничивается только железнодорожным транспортом. В зависимости от географического положения, номенклатуры грузов и логистических связей, в состав узла могут входить автомобильный, водный (морской и внутренний водный) и трубопроводный транспорт.

Автомобильный транспорт выполняет функцию подвоза и вывоза грузов на короткие и средние расстояния, обеспечивая доставку «от двери до двери» и связь промышленных предприятий с магистральными железнодорожными линиями, портами и терминалами. В транспортных узлах автомобильный транспорт взаимодействует с железнодорожным на грузовых терминалах, контейнерных площадках и в местах общего пользования. Технологической основой этого взаимодействия выступают единые технологические процессы (ЕТП) работы железнодорожной станции и автотранспортного предприятия, регламентирующие порядок подачи и забора автомобилей, нормы времени на погрузочно-разгрузочные операции и информационный обмен.

Водный транспорт (морские и речные порты) играет ключевую роль в узлах, имеющих выход к водным путям. Как отмечается в специализированной литературе, для оптимизации транспортного процесса требуются детальные расчеты по взаимодействию различных видов транспорта с промышленными предприятиями в транспортных узлах. Наиболее совершенной формой такого взаимодействия исторически выступают единые технологические процессы работы порта и припортовой железнодорожной станции. Такие ЕТП содержат:

- технико-эксплуатационную характеристику причалов, складов и погрузочно-разгрузочных фронтов;
- технологию передачи вагонов и выполнения погрузочно-разгрузочных работ в пункте стыка «железная дорога — порт»;

- единую систему оперативного планирования и диспетчерского руководства, включая ведение планов-графиков работы транспортного узла .

Трубопроводный транспорт, хотя и не является универсальным, также интегрируется в структуру узла при перевалке массовых жидких грузов (нефть, нефтепродукты), обеспечивая прямую подачу сырья от мест добычи к промышленным производствам или к наливным терминалам в портах, минуя промежуточные перевалки.

С позиций нормативного обеспечения разработки интеллектуальных систем управления, присутствие в узле нескольких видов транспорта порождает задачу обеспечения их технологической и информационной совместимости. В современных условиях эта задача решается через создание единого информационного пространства и национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП), которая обеспечивает внедрение электронных перевозочных документов на всех видах транспорта и их информационную интеграцию. Это позволяет перейти от разрозненных ЕТП к единым стандартам технологической совместимости, обеспечивающим «бесшовные» технологии взаимодействия и минимизирующим стыковые издержки. При этом унификация нормативно-справочной информации и применение сквозных идентификаторов грузовых единиц создают предпосылки для автоматизации управленческих решений в режиме реального времени. Сокращение временных задержек на стыках видов транспорта положительно сказывается на совокупной пропускной способности узлов и оборачиваемости подвижного состава. В перспективе сформированная цифровая среда становится базой для внедрения прогнозных алгоритмов распределения потоков и ситуационного централизованного контроля.

Таким образом, разработка цифровых моделей управления транспортным производством в узле требует включения всего многообразия видов транспорта и нормативно-технологической базы их взаимодействия (ЕТП, узловые соглашения). Актуальные проблемы внедрения и развития цифровизации управления транспортным производством представлены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 Актуальные проблемы внедрения цифровизации управления транспортным производством

При разработке вариантов цифровизации управления транспортным производством следует учитывать, что по общей классификации [78, 81, 119] транспортно-технологические процессы можно разделить на медленно протекающие, средней скорости и быстро протекающие. К медленно протекающим процессам относятся стратегические прогнозы развития ТТС на 20–30 лет, которые имеют самую высокую степень неопределенности и зависимости от социально-экономических и геополитических факторов. Данную группу также составляют планы развития на 5–15 лет и краткосрочное прогнозирование на 2–5 лет. Медленно протекающие процессы охватывают эволюцию развития производительных сил, транспортных систем и социальной сферы регионов.

Процессы средней скорости включают прогнозы развития промышленно-транспортной системы, выпуска продукции предприятиями узла на год, квартал, месяц или декаду. Особенностью таких процессов является сравнительная определенность событий с возможностью статистического анализа.

Быстро протекающие процессы связаны с переходом подвижного состава по фазам обслуживания, циклом добычи, погрузки-выгрузки полезных ископаемых, технологическим процессом выпуска продукции и т.п. Следовательно, данные про-

цессы в большей степени детерминированы с возможностью управления результатом моделирования.

Для формирования модели связанного перехода подвижного состава по транспортным устройствам узла необходимо определить параметры технологических процессов (ПТП) – количество и вместимость путей различного назначения, количество и тип маневровых локомотивов, техническое оснащение грузовых фронтов, возможные технологии работы, а характеристики – время нахождения подвижного состава в транспортных подсистемах, в т.ч. в ожидании выполнения операций [119].

Так как узел обслуживает многопараметрические, многономенклатурные и неоднородные потоки, то на эффективность обслуживания влияет временная неравномерность (внутрисуточные, внутринедельные, сезонные колебания), пространственная неравномерность размещения производств, график движения поездов, план формирования и т.п. Узел связан с внешними транспортными системами, поэтому свою долю влияния вносят макроэкономическая составляющая, условия транспортной политики государства и состояние мировых рынков.

Одним из универсальных критериев оценки качества выполнения транспортной работы является временная характеристика использования элементов транспортных подсистем по времени и их длительность занятия. Если система работает динамично, имеет резервы пропускной и перерабатывающей способности, то непроизводительные простои подвижного состава и механизмов сведены к минимуму. Если же ТТС узла имеет нерациональные связи, враждебные пересечения транспортных маршрутов, недостаточную мощность станционных и производственных устройств, то продолжительность нахождения подвижного состава в узле значительно возрастает с увеличением очереди и уменьшением скорости обслуживания.

Для целей исследования может использоваться коэффициент задержки обслуживания [119], равный $k_3 = \prod_{i=1}^n \frac{t_{\text{общ}}^i}{t_{\text{тех}}^i}$, где $i = \overline{1, n}$ – количество транспортных подсистем, участвующих в передаче вагонопотока; $t_{\text{общ}}^i$ – общее время нахождения

подвижного состава в i -й транспортной подсистеме с учетом времени ожидания обслуживания; $t_{\text{тех}}^i$ – время непосредственной обработки подвижного состава в i -й транспортной подсистеме узла.

Таким образом, внедрение цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами сопряжено со сложной и многоэтапной инфраструктурной реструктуризацией, решение комплексных проблем которой требуют всестороннего исследования.

1.3 Транспортно-технологические процессы и параметры в системах цифрового организационно-технического управления

Рациональная организация транспортно-технологических процессов (ТТП) объектов транспортной инфраструктуры является важной составляющей этапом при выборе логических управляющих решений. Это позволяет достичь более точного и эффективного управления объектами транспортной инфраструктуры за счет улучшения прогнозирования и планирования.

Формализация параметров ТТП объекта транспортной инфраструктуры (ОТИ) включает в себя этапы, представленные на рисунке 1.7.

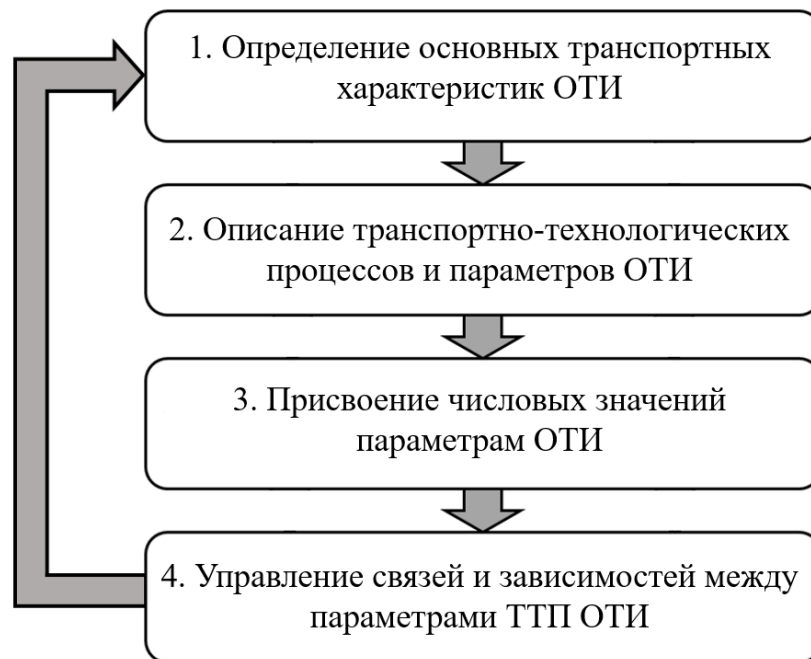


Рисунок 1.7 – Этапы формализации параметров ТТП ОТИ

Можно выделить основные транспортно-технологические показатели, приемлемые для оценки выбора логических решений в цифровых системах управления, их дальнейшей оптимизации и повышения эффективности работы транспортной системы в целом (рисунок 1.8). Данные параметры выбираются на основе степени воздействия на них, а также динамики изменения транспортно-технологического показателя с перспективой временного лага.



Рисунок 1.8 – Структурирование показателей поддержки принятия решений в цифровых системах управления транспортным производством

Рассмотрен анализ технико-технологических показателей ОТИ, приемлемых для выбора логических решений в системах управления транспортным производством используя принципы теории кластеров [34]. Данная кластеризация обосновывает приоритеты для внедрения алгоритмов адаптивного управления.

Цель анализа – выделение групп параметров, наиболее значимых для ИТС, что позволит оптимизировать процессы прогнозирования, планирования и принятия решений. Сформируем кластеры параметров ОТИ в ИТС в соответствии с методологией следующих критериев [35]: 1 – Функциональное значение – характеризует мощность, эксплуатацию, динамику; 2 – Управляемость – возможность корректировки параметров в реальном времени; 3 – Влияние на эффективность си-

стемы – критичность для принятия решений; 4 – Динамичность – частота изменения значений.

Сформированные кластеры показателей ОТИ в ИТС представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Кластеры показателей ТП ОТИ

№ п/п	Название кластера	Характеристика кластера	Включенные в кластер показатели	Анализ показателей кластера
1	Инфра-структурная мощность	Параметры, определяющие физические возможности транспортной системы.	Пропускная способность ОТИ; Провозная способность ОТИ; Численность транспортных средств ОТИ; Количество терминалов в системе ОТИ.	Показатели носят стабильный характер; Критичны для долгосрочного планирования, но слабо управляемы в реальном времени; Влияют на масштабируемость системы.
2	Эксплуатационные объемы	Показатели, отражающие фактическую загрузку системы	Объем перевозок грузов; Объем перевозок пассажиров; Грузооборот ОТИ; Пассажирооборот ОТИ; Грузонапряженность ОТИ.	Имеют среднюю динамичность (изменяются ежедневно/еженедельно); Позволяют оценить текущую производительность системы; Могут корректироваться за счет оптимизации маршрутов.
3	Эффективность использования ресурсов	Параметры, характеризующие качество эксплуатации инфраструктуры и подвижного состава.	Скорость движения подвижного состава; Оборот единицы подвижного состава.	Наиболее динамичные и управляемые параметры; Прямо влияют на КПД транспортной системы; Могут оптимизироваться в реальном времени (например, скорость движения).
4	Взаимосвязи и внешние факторы	Параметры, отражающие зависимость работы ОТИ от внешних условий	Взаимосвязь скорости и расхода топлива; Влияние погодных условий на скорость движения; Зависимость пропускной способности от загруженности путей сообщений. Зависимость занятости грузовых фронтов от интенсивности поступления грузов на терминалы.	Требуют комплексного моделирования; Учитываются в прогнозных моделях.

Следует отметить, что показатели ОТИ из кластера «Инфраструктурная мощность» наиболее эффективно использовать для стратегического прогнозирования и оценки предельных возможностей системы. Показатели ОТИ из кластера «Эксплуатационные объемы» эффективно применять для оперативного управления и краткосрочного прогнозирования. Показатели ОТИ из кластера «Эффективность использования ресурсов» являются ключевыми, и позволяют минимизировать простои, повышать энергоэффективность работы ОТИ, а также оптимизировать технико-технологические процессы ОТИ. Показатели кластера «Взаимосвязи и внешние факторы», выделенные дополнительно относительно показателей, эффективно использовать в адаптивных алгоритмах для минимизации внешних рисков. Кластеры «Эффективность использования ресурсов» и «Эксплуатационные объемы» обладают высокой управляемостью и динамичностью, кластер «Инфраструктурная мощность» является важным для стратегического планирования, но требует дополнительных ресурсов для изменений, кластер «Взаимосвязи и внешние факторы» предназначен для повышения устойчивости системы к внешним воздействиям.

На примере радарной диаграммы (рисунок 1.9) и таблицы 1.4 представлены результаты сравнительного анализа четырех кластеров показателей объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) по методу экспертных оценок:

Таблица 1.4 - Результаты экспертной оценки кластеров показателей ОТИ

№ п/п	Наименование кластера	Функциональное значение (0°)	Степень управляемости (90°)	Влияние на эффективность системы (180°)	Динамичность параметров (270°)
1	Инфраструктурная мощность	7	2	6	2
2	Эксплуатационные объемы	6	5	6	6
3	Эффективность использования ресурсов	9	9	9	8
4	Взаимосвязи и внешние факторы	5	3	4	7

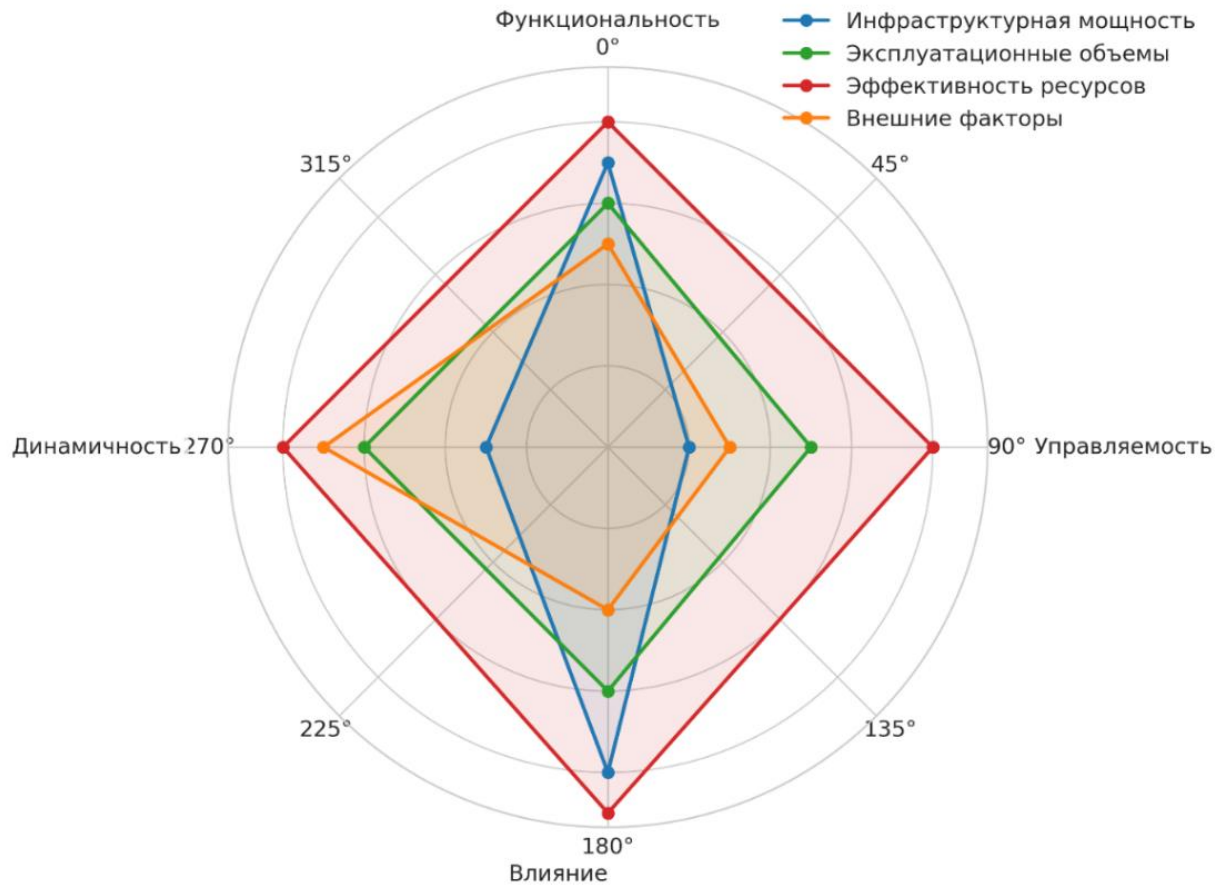


Рисунок 1.9 – Радарная диаграмма кластеров показателей ОТИ ИТС

Кластер «Эффективность использования ресурсов» обнаруживает максимальные значения по всем критериям (8-9 баллов по 10-балльной шкале), что подтверждает его ключевую роль в оперативном управлении; «Инфраструктурная мощность» сочетает высокую функциональность (7 баллов) с низкой управляемостью (2 балла), определяя ее значение для стратегического планирования; «Эксплуатационные объемы» демонстрируют сбалансированные средние показатели (5-6 баллов), характерные для тактических решений; «Внешние факторы» выделяются выраженной динамичностью (7 баллов) при ограниченной управляемости (3 балла).

Такое распределение характеристик обосновывает необходимость дифференцированного подхода к разработке принципов цифровизации управлению в транспортной системе.

1.4 Современные парадигмы цифровизации управления железнодорожным организационно-технологическим взаимодействием в мультимодальных транспортных системах: отечественный и зарубежный опыт

Железнодорожный транспорт РФ в период наступившей четвертой индустриальной эпохи характеризуется дальнейшим расширением и развитием инфраструктуры, техники и технологий. Увеличивается протяженность сети общего пользования, скорости движения, повышается качество обслуживания пассажиров и организации перевозок грузов на основе принципов цифровизации и интеллектуализации систем управления [47].

Современные интеллектуальные управляющие системы ЖДТ имеют сформированную системную архитектуру (рисунок 1.10), отражающую её основные подсистемы (например: сетевые устройства управления, сетевые технические узлы, сетевое подключение подвижного состава и инфраструктуры железной дороги), их взаимосвязь (различные проводные и беспроводные сети) и основные функции [36].

Цифровизация на железнодорожном транспорте происходит при ковергенции информационно-телекоммуникационных технологий и прикладного искусственного интеллекта. Это позволяет сформировать единую интеллектуальную железнодорожную транспортную систему с уникальными свойствами наблюдаемости, прогнозируемости и управляемости, а также обеспечивает её высокоэффективное использование на основе внедрения масштабируемых разнородных прикладных процессов и услуг. Оборудование современной ИТС помимо системы искусственного интеллекта включает системы беспроводного взаимодействия с персоналом, подвижным составом, и системой управления ЖДТ и др. [42].

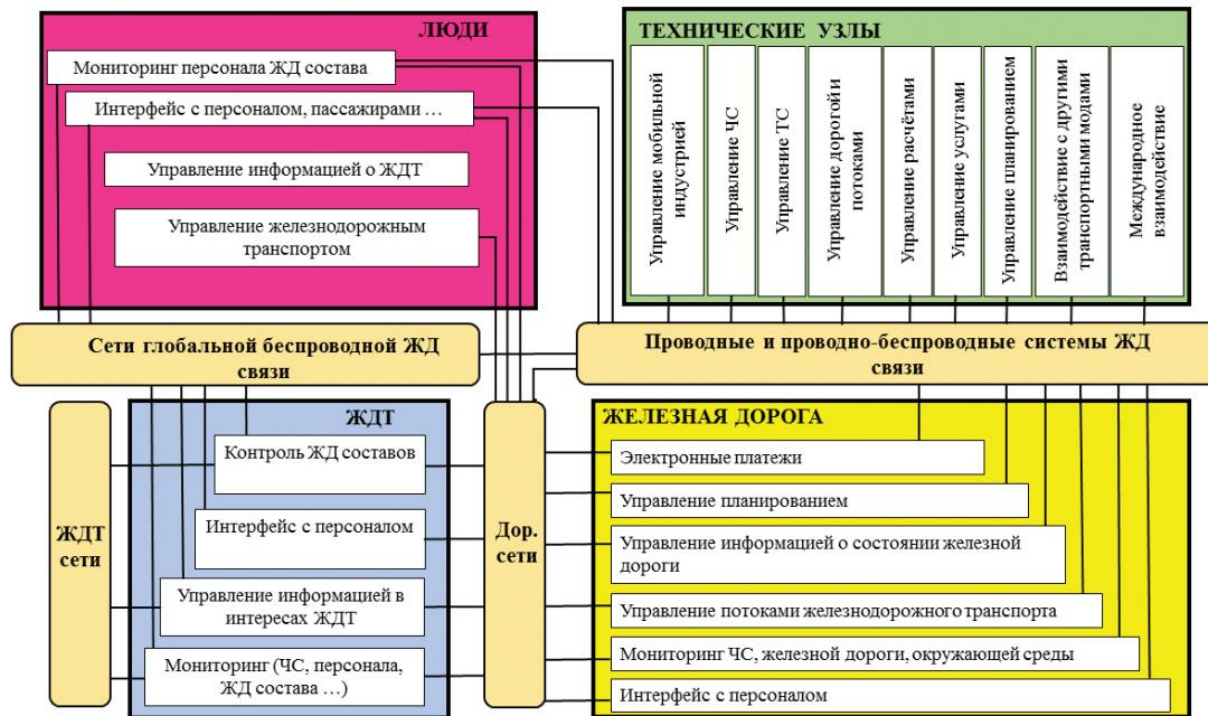


Рисунок 1.10. Системная архитектура интеллектуальной транспортной системы железнодорожного транспорта [38]

Верхний уровень иерархии структуры ИТС – уровень сетевой инфраструктуры, содержащий скоростные каналы связи между диспетчерскими центрами хранения данных (дата-центрами), воздушные каналы связи между удаленными контроллерами, каналы связи через провайдеров сотовой связи, выделенные каналы связи с резервированием для обслуживания светофоров, цифровых табло и т.п.

Средний уровень иерархии структуры ИТС – уровень функциональной архитектуры, где содержатся подсистемы ИТС, и информация, курсирующая между ними.

Нижний уровень иерархии структуры ИТС – уровень бизнес-сущностей, где перечислены организации, определяющие транспортную стратегию, информационные потоки между этими организациями, предъявляющие требования к отчетности, к аналитике и к информационным системам в целом.

ИТС также подразделяется на подсистемы. Отдельно стоит отметить тот

факт, что данные подсистемы относятся к интеллектуальным транспортным системам всех видов транспорта в целом, и к железнодорожному транспорту некоторые из подсистем могут относиться не напрямую.

Информация, а также её сбор и хранение, имеет важнейшее значение для эффективного функционирования интеллектуальной транспортной системы. На данный момент в сфере интеллектуализации и цифровизации железнодорожного транспорта формализованы базовые требования к информации для построения и функционирования ИТС, представленные на рисунке 1.11 [47].



Рисунок 1.11. Этапы цифровой формализации параметров ОТИ

Сбор и хранение информации, а также осуществление высокоэффективной и бесперебойной работы интеллектуальных и цифровых технологий на железнодорожном транспорте является важной задачей, во многом выполняемой с помощью баз данных. Абсолютно каждая интеллектуальная система, в том числе и ИТС, апеллирует к массивам данных, содержащихся в базах данных. Иными словами, функционирование ИТС без базы данных представляется невозможным.

Система баз данных включает два основных компонента - собственно базу данных и систему управления базами данных – СУБД (рис. 1.10). Большинство СОД включают также программы обработки данных (прикладное программное обеспечение, ППО), которые обращаются к данным через СУБД.

Современная технология баз данных основана на концепции многоуровневой

архитектуры СУБД. Эти идеи впервые были сформулированы в отчёте рабочей группы по базам данных Комитета по планированию стандартов Американского национального института стандартов (ANSI/X3/SPARC). Этот отчёт был опубликован в 1975 г. В нем была предложена обобщенная трёхуровневая модель архитектуры СУБД, включающая концептуальный, внешний и внутренний уровни.

Концептуальный уровень архитектуры служит для поддержки единого взгляда на базу данных, общего для всех её приложений и независимого от них и от среды хранения.

Внутренний уровень архитектуры поддерживает представление данных в среде хранения и пути доступа к ним. На этом архитектурном уровне БД представлена в полностью «материализованном» виде, когда как на других уровнях идет работа на уровне отдельных экземпляров или множества экземпляров данных.

Внешний уровень архитектуры БД предназначен для групп пользователей. Описание представления данных для группы пользователей называется внешней схемой.

БД в ИТС ЖДТ должна носить географически распределенный характер [50], т.е. относиться к классу распределенных баз данных. Такой подход определяется необходимостью информационного охвата различных уровней системы. База наполняется данными из системы хранения больших данных после их тщательной селекции и структуризации.

Современная концепция эффективного функционирования ИТС направлена на создание единого информационного пространства (ЕИП), обеспечивающего более полное использование транспортной инфраструктуры, а значит, приведет к расширению спектра транспортных услуг с одновременным повышением их качества [51]. Конечной целью развития ЕИП на транспорте является интеллектуальная мультимодальная транспортная система (ИМТС), как симбиоз технологий двух видов: транспортных и инфотелекоммуникационных [52]. Основной функционал ИМТС связан с непрерывным автоматизированным управлением разнородной транспортной инфраструктурой, разнохарактерными транспортными потоками и

мультимодальными перевозками пассажиров и грузов. Таким образом, можно сделать вывод, что ИМТС является дальнейшим логическим развитием активно развивающихся и внедряемых сейчас ИТС. Обобщенная архитектура ЕИС ИМТС представлена на рисунке 1.12.

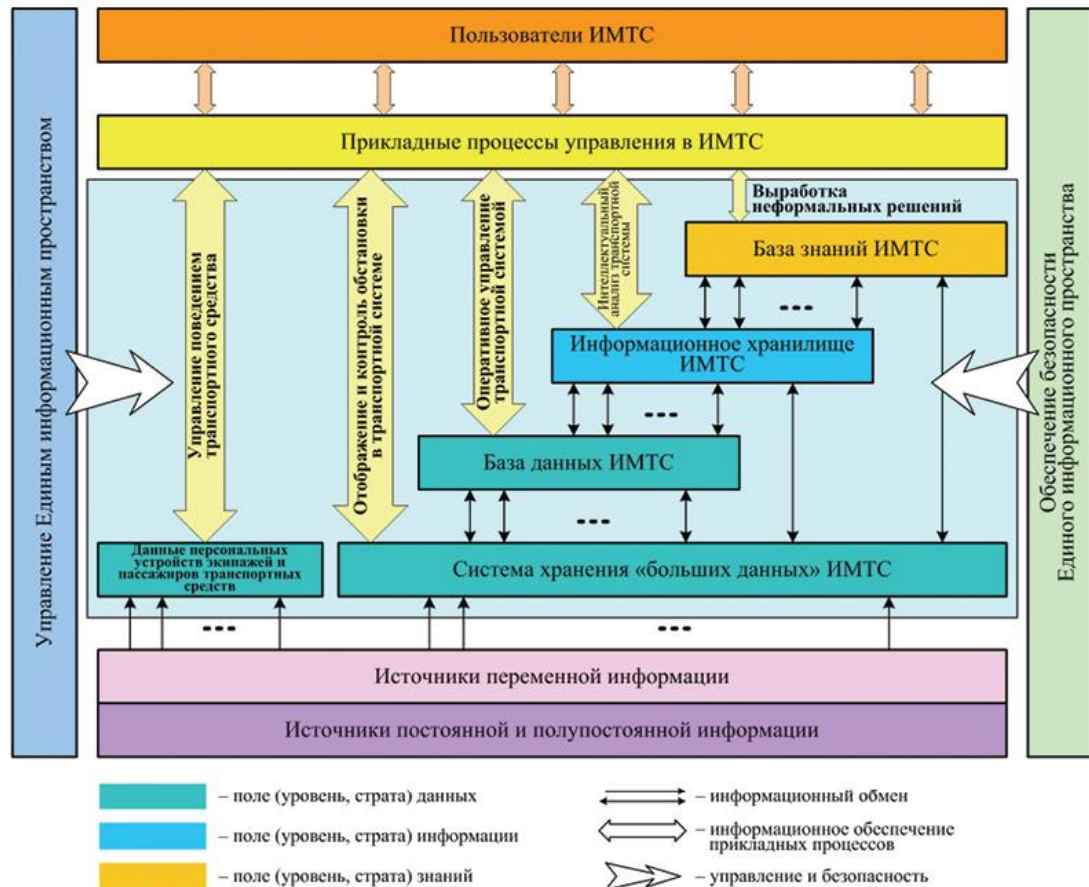


Рисунок 1.12. Обобщенная архитектура единого информационного пространства ИМТС [53]

ЕИП ИТС и ИМТС можно разделить на несколько уровней (полей): поле данных, поле информации, поле знаний.

Поле данных. Поле данных в ЕИП ИТС/ИМТС представляет собой систему хранения больших данных (СХБД). Многообразие источников, видов и форм представления исходной информации, множественный характер типов и единиц транспортных средств, объектов транспортной инфраструктуры и объектов среды её функционирования позволяют отнести первичные данные, подлежащие накоплению и хранению в ЕИП, к «большим данным» (Big Data).

Поле информации. Предназначено для информационной поддержки решения задач интеллектуального анализа транспортной системы. Названный класс задач связан с выявлением существенных корреляций и тенденций в больших объемах данных [49].

Поле знаний. Это информационное обеспечение задач, оперирующих слабо структурированной или неструктурированной информацией, поэтому в базе знаний, составляющей основу рассматриваемого поля, хранятся не только собственно данные, но и правила вывода новой информации на основе имеющейся [51].

На данный момент передовые технологии в области интеллектуализации управления на транспорте имеют такие страны как Япония, Южная Корея, Сингапур и США. Также активным внедрением инноваций в данной сфере занимаются КНР, Великобритания, Франция, Финляндия и Германия [47, 57-58]. Внедрена крупная промышленная программа ERTMS, направленная на гармонизацию системы автоматического управления и связи поездов и обеспечение совместимости всей железнодорожной системы в Европе. Начиная с 2017 года с ERTMS уже работает на почти 4,5 тыс км линий основных магистралей. ERTMS контролирует и защищает почти все высокоскоростные сети в Италии и Испании; так же как в значительной части швейцарской, голландской и бельгийской железнодорожных сетей. Поезда работают в коммерческом режиме на скорости 320 км/ч.

Ускоренное расширение сети высокоскоростных линий **Китая** происходило параллельно с развитием китайской системы цифровизации управления движением поездов (CTCS), в которой упор делается на автоведение поездов и использование цифровых технологий, включая искусственный интеллект [59]. Это содействует росту пропускной способности и удовлетворенности пассажиров при гарантированной безопасности и надежности в управлении движением поездов.

В целях реализации Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 гг., утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы» в 2017 году Правительством Российской Федерации была принята к реализации программа «Цифровая

экономика Российской Федерации».

Согласно определению [36] цифровая экономика – хозяйственная деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объёмов и использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг [47].

Продолжением Национального проекта «Цифровая экономика Российской Федерации» в области транспорта является Стратегия цифровой трансформации транспортной отрасли, принятая Министерством транспорта в 2021 году.

Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» предусматривает развитие по направлениям: Транспортно-логистические услуги – в части адаптации клиентских сервисов и услуг к потребностям грузоотправителей и разработка новых; Повышение производственной эффективности – технологии, внедрение которых окупается за период 10-15 лет и благодаря которым оптимизируются операционные расходы, повышается производительность труда; Инновационное и технологическое развитие – инновационные системы автоматизации станционных процессов на основе искусственного интеллекта [50] и др.

На современном этапе цифровой трансформации отечественной железнодорожной транспортной отрасли можно выделить ИТС, наиболее масштабно внедряемую в производственный процесс ОАО «РЖД» в рамках проекта «Цифровая железная дорога». К ним можно отнести ИСУЖТ - Интеллектуальную систему управления железнодорожным транспортом, ДИЛС – Дорожную информационную логистическую систему, ДМ ЗИ – Динамическую модель загрузки инфраструктуры. Данные системы являются на данный момент времени перспективными, но при этом имеют вопросы и проблемы, которые необходимо решить ученым-транспортникам для дальнейшего развития.

ИСУЖТ железных дорог России является примером масштабного внедрения цифровых интеллектуальных технологий в работу железнодорожного транспорта.

ИСУЖТ отличается от «классических» информационных систем большей степенью цифровизации и интеллектуализации, а также использованием данных уже внедренных и опробованных информационных систем для эффективной и наиболее точной работы [56, 64].

В свою очередь базой для разработки, внедрения, и эксплуатации ИСУЖТ, бесперебойно предоставляющей информацию для других баз данных ИТС, является Автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ), объединяющая в себе множество подсистем, реализующих задачи управления: перевозочным процессом; грузовой и коммерческой работой; пассажирскими перевозками; локомотивным и вагонным хозяйствами; эксплуатацией и ремонтом пути, сооружений и устройств; системами и средствами СЦБ; устройствами электроснабжения и энергетики, бухгалтерского учета и отчетности и т.д. [63]

Особое место среди подсистем АСУЖТ занимают: автоматизированная система управления перевозками (АСОУП), система резервирования и продажи билетов «Экспресс», автоматизированная система актово-претензионной работы «ЕАСАПР М НП», автоматизированная система управления локомотивным хозяйством (АСУТ), «АСУ-контейнер», «ГИД УРАЛ», «АСУ МР», автоматизированный диспетчерский центр управления перевозками (АДЦУ) и другие системы, обеспечивающие бесперебойный перевозочный процесс.

С целью оптимизации процесса перевозок и улучшения качественных показателей работы железнодорожного транспорта был разработан проект ИСУЖТ. Технологические эффекты от внедрения ИСУЖТ по вертикалям управления призваны обеспечить существенное повышение эффективности эксплуатационной работы и клиентоориентированности ОАО «РЖД» [24].

Данная ИТС развернута на полигонах Санкт-Петербург – Москва, Санкт-Петербург – Бусловская, Санкт-Петербург – Невель, Байкало-Амурская магистраль, отдельных участках Транссиба [62]. Структура подсистем ИСУЖТ и их компонентов отображена в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Структура подсистем ИСУЖТ

№	Тип подсистем	Компоненты подсистем
1	Функциональные подсистемы	– Функциональная подсистема «Годовое и месячное планирование эксплуатационной работы»; – Функциональная подсистема «Оперативное управление эксплуатационной работой»; – Функциональная подсистема «Контроль и анализ эксплуатационной работы».
2	Технологические подсистемы	– Технологическая подсистема управления эксплуатационной работой на станции; – Технологическая подсистема управления тяговым хозяйством; – Технологическая подсистема поддержки управления и обеспечения безопасности движения поездов.
3	Обеспечивающие подсистемы	– Интеграционная платформа; – Подсистема контроля технологических процессов с использованием мобильных устройств; – Подсистема электронной подписи при юридически значимом электронном взаимодействии; – Подсистема информационной безопасности.

Одной из успешно действующих логистических систем является Дорожная информационно-логистическая система (ДИЛС), которая обеспечивает интеграцию между ОАО «РЖД» и ключевыми клиентами, портами. Система обменивается данными для эффективного планирования подвода грузов, однако для дальнейшего роста ей необходимы функции прогнозирования, анализа исторических данных и внедрение элементов искусственного интеллекта для превращения в самообучающуюся систему.

Динамическая модель загрузки инфраструктуры (ДМЗИ) – это действующий общесетевой инструмент для автоматизированного согласования заявок на перевозку на основе реальной загрузки путей. Она моделирует продвижение грузов на 45 суток, автоматически оценивает пропускную способность, ищет альтернативные маршруты и графики, а также визуализирует загрузку на интерактивной карте.

Сравнительный анализ интеллектуальных систем управления мультимодальным взаимодействием на транспорте представлен в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Сравнительный анализ интеллектуальных систем управления мультимодальным взаимодействием на транспорте

Аспект сравнения	ИСУЖТ	ДИЛС	ДМЗИ
Основное назначение	Комплексное управление перевозочным процессом на полигоне сети	Логистическая интеграция и координация работы между железной дорогой и портами/ключевыми клиентами.	Автоматизированное согласование заявок на перевозку на основе реальной загрузки инфраструктуры.
Ключевые функции	Автоматическое формирование графика, управление пропуском поездов, управление тяговыми ресурсами, эстафетная передача поездопотоков	Обмен данными для сменно-суточного планирования (наличие груза, подход флота, план подвода вагонов).	Динамическое моделирование продвижения грузов на 45 суток; автоматическая оценка и резервирование пропускной способности; поиск альтернативных маршрутов и графиков.
Положительный эффект	1. Комплексность (охват широкого круга задач). 2. Оптимизация грузового движения и сокращение издержек. 3. Создание резерва пропускной способности. 4. Повышение точности и соблюдения сроков доставки.	1. Практическая интеграция с внешней инфраструктурой (порты). 2. Снижение простоев вагонов. 3. Повышение точности планирования подвода грузов. 4. Сокращение отклонений от плана.	1. Прозрачность загрузки инфраструктуры для всех участников. 2. Высокая скорость обработки заявок. 3. Объективность при согласовании на основе данных модели. 4. Визуализация загрузки на интерактивной карте.
Выявленные проблемы	1. Сложность внедрения из-за масштаба и необходимости интеграции с множеством legacy-систем. 2. Проблемы безопасности в условиях высокой автоматизации. 3. Необходимость масштабного обучения персонала. 4. Технологические риски комплексной реализации.	1. Ограниченный функционал (требуется прогноз отправления порожних вагонов, анализа истории). 2. Отсутствие элементов ИИ для самообучения и выдачи рекомендаций. 3. Пока не реализована как самообучающаяся система.	1. Жесткость системы – автоматические отказы могут блокировать перевозки, не учитывая все нюансы. 2. Проблема приоритизации – высокоприоритетные грузы (уголь, лес) вытесняют другие. 3. Недискриминационный доступ – есть претензии, что система может создавать барьеры для отдельных грузоотправителей. 4. Необходимость постоянной "ручной" отладки под меняющиеся условия.

Данная таблица демонстрирует, что развитие цифровых систем на железнодорожном транспорте – это эволюционный процесс, где каждая система решает свой круг задач, но при этом сталкивается с характерными для своего уровня развития вызовами.

1.5 Выводы по главе

Проведенный анализ систем управления железнодорожной транспортной работой на принципах цифровизации и интеллектуализации, позволил сформулировать следующие выводы:

1 – исторический обзор (п. 1.1) демонстрирует четкую траекторию развития

от механизации и локальной автоматизации к комплексной цифровизации на основе формирования массивов данных и, наконец, к этапу интеллектуализации, где транспортные системы приобретают прогностические и адаптивные свойства. Этот путь является общей мировой тенденцией, что подтверждается анализом зарубежного опыта (п. 1.4);

2 – формализация – это фундамент цифровизации и интеллектуализации. Эффективное внедрение цифровых технологий невозможно без глубокой формализации технико-технологических параметров транспортного производства (п. 1.2). Перевод качественных характеристик (надежность, безопасность, эффективность) в формализованные цифровые модели и алгоритмы является обязательным условием для создания цифровых двойников, работы предиктивных систем и алгоритмов искусственного интеллекта на транспорте;

3 – парадигмы управления, как современные принципы управления транспортным производством (п. 1.3), смещаются от жесткой иерархии и реактивного реагирования к адаптивным, сетцентрическим, проактивным и Data-ориентированным моделям. Управление транспортным производством все больше базируется не на интуиции, а на анализе больших данных и результатах моделирования;

4 – технологии, как драйверы, а не самоцель. Как показывает анализ инновационных решений (п. 1.5) и зарубежного опыта (п. 1.4), внедрение IoT, Big Data, AI и цифровых двойников на железнодорожном транспорте направлено на реализацию конкретных стратегических целей. Эти цели фокусируются на системном результате: повышении конкурентоспособности (через качество услуг и пропускную способность), безопасности (на основе прогнозирования рисков) и интеграции (в глобальные логистические транспортные цепочки);

5 – цифровая трансформация не ограничивается техническим перевооружением, а требует глубоких изменений в организационных системах управления (п. 1.5), пересмотра бизнес-процессов, формирования новой кадровой политики и корпоративной культуры, ориентированной на данные и постоянные инновации. Известный успешный зарубежный опыт (п. 1.4) подразумевает синхронное развитие

технологий, нормативной базы и компетенций персонала.

Таким образом, управление транспортным производством на принципах интеллектуализации и цифровизации представляет собой целостную стратегию. Она базируется на исторически сложившемся технологическом фундаменте, требует строгой формализации процессов, реализуется через новые принципы управления и внедрение конвергентных технологий и, в конечном итоге, нацелена на достижение системного эффекта: создание безопасной, эффективной, клиентоориентированной и конкурентоспособной железнодорожной транспортной системы, интегрированной в мировую экономику. Данными положениями определяются направления диссертационного исследования по развитию методов управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на принципах цифрового аксиоматного системотехнического моделирования и их актуальность.

В соответствии с выполненными исследованиями в главе 1 определены проблемные вопросы эффективности управления транспортными процессами на новых принципах цифровизации. Выполнена постановка целей и задач дальнейшего исследования (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13. Структура диссертационного исследования

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ В МЕТОДАХ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

2.1 Исследование научных разработок в области решения прикладных задач цифровизации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами

На современном этапе развития транспортная отрасль все более требовательна к повышению общего уровня эффективности функционирования, и для этого активно внедряется цифровые принципы управления перевозочным процессом, заключающаяся в динамическом планировании маршрутов с учетом загруженности ОТИ, минимизации задержек за счет прогнозирования и корректировки транспортно-технологических процессов, применении автоматизированного управления системами ОТИ, динамической адаптации к внешним факторам и др. [71].

При разработке принципов управления транспортно-технологическими процессами ОТИ традиционно используются научные методы, основанные на линейном и динамическом программировании, теории массового обслуживания, теории надежности, теории графов, теории вероятностей, имитационном моделировании; применяются программно-целевой и балансовый метод в экономико-математических моделях, а также новые интуитивные и логистические методы на основе нейросетевого подхода и нечеткой логики. Их количество и степень использования обоснованы значительной сложностью исследуемых транспортных систем, частой невозможностью учета совместного влияния противоречивых внешних и внутренних факторов.

Научные основы интеллектуализации управления транспортно-технологическими процессами были заложены в XX веке, преимущественно во второй его по-

ловине, в период активного развития кибернетики, теории автоматического управления и искусственного интеллекта. Значительный вклад в развитие данного направления внесли выдающиеся ученые: Норберт Винер - основоположник кибернетики, разработавший теоретические основы автоматизированного управления (1948 г.) [72]; А.Н. Колмогоров, чьи работы по теории информации и алгоритмов стали фундаментом для автоматизации процессов (1950-е гг.) [73]; Лофти Задэ, создатель теории нечетких множеств, нашедшей широкое применение в управлении сложными системами (1965 г.) [74]; Р. Беллман, разработавший метод динамического программирования, который активно используется для оптимизации транспортных потоков (1950-е гг.) [75]; а также Дж. Маккарти, А. Ньюэлл и Г. Саймон, внесшие значительный вклад в развитие искусственного интеллекта и методов принятия решений (1950-60-е гг.) [76-77].

Особого внимания заслуживают работы советских ученых, в частности В.М. Глушкова и В.С. Пугачева, посвященные автоматизации управления производственными и транспортными системами (60-80-е гг. XX века) [78-79].

Параллельно с развитием фундаментальных основ кибернетики и ИИ, существенный вклад в интеллектуализацию управления транспортными процессами внесли специалисты в области транспортных систем, логистики и теории транспортных потоков. Среди них следует отметить Фрэнка Найта, одного из первых исследователей, математически описавшего транспортные потоки (1930-е гг.) [80]; Джеймса Лайтхилла и Дж. Уизема, разработавших гидродинамическую теорию транспортных потоков (1955 г., модель Lighthill-Whitham-Richards) [81-82]; Гордона Ньюэлла, создателя теории фазовых переходов в транспортных потоках (1960-80-е гг.) [83]; а также Дитриха Браесса, открывшего "парадокс Браесса" (1968 г.), имеющий принципиальное значение для проектирования дорожных сетей [84]. Значительный вклад в развитие интеллектуальных транспортных систем внесли Роберт Херман, пионер математического моделирования транспортных систем (1950-70-е гг.) [85], и Карлос Ф. Даганцо, разработавший современные модели управления грузопотоками и общественным транспортом [86].

В области логистики и управления цепями поставок существенный вклад внесли Джон Форрестер, основатель системной динамики (1950-е гг.) [94], и Мартин Кристофер, разработавший концепции гибких и интеллектуальных логистических систем (1990-2010 гг.) [95].

В нашей стране теоретические основы управления на транспорте были заложены в середине XX века трудами российских учёных: А.Г. Александров, Б.Р. Андриевский, В.М. Кунцевич, В.О. Никифоров, Б.Н. Петров, А.И. Рубан, В.В. Солодовников, В.А. Терехов, Е.Д. Теряев, А.В. Тимофеев, А.А. Фельдбаум, В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, Я.З. Цыпкин, И.Б. Ядыкин, В.А. Якубович и др. [87-93].

В отечественной и зарубежной практике уже накоплен значительный опыт применения этих методов, однако их дальнейшее развитие требует комплексного анализа, систематизации и адаптации к современным условиям цифровой трансформации транспорта.

Интеллектуализация управления железнодорожными процессами предполагает применение таких методов, как: нечеткая логика для работы с неточными и неполными данными; нейросетевые технологии для адаптивного прогнозирования и оптимизации; теория массового обслуживания и имитационное моделирование для анализа потоковых процессов; кластерный подход и системный анализ для повышения устойчивости транспортных систем. Современные железнодорожные транспортно-технологические процессы требуют внедрения интеллектуальных систем управления для повышения эффективности, безопасности и снижения эксплуатационных затрат [96].

В последние десятилетия активно развиваются исследования в области искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (МО) и анализа больших данных, направленные на решение прикладных задач транспортной отрасли [97].

Известно, что фундаментальные научные принципы отечественного проектирования железнодорожных систем были заложены в работах В.Н. Образцова [137], который сформулировал базовые транспортные аксиомы, остающиеся актуальными и сегодня.

Значительный вклад внёс Н.В. Правдин, разработавший принципы взаимодействия различных видов транспорта [138].

Работы В.А. Персианова по прогнозированию потоков с использованием регрессионного анализа обеспечивают как стратегическое планирование, так и оперативное управление транспортными процессами [140].

Значительный вклад в создание и разработку общей теории массового обслуживания внёс советский математик А.Я. Хинчин (1984–1959) [143]. Он предложил термин «теория массового обслуживания».

Особого внимания заслуживают исследования под руководством доктора технических наук, профессора П.А. Козлова [150-152], в которых разработан комплексный подход к моделированию технологических процессов. В этих работах успешно применяется сочетание методов микро- и макро моделирования, что позволяет получать достоверные результаты при анализе сложных транспортных систем. Под руководством проф. П. А. Козлова обоснованы теоретические подходы к оптимизации техпроцессов ж.-д. транспортных систем с применением аппарата имитационного моделирования, которые на много лет вперед определили принципы построения и оценки моделей ж.-д. станций.

Отечественные ученые (П.А. Козлов, А.А. Усков) внесли значительный вклад в адаптацию ТМО для мультимодальных перевозок и управления автотранспортом. Методы теории массового обслуживания [144-148] позволяют формализовать сложные транспортные процессы как каналы обслуживания, характеризующиеся интенсивностью прохождения заявок (составы, локомотивы, вагоны, документация и т. п.), интенсивностью обслуживания, временем обслуживания, временем нахождения в очереди, длиной очереди.

Методикам исследований, основанных на отечественном научном опыте ученых-транспортников по применению методов цифровизации и интеллектуализации логистических транспортных процессов, посвящены работы В.И. и М.В. Колесниковых, В.Д. Верескуна, Э.А. Мамаева, Е.Н. Розенберга, П.В. Куренкова, О.Д. Покровской, Э.К. Лецкого, Д.В. Ефанова и др. [161-167].

Большой вклад в развитие теории и практики моделирования сложных систем, применения имитационного и когнитивного моделирования, информационного обеспечения перевозок грузов и автоматизации управления перевозочного процесса внесли А. Э. Александров, Г. И. Белявский, А. Ф. Бородин, Н. П. Бусленко, В. А. Буянов, Г. В. Горелова, И. А. Гильденгорн, А. Н. Гуда, И. Д. Долгий, С. Ю. Елисеев, А.А. Ерофеев, О.Н. Ларин, Е. Г. Жданова, В. Н. Иванченко, Н. Д. Иловайский, П. А. Козлов, М.В. Четчуев, В. С. Колокольников, В. А. Кудрявцев, Д. А. Ломаш, Н. Н. Лябах, А. С. Мишарин, О. В. Осокин, А. Т. Осьминин, А. П. Петров, Ю. И. Рыжиков, Б. Я. Советов, В. Н. Томашевский, Л. П. Тулупов, Е. М. Ульяницкий, М.Н. Чепцов, С.А. Бессоненко, С. А. Яковлев и др. Среди зарубежных исследователей отметим Дж. Форрестера, Р. Шеннона, Б. Шмидта, Т. Дж. Шрайбера, Ли Бинчжан, Шукай Ли и др.

Мировые страны-лидеры в сфере транспорта – США, Япония, Германия, Франция, страны ЕС, Китай и др. – известны своими технологическими решениями в области эффективной работы транспортно-технологических систем. Значительный научный вклад в развитие технологии работы транспортных систем внесли немецкие ученые У. Кауэр (W. Cauer), Г. Поттхоф (G. Potthof), У. Мюллер (W. Muller). Дальнейшие разработки реализованы в работах Ф. Хейта, Г. Корацца (G. Corazza), Т. Гулей (T. Gooley) [175], Г. Ричардсона (H. Richardson) [176], А. Робинсона (A. Robinson) [177] и др.

Нейросетевые методы получили развитие благодаря работам Дж. Хопфилда (1982) [102] и С. Гроссберга (1976) [103], предложивших модели оптимизации транспортных маршрутов на основе адаптивных сетей. В последние десятилетия эти подходы были дополнены техниками глубокого обучения (Я. ЛеКун) [104], что позволило решать задачи прогнозирования загрузки транспортной инфраструктуры с высокой точностью и эффективностью.

Однако применение нейронных сетей для решения транспортных задач сталкивается с рядом существенных ограничений. Во-первых, на начальном этапе отсутствуют четкие критерии для определения необходимой сложности и размеров

сети, обеспечивающих требуемую точность моделирования транспортных процессов. Во-вторых, недостаточный объем или нерепрезентативность обучающих данных приводят к невозможности адекватного обучения сети и, как следствие, к некорректной работе системы. Важным требованием является непротиворечивость исходных данных, так как наличие противоречий в обучающей выборке существенно снижает эффективность модели. Кроме того, существует значительная вариативность в способах представления входных данных - от простейшего линейного преобразования до сложного многомерного анализа параметров, что требует дополнительных исследований для выбора оптимального подхода в каждом конкретном случае.

Особое место в современных системах управления транспортными процессами занимают технологии нечеткой логики [105–120], обладающие уникальной способностью обрабатывать нечеткие данные и предоставлять интерпретируемые результаты принятия решений. Наиболее перспективным представляется их гибридное использование с нейросетевыми технологиями, особенно применительно к управлению транспортно-технологическими процессами ОТИ. В таких гибридных системах нейронные сети выполняют важную функцию адаптивной настройки параметров нечетких систем, оптимизируя функции принадлежности и тем самым повышая качество принимаемых решений.

Теория нечётких множеств, предложенная Лотфи Заде в 1965 году, получила развитие в транспортной сфере благодаря работам целого ряда учёных [74]. Это работа А. Кофмана [98], который адаптировал методы нечёткой логики для оптимизации грузопотоков и управления светофорными циклами, а также Д. Дюбуа [121] и А. Прада (1980-е) [122], создавших теорию нечетких интервалов и возможных распределений, что значительно расширило прикладное применение метода.

Системы управления инфраструктурно-технологическим взаимодействием в транспортных системах, основанные на применении представленных ключевых направлений, позволяют производить непрерывный мониторинг всех составляющих транспортного процесса, параллельно осуществляя решение дополнительных

задач по оценке (ценологический анализ) и прогнозированию (нечеткая логика) параметров ОТИ в условиях динамичной ситуации (Н. Н. Лябах, М. В. Колесников) [98-101].

В свою очередь д.т.н. М. В. Колесников разработал гибридные системы, сочетающие нечёткие алгоритмы с нейросетевыми технологиями [123-125]. Значительный вклад в решение данных вопросов внес д.т.н., проф. Н.Н. Лябах [126-128], предложивший методы управления транспортными потоками в условиях неопределённости, включая динамическую маршрутизацию и адаптивное регулирование.

Г.С. Осипов расширил область применения, интегрировав нечёткие методы в когнитивные модели для автономных транспортных систем, а также описал гибридные когнитивные системы, сочетающие методы искусственного интеллекта с моделями рассуждений [129].

Перспективными направлениями исследования структур и технологии работы транспортных систем являются методы теории системного анализа (Н. К. Сологуб и А. Т. Осьминин [130-131], М. Б. Петров [132] и др.), позволяющие выявить возможные направления исследований сложных транспортно-технологических систем железнодорожного транспорта и их связи с внешними макросистемами. Современная системотехника, основанная на работах Н.К. Сологуба (иерархическое управление) и А.Т. Осьмининой (когнитивные методы), представляет собой эффективный инструмент проектирования транспортных систем.

Системный анализ и теория игр (Т. Шеллинг, 1950-е годы; Р.Л. Стратонович, 1960-е годы) [133-134] обеспечивают методологическую основу для принятия решений в конфликтных ситуациях, характерных для мультимодальных перевозок.

Стохастические методы занимают ключевое место в анализе транспортных систем, начиная с марковских моделей Р.Л. Добрушина (1960-е) для динамических процессов [139].

Концепция энтропии К. Шеннона находит важное применение в анализе транспортных систем, позволяя количественно оценивать уровень организации процессов через энтропийные метрики [141]. Данный подход используется для из-

мерения хаотичности транспортных потоков, включая неравномерность грузопотоков и интенсивность заторов, а также для оптимизации логистических маршрутов, где снижение энтропии повышает надежность системы. Согласно концепции К. Шеннона, уровень организации транспортно-технологической структуры (системы) или ее «избыточность» равна $R = 1 - \frac{H}{H_{max}}$, где R – уровень относительной организации системы или «избыточность»; H – текущее (фиксированное на данный момент времени) значение неопределенности системы; H_{max} – максимально возможная неопределенность системы.

Транспортно-технологические системы характеризуются большой степенью сложности, определяемой многообразием формирующих элементов и подсистем, функционирование которых связано с наличием факторов случайности.

Понятие «относительная организация» R позволяет сравнивать уровни организации систем, имеющих различные структурные и функциональные возможности. В соответствии с [191] изменение уровня организации системы характеризуется изменением ее неопределенности, мерой степени которой может быть принята энтропия, определяемая по формуле

$$H = -\sum_{i=1}^n P(A_i) \log_a P(A_i) \quad (2.1)$$

где A_i – состояние системы; $P(A_i)$ – вероятностный показатель состояния системы ($i = 1, 2, \dots, n$); n – количество возможных состояний системы; a – основание логарифма, $a = 2$.

Каждую подсистему можно характеризовать энтропией двух случаев: вероятностью безотказной работы p и вероятностью отказа (задержек) $q=1-p$. Тогда $H = -(p \cdot \log_a p + q \cdot \log_a q)$.

Так как ТТС состоит из ряда зависимых подсистем, энтропия равна сумме энтропии одной из составных подсистем и условных энтропии остальных подсистем:

$$H(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{js}) = H(x_j) + H(x_{j2}|x_{j1}) + H(x_{j3}|x_{j1}, x_{j2}) + \dots + H(x_{js}|x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{j(s-1)}), \quad (2.2)$$

где j – индекс соответствующей подсистемы;

$H(x_{j2}|x_{j1}), H(x_{j3}|x_{j1}, x_{j2}), \dots, H(x_{js}|x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{j(s-1)})$ – условные энтропии внутренних системных элементов j -подсистемы.

Максимальная неопределенность системы равна: $H_{max} = \log_a n$.

Для полностью детерминированной системы, т.е. обеспечивающей ритмичность переработки транспортных средств и минимум непроизводительных простоев, $H = 0$. Такая система обладает максимальной относительной организацией, равной $R = 1$. Если система полностью дезорганизована, т.е. превышено пороговое значение мощности транспортной системы, $H = H_{max}$ и ее относительная организация равна нулю ($R = 0$). Следовательно, значения относительной организации находятся в пределах $0 \leq R < 1$.

Теория массового обслуживания (ТМО) представляет собой фундаментальный математический аппарат для анализа транспортных систем в условиях стохастических нагрузок. Основоположником теории массового обслуживания считается датский учёный А. К. Эрланг, который решил ряд задач по теории систем массового обслуживания с отказами [142].

Для определения *образов* и *классов* элементов систем в сложной окружающей обстановке используются **методы теории распознавания** [78, 150], основанные на разделах кибернетики. На каждом этапе распознавания имеется конечный набор классов (внутрисистемных объектов), которые можно выразить конечным множеством $W = \{A, B, C, D, \dots, Z\}$. Каждый класс содержит множество объектов. Образ объекта – совокупность конечного числа свойств объекта – представляется в виде n -мерного вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, компоненты которого количественно характеризуют свойства образа.

Геометрически в n -мерном пространстве объекты одного класса характеризует некоторая область, отличающаяся от областей объектов другого класса. Задача распознавания объектов может быть в принципе решена, если в пространстве образов проведены поверхности, которые разделяют это пространство на области, содержащие точки образов разных классов.

Например, имеются два класса объектов транспортно-технологической системы: региональные грузовые накопительные терминалы (A) и транспортно-

складские комплексы предприятий (B). Обозначим через $A_0 = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ и $B_0 = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ множества предварительно изучаемых образцов этих классов. Примем, что x – это образ исследуемого нового объекта. Мерой близости этого образа к классам A и B являются величины $S(x, A)$ и $S(x, B)$, представляющие собой средние квадраты расстояний от точки x до точек, соответствующих образцам классов A и B .

Тогда для среднего значения меры близости составят

$$\left. \begin{aligned} S(x, A) &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d^2(x, a_i) \\ S(x, B) &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d^2(x, b_j) \end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

где $d^2(x, a_i)$, $d^2(x, b_j)$ – квадрат расстояния от точки x до точек множества предварительно изученных образцов A_0 и B_0 .

Полученная поверхность C , разделяющая образцы обоих классов, имеет точки, удовлетворяющие условию $S(x, A) = S(x, B)$.

Однако возможны случаи ошибочного отнесения объекта к чужому классу. В этом случае необходимо устанавливать меру (относительное число) неправильно распознанных объектов.

Исследования методов имитационного моделирования транспортной работы ведутся во многих проектных транспортных институтах и вузах России: АО «ВНИИЖТ», ИПТ РАН, АО «НИИАС», АО «ИЭРТ», АО «Ленгипротранс», АО «Мосгипротранс», АО «Росжелдорпроект», ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), ФГБОУ ВО ПГУПС, ФГБОУ ВО СГУПС, ФГБОУ ВО РГУПС, ФГБОУ ВО УрГУПС, ФГБОУ ВО ПривГУПС и др.

Интересным с научной точки зрения является моделирование, основанное на точных математических методах – «жесткое» (линейное программирование Л. Канторовича, принцип максимума Л. Понтрягина, динамическое программирование Р. Беллмана), которое обеспечивает детерминированные решения при проектировании инфраструктуры, расчете пропускной способности и распределении грузопотоков [153-154]. Его преимущества – высокая точность (до 99,9 %) и прозрачность

алгоритмов, однако оно ограничено в учете неопределенностей и адаптации к изменениям. В противовес этому «мягкое» моделирование (нечеткая логика Л. Заде, нейросети Ф. Розенблатта, генетические алгоритмы Дж. Холланда) позволяет работать с неполными данными и адаптироваться к динамическим условиям, но требует значительных вычислительных ресурсов и сложно верифицируется [155-156].

Рассматривается интеграция обоих подходов в гибридные транспортные системы, такие как цифровые двойники ОАО «РЖД», а также адаптивное управление метрополитенами («жесткое» расписание + «мягкое» регулирование пассажиропотоков). Перспективы связаны с квантово-гибридными моделями, бионическими системами и ИИ, что позволит сочетать точность «жестких» методов с гибкостью «мягких» в условиях роста сложности транспортных процессов.

Известен кластерный подход в решении транспортных задач, который имеет глубокие теоретические корни, восходящие к работам Альфреда Маршалла (1890 г.), впервые сформулировавшего концепцию "промышленных округов" – прообразов современных кластеров [157]. Существенный вклад внес Майкл Портер (1990 г.), разработавший теорию конкурентных преимуществ кластеров, которая нашла широкое применение при анализе логистических и транспортных узлов [158]. Современные зарубежные исследования представлены работами В. Росо (концепция "сухих" портов") и Д. Харингтона (критерии эффективности) [159-160].

В современных условиях особое значение приобретает развитие интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на железнодорожном транспорте, основанных на интеграции искусственного интеллекта, интернета вещей (IoT) и методов обработки больших данных. Ключевые направления исследований включают автоматизированные системы управления движением (например, ERTMS), прогнозирование грузопотоков с использованием машинного обучения, мониторинг инфраструктуры с применением предиктивной аналитики и создание цифровых двойников для оптимизации эксплуатационных процессов. Развитие ИТС остается актуальной междисциплинарной задачей, требующей дальнейшего изучения для повышения эффективности и безопасности железнодорожных перевозок.

Исследуемая методологическая и инструментальная база создания ИТС [20] представлена на рисунке 2.1.

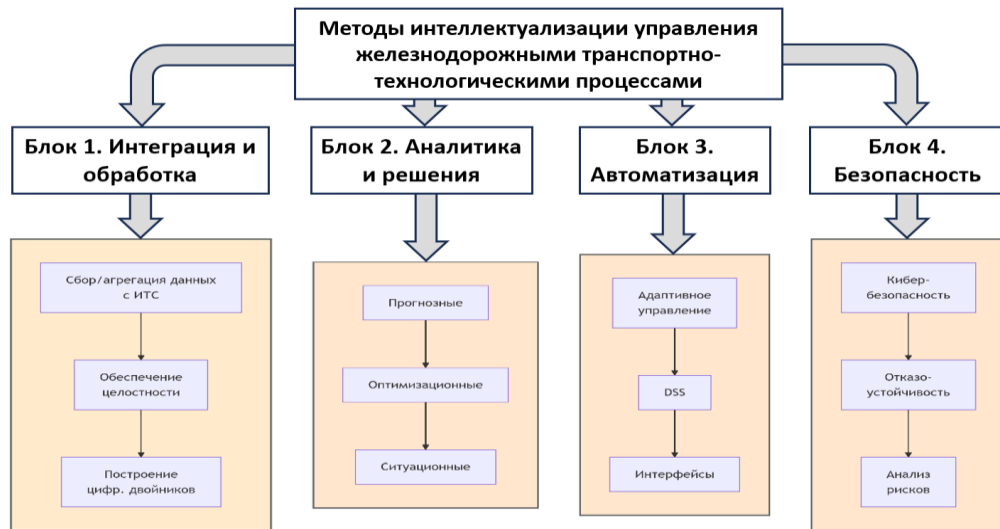


Рисунок 2.1 – Структурно-классификационная схема методов интеллектуализации управления на основе ИТС

Представленная схема визуализирует ключевые группы методов, необходимых для преобразования данных ИТС в эффективные управляющие воздействия. Цифровизация управления прикладными задачами в железнодорожной сфере требует четкой постановки целевых задач, которые определяют направление разработки и внедрения соответствующих моделей и методов.

Ключевые задачи могут быть сформулированы следующим образом:

Задача интеграции и консолидации данных – создание единого информационного пространства путем агрегации разнородных потоков данных от бортовых систем, датчиков инфраструктуры и корпоративных информационных систем в режиме, близком к реальному времени;

Задача аналитического моделирования и прогнозирования – разработка моделей и методов для преобразования собранных данных в оперативные прогнозы (например, состояния инфраструктуры, потребления ресурсов), диагностики аномалий и оценки эффективности технологических процессов;

Задача оптимизации и принятия решений – решение задач оптимизации ключевых операционных параметров (графики движения, планирование ресурсов, распределение мощности) с учетом множества технологических и экономических ограничений.

Задача автоматизации управления – обеспечение автоматической или автоматизированной реализации оптимальных управляющих воздействий в системах управления, включая адаптивное регулирование и поддержку принятия решений диспетчерским персоналом.

Задача обеспечения устойчивости и безопасности – гарантирование киберустойчивости, отказоустойчивости и надежности всей цифровой экосистемы управления на всех этапах работы с данными и исполнения решений.

Перечисленные выше задачи решаются с помощью цифровых блоков методов интеллектуализации управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами:

Блок 1 «Методы интеграции и обработки данных» отвечает на вопрос о том, как формируется единое информационное пространство из разнородных мультимодальных данных ИТС. Методы блока обеспечивают: сбор и агрегацию сырых данных с бортовых систем, инфраструктурных датчиков и корпоративных ИТС; обеспечение целостности (согласованности, синхронности, достоверности) собранных данных; построение цифровых двойников технологических процессов - создание их динамических виртуальных моделей, адекватно отражающих состояние реальной системы и т.п.

Блок 2 «Методы аналитики и принятия решений» работает с подготовленными данными из Блока 1 и предназначены для: прогнозной и диагностической аналитики (предиктивное обслуживание, анализ тенденций); оптимизации ключевых параметров (графиков движения, использования ресурсов); ситуационного анализа для распознавания сложных событий и моделирования сценариев.

Блок 3 «Методы автоматизации и управления» реализует выработанные Блоком 2 решения: адаптивное автоматическое управление системами на основе обратной связи; поддержку принятия решений (DSS) для диспетчерского персонала; организацию интерфейсного взаимодействия "человек-машина" для удаленного контроля и управления.

Блок 4 «Методы обеспечения безопасности и надежности» применяется на всех предыдущих этапах для гарантирования кибербезопасности каналов передачи

и массивов данных; отказоустойчивости и резервирования систем управления; анализа и управления рисками на основе поступающей информации.

Методика аксиоматного моделирования выходит за рамки чисто теоретической формализации, становясь ядром цифровой платформы для интеллектуального управления. Оно обеспечивает необходимую строгость, структурированность и адаптивность моделей, что позволяет создавать эффективные системы поддержки принятия решений для сложных, динамичных и многокритериальных задач управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами. Пример аксиоматной модели железнодорожной станции представлен на рисунке 2.2.

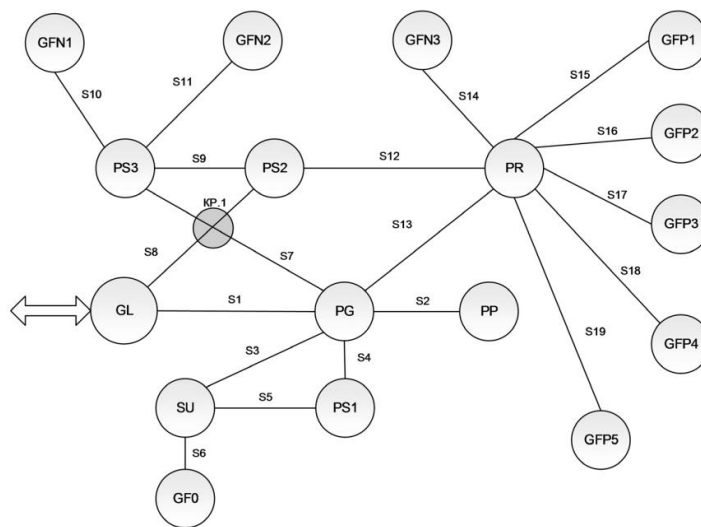


Рисунок 2.2 – Пример аксиоматной модели железнодорожной станции

Таким образом, современные методы интеллектуализации управления железнодорожными процессами, основанные на ИИ, нейросетях и системном анализе, демонстрируют высокую эффективность. Однако их внедрение требует дальнейших исследований, особенно в области адаптации к динамически изменяющимся условиям и интеграции с существующей инфраструктурой.

Разрабатываемые в работе методы логического управления транспортно-технологическими процессами основываются на установленной теории систем парадигмам целенаправленности, сложности, целостности, наблюдаемости, управляемости, устойчивости, адаптации и открытости.

Целенаправленность определяет границы исследуемой системы, ее структурные элементы и реализуется при выборе цели исследования и критериев оценки;

- *сложность* определяет устойчивость связей между составными элементами исследуемых ТТС, которые обеспечивают ее целостность и сохранение свойств [11,33]. Используемые в работе декомпозиции промышленных узлов позволили понизить их сложность до обрабатываемых размеров информации с выделением иерархических структур. Методологической основой здесь выступают теория графов, методы теории информации и имитационного моделирования;

- *целостность* отражает внутреннее единство ТТС, а также ее открытость и способность к адаптации при наличии внешних возмущающих воздействий;

- *наблюдаемость* отражает возможность изучения поведения ТТС непосредственно или косвенно при обработке информации о состоянии ее элементов. Методологический инструментарий парадигмы наблюдаемости составляет теория информации [2,34,50,62,73-75], экономико-математическое программирование [83-88]; методы прогнозирования [89-90];

- *управляемость* определяется возможностью контроля над процессом перевода системы из одного состояния в другое для достижения поставленных целей;

- *устойчивость* характеризует внутреннее свойство системы восстанавливать исходное (близкое к исходному) состояние после какого-нибудь отклоняющего воздействия. Так как данные возмущения имеют информационную оценку, то необходим поиск условий устойчивости ТТС к малым изменениям исходной информации и чувствительности компоновочных решений к изменяющимся технико-технологическим данным;

- *адаптация* предполагает свойство системы сохранять работоспособность при непредвиденных изменениях внешних воздействий;

- *открытость* определяет возможность расширения состава парадигм за счет добавления знаний о предметной области. Открытость системы решена за счет адаптации разработанной методологии при изменении уровней решаемых задач, выборе различных видов транспорта, категорий и сложности объектов.

Тесную связь с рассмотренными выше парадигмами имеет *человеческий фактор* и *фактор неопределенности*. Наличие человека в системе управления размещением и проектированием позволяет использовать его уникальные возможности

классификации, целеустремленности, прогнозирования, озарения в условиях неопределенности условий решаемых задач. Однако существует возможность и проявления неточных знаний об особенностях адекватного отображения системных элементов в силу их многофакторности, недетерминированности, не изученности комплексных воздействий внешних процессов.

2.2 Параметризация технологических связей в мультимодальной транспортной организационно-технической системе

Технологические связи в транспортной системе представляют собой комплекс взаимозависимых процессов и параметров, обеспечивающих эффективное взаимодействие элементов инфраструктуры (станций, путей, сортировочных узлов, терминалов), подвижного состава (локомотивов, вагонов, поездов) и логистических цепочек (взаимодействие с грузоотправителями и другими видами транспорта). Эти связи могут носить как детерминированный характер (жестко регламентированный графиками движения и технологическими процессами), так и стохастический (обусловленный влиянием случайных факторов - задержек, изменений спроса, погодных условий). Параметризация данных связей играет ключевую роль в управлении транспортными процессами, поскольку позволяет формализовать их через систему количественных и качественных показателей, таких как временные интервалы, пропускная способность, загрузка мощностей и экономические параметры и др. [179].

Транспортные системы по характеру технологических связей могут быть классифицированы на унимодальные и мультимодальные. Унимодальные системы, такие как железнодорожный транспорт, характеризуются однородностью используемых транспортных средств и инфраструктуры, что определяет относительную простоту параметризации их технологических связей - в этом случае основное внимание уделяется оптимизации внутренних процессов (графиков движения, загрузки путей, использования подвижного состава). Мультимодальные си-

системы, напротив, предполагают взаимодействие различных видов транспорта (железнодорожного, автомобильного, морского, воздушного), что существенно усложняет процесс параметризации из-за необходимости учета разнородных характеристик каждого вида транспорта, различных нормативных требований и специфики перевалки грузов между видами транспорта. Для унимодальных систем ключевыми параметрами выступают внутренние показатели эффективности (коэффициент использования подвижного состава, пропускная способность участков и др.), тогда как для мультимодальных систем на первый план выходят параметры стыковки различных транспортных модулей (временные интервалы перевалки, совместимость грузовых единиц, синхронизация графиков работы и др.). Особенностью параметризации мультимодальных систем является также необходимость учета дополнительных факторов, таких как таможенные процедуры, различия в стандартах разных видов транспорта и требования грузовладельцев, что требует разработки комплексных моделей и методов управления транспортными потоками.

Теоретические основы параметризации технологических связей в транспортных системах базируются на системном подходе, который рассматривает транспортный процесс как целостный комплекс взаимосвязанных элементов и подпроцессов. В рамках данного подхода выделяются четыре ключевые группы параметров, требующие формализации: временные (интервалы движения, графики обработки составов, технологические окна), пространственные (конфигурация маршрутов, расстояния перевозок, зоны обслуживания), экономические (себестоимость перевозок, показатели эффективности использования ресурсов, тарифная политика) и технологические (пропускная и провозная способность участков, коэффициент использования подвижного состава, уровень загрузки терминалов). Особое значение имеет взаимозависимость этих параметров – например, изменение временных интервалов движения неизбежно влияет на экономические показатели и пропускную способность участков. Современные методы параметризации предусматривают комплексный учет всех групп параметров с применением математического моделирования, что позволяет не только описывать существующие технологические связи, но и оптимизировать их с учетом заданных критериев эффективности.

При этом важнейшей задачей становится обеспечение баланса между различными группами параметров, особенно в условиях изменяющегося спроса на транспортные услуги и ограниченности ресурсов инфраструктуры.

Для параметризации технологических связей в транспортной системе используются различные методы, которые включают четыре основные группы подходов, каждый из которых имеет свою область применения и преимущества. К ним можно отнести аналитические методы, имитационные методы, статистические подходы, интеллектуальные методы [180].

Существующие методы параметризации технологических связей в транспортной системе представлены в таблице 2.1 [181-185].

Таблица 2.1 – Существующие методы и модели параметризации технологических связей в транспортной системе.

№	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 Z – общая стоимость перевозок, которую необходимо минимизировать; 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 T – общее время перемещения (или задержка), которое необходимо минимизировать; x_k – интенсивность потока (например, количество транспортных средств в час) на участке дороги k; v_k – скорость свободного движения на участке k (скорость при отсутствии загруженности); β_k – коэффициент, отражающий влияние загрузки на скорость (чем больше x_k, тем сильнее снижается 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.	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 $T_{\text{обс}}$ – общее время обслуживания груза объемом Q; Q – Объем груза (например, количество контейнеров, тонн или паллет); $u(s)$ – 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 (тарифы, время в пути, комфорт, надежность и т.д.); β_i – коэффициенты модели, которые показывают, насколько сильно каждый фактор влияет на вероятность выбора.	Прогноз грузо- и пассажиропотоков, анализ влияния тарифов, оценка конкуренции видов транспорта
6	Критерий максимизации вывозимого груза	$\max \sum_{j=1}^S x_j \text{ при условиях: } \begin{cases} \sum_{j=1}^S a_{ij} x_j \leq b_i \\ x_j \geq 0 \end{cases}$ где: x_j – объем вывозимого груза j-го типа; a_{ij} – ресурсы на обработку (время, техника); b_i – ограничения (например, рабочие смены персонала ОТИ).	Планирование перевозок в отраслях с фиксированными ресурсами

№	Методы и модели		Расчетная формула	Область применения
7	Имитационная модель	Пропускная способность	$C = \frac{N}{\sum_{i=1}^N T_i} \cdot f(\alpha, \beta)$ где: C - пропускная способность (ед./час); N – количество транспортных единиц (поездов, машин); T_i – время прохождения i-й единицы; $f(\alpha, \beta)$ – корректирующий коэффициент для учета неравномерности (α) и задержек (β).	Оценка пропускной способности станций, узлов, транспортных магистралей с учетом случайных событий
		Время обработки на терминале	$T_{\text{терм}} = \sum_{k=1}^M \left(\frac{V_k}{\mu_k} + W_k \right)$ где: V_k – объем груза k-й категории; μ_k – скорость обработки для категории k; W_k – время ожидания в очереди.	Оптимизация транспортной работы портов, складов, распределительных центров.
8	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.
9	Модель ARIMA		$(1 - \sum \varphi_i L^i)(1 - L)^d Y_t = c + (1 - \sum \theta_i L^i) \varepsilon_t$ где: L - оператор лага; φ, θ - параметры модели; d – порядок дифференцирования.	Прогноз грузо- и пассажиропотока, анализ задержек
10	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.	Балансировка противоречивых целей при планировании транспортной работы
11	Макромодель Гриншилдса		$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j} \right)$ где: v – скорость потока; v_f – свободная скорость; k – скорость потока; k_j – свободная скорость.	Стратегическое планирование, оценка пропускной способности дорог, макроимитация
12	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.	Детальное имитационное моделирование движения, разработка систем адаптивного круиз-контроля и АДС.
13	Модель потоков в сетях (Ford-Fulkerson)		$\max \sum_{s \in S} f_s, \quad \text{при} \quad \sum_i f_{ij} = \sum_k f_{jk} \forall j$ где: f_{ij} – поток по ребру (i, j); S – источники транспортного потока.	Распределение трафика по альтернативным путям, оптимизация потоков.

Теоретической основой параметризации выступает системный подход, выделяющий четыре взаимосвязанные группы параметров: временные, пространственные, экономические и технологические.

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Дополняемость методов, так как не существует универсального метода, пригодного для решения всех задач. Эффективное управление современными транспортными системами требует комбинации различных подходов:

- Аналитические методы (линейное и нелинейное программирование, дифференциальные и интегральные уравнения) обеспечивают точность и теоретическую строгость для решения детерминированных задач оперативного планирования, но обладают низкой адаптивностью к неопределённости.

- Имитационные методы (дискретно-событийное и агентное моделирование) незаменимы для проектирования и тестирования сложных систем, позволяя моделировать критические ситуации и редкие события, однако отличаются высокой ресурсоёмкостью.

- Статистические методы (регрессионный анализ, ARIMA, многокритериальная оптимизация) эффективны для прогнозирования, выявления закономерностей и работы с большими массивами данных, но требуют качественных исходных данных и периодической перекалибровки.

- Интеллектуальные методы (макро- и микромоделирование, модели потоков в сетях, методы на базе ИИ) обеспечивают высочайший уровень адаптивности, способность работать с неполными данными и решать нестандартные задачи в условиях неопределённости, что делает их ключевыми для систем реального времени, но их внедрение требует значительных вычислительных ресурсов, специальных компетенций и преодоления проблем интеграции.

2. Степень интеграции в цифровизация являются наиболее востребованными в задачах интеллектуального управления и цифровизации (ИТС, цифровые двойники, предиктивная аналитика) являются интеллектуальные и имитационные методы, а также адаптивные статистические модели (например, ARIMA). Классические аналитические методы играют роль важных компонентов в гибридных системах и системах поддержки принятия решений.

3. Перспективные направления лежит в плоскости интеграции и создания гибридных подходов: сочетания аналитической строгости с имитационной гибкостью и адаптивностью интеллектуальных систем. Особое значение приобретают:

- Цифровые двойники, где методы параметризации становятся основой для создания виртуальных копий, обеспечивающих предиктивное управление;
- Нечёткое моделирование для работы с качественными показателями и экспертной информацией в условиях неопределённости;
- Аксиоматический подход, который, в связке с параметризацией, позволяет формализовать базовые принципы управления, обеспечивая теоретическую обоснованность практических алгоритмов.

Таким образом, параметризация технологических связей выступает не просто как инструмент описания, но как связующее звено между теоретическими моделями транспортных систем и практическими алгоритмами их интеллектуального управления. Комплексное и взвешенное применение различных методов параметризации с учётом их сильных сторон и ограничений является необходимым условием для проектирования и эксплуатации эффективных, надёжных и адаптивных транспортных систем будущего.

Проведенный анализ методов параметризации создает инструментальную базу для их последующей интеграции в более высокоуровневые формальные системы управления. Таким системообразующим каркасом выступает аксиоматический подход к моделированию, рассмотренный в пункте 2.1.

В контексте данного подхода параметры, формализуемые классическими методами, перестают быть изолированными показателями. Они становятся атрибутами и условиями аксиомат (АМТПП) – формализованных правил, описывающих элементарные транспортно-технологические процессы. Например, временной параметр t_{kr} (время занятия блока) или параметр использования v_{kr} , полученные методами статистики и оптимизации, напрямую встраиваются в нечёткое функциональное представление аксиоматы (формула 2.4):

$$\tilde{A}_{kr} = \left\{ \left(t_{kr} \mid \mu_A(t_{kr}) \right) \right\}, \quad (2.4)$$

где $\mu_A(t_{kr})$ – степень принадлежности времени к данному технологическому блоку, определяемая на основе параметрического анализа.

Данный подход позволяет количественно оценивать транспортные конфликты (ТК), которые в аксиоматной модели формализуются как условия пересечения множеств аксиомат. Например, вероятность возникновения конфликта первого рода, когда двум транспортным процессам требуется одна и та же аксиомата, может быть оценена через параметры интенсивности:

$$P(A_0) = P(AMTPP_1) \cdot P(AMTPP_2), \quad (2.5)$$

где вероятности $P(AMTPP_i)$ определяются на основе параметрических моделей загрузки узлов.

Аппарат аксиоматной параметризации обеспечивает:

Наполнение конкретикой – Привязку абстрактных логических аксиомат к измеряемым величинам – временам, вероятностям, интенсивностям потоков;

Количественное обоснование логики управления – Формализацию условий перехода между состояниями модели и выбора альтернативных сценариев на основе сравнения параметров;

Оценку эффективности – Расчет результирующих показателей (таких как общее время цикла или энтропия организации процесса, позволяющих сравнивать различные варианты комплексов аксиомат.

Следовательно, разрабатываемая аксиоматная модель транспортного объекта опирается на рассмотренный в данном разделе аппарат параметризации. Параметры, рассчитанные с помощью аналитических, статистических и имитационных методов, являются основой для формирования матриц связей инфраструктурных элементов, определения последовательностей аксиомат и оценки их нечётких множеств, что в итоге позволит построить гибкую и адаптивную цифровую модель для интеллектуального управления транспортной работой ОТИ.

2.3 Декомпозиция и синтез параметров цифровизации структур управления транспортно-технологическими процессами

Цифровизация управления интеллектуальной мультимодальной транспортной системой (ИМТС) сопряжена с большим количеством взаимосвязанных технологических процессов. Для эффективного управления такими системами необходим систематизированный подход, позволяющий выявить ключевые управляющие параметры, проводить анализ их взаимовлияния и синтезировать оптимальные управляющие воздействия. Рассмотрим алгоритм анализа и синтеза сценариев управления технологическими процессами в ИМТС [188-189]. Важным этапом является декомпозиция – выделение множества факторов (параметров управления) X , которые характеризуют состояние технологических процессов ИМТС и внешней среды. Данные параметры формируются экспертным путем и образуют вектор (формула 2.6):

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.6)$$

где: x_i – i -й параметр управления технологическим процессом.

Параметры ИМТС x_i представлены в таблице 2.2:

Таблица 2.2 – Параметры ИМТС x_i

№ п/п	Обозначение параметра	Характеристика параметра ИМТС
1	x_1	Пропускная способность путей сообщений и терминалов (автомобильных, железнодорожных, водных)
2	x_2	Показатель использования подвижного состава (вагонов, автомобилей, судов)
3	x_3	Время обработки подвижного состава и груза на терминале (погрузка, выгрузка, складирование, хранение)
4	x_4	Согласованность расписаний взаимодействующих видов транспорта
5	x_5	Надежность работы технического оборудования
6	x_6	Показатели степени цифровизации транспортных процессов (использование IoT, BIM, интеллектуальных систем слежения)
7	x_7	Структура управления и квалификация персонала, обслуживающего технологические процессы
8	x_8	Принципы взаимодействия с внешними контролирующими системами (таможенное оформление, санитарный контроль)

Для работы с подобными множествами необходимо исключить малозначимые параметры и агрегировать сильно коррелированные в интегральные показатели. Это позволяет перейти от множества разрозненных параметров к системе ключевых факторов управления.

Синтез управляющих решений осуществляется по **адаптированному семиэтапному алгоритму**, который начинается с **первого этапа** – формирования перечня параметров управления, оказывающих влияние на процессы системы X (таблица 2.2).

Второй этап представляет собой синтез набора возможных сценариев. На основе экспертного анализа и моделирования разрабатывается набор альтернативных сценариев развития технологической ситуации S_k , где $k = \overline{1, K}$, которые могут классифицироваться как пессимистические, рациональные, оптимистические (таблица 2.3). Сценарии могут различаться и по другим факторам: степень использования цифровых технологий, интеллектуальность систем и т.д.

Таблица 2.3 – Описание сценариев технологической ситуации S_k

№ п/п	Обозначение сценария	Характеристика сценария s_k
1.	s_1 – пессимистичный сценарий	Характеризуется возникновением «узких мест», связанных с ограничением пропускных способностей путей сообщений и терминальной обработке, сбоями в логистической цепочке доставки, перепростоями транспорта общего пользования
2.	s_2 – рациональный (базовый) сценарий	Отражает стабильное функционирование транспортно-логистической системы в рамках установленных нормативов и плановых показателей.
3.	s_3 – оптимистичный сценарий	Предполагает достижение максимальной эффективности, слаженности всех процессов, минимальное время доставки и обработки подвижного состава и грузовых фронтов, полное использование ресурсов.

На **третьем этапе** осуществляется определение связей между параметрами и сценариями. Для каждого сценария S_k определяется, какая комбинация значений параметров N_j (где $N_j \subseteq X$) ведет к его реализации. Устанавливается аналитическая или логическая зависимость (формула 2.7)

$$S_k = f(N_j), \quad (2.7)$$

где: f – оператор управления; $j = 1 \dots n$ – диапазон изменения комбинации параметров N ; N_j – комбинация значений параметров.

На практике оператор f часто представляется в виде матрицы (таблицы) «параметры-сценарии», где для каждой комбинации значений N_j экспертным или расчетным путем проставляется вероятность или оценка достижимости того или иного сценария S_k .

Четвертый этап представляет собой классификацию параметров управления.

Все параметры N_j делятся на три класса в зависимости от степени возможности управления ими:

Пассивные параметры (N_j^a): факторы, которые либо развиваются эволюционно по своим законам, либо являются случайными непредсказуемыми возмущениями. Управляющее воздействие на них со стороны центра управления МТС крайне ограничено или невозможно (например, погодные условия, макроэкономическая конъюнктура, изменение законодательства).

Активные (управляемые) параметры (N_j^a): параметры, которые могут быть напрямую и оперативно изменены управляющим органом системы для корректировки работы МТС (например, распределение подвижного состава, назначение расписания, перераспределение трудовых ресурсов между терминалами).

Ограниченно управляемые параметры (N_j^o): факторы, на которые можно повлиять, но в ограниченных пределах, с запаздыванием по времени или при значительных затратах ресурсов. Как правило, они сильно коррелированы с другими параметрами, что сужает возможности управления (например, физический и моральный износ оборудования, требующий длительной модернизации, или повышение квалификации персонала).

На **пятом этапе** представлен расчет целевых значений параметров. Для выбранного в качестве целевого желаемого сценария (например, S_3 – оптимистичного) определяется набор идеальных значений управляемых параметров N_j^* , теоретически обеспечивающих его реализацию. Этот расчет проводится на основе обращения зависимости, заданной оператором f (формула 2.8):

$$N_j^* = f^{-1}(S_K^*), \quad (2.8)$$

где: f – оператор управления;

N_j^* – набор идеальных значений управляемых параметров;

S_K^* – целевой сценарий управления.

Шестой этап представляет собой поиск субоптимального (наилучшего достижимого) решения. На практике достичь идеального набора N_j^* часто невозможно из-за ограничений, накладываемых пассивными и ограниченно управляемыми параметрами. Поэтому осуществляется поиск такого достижимого набора параметров N_j^δ из множества возможных M , который был бы максимально близок к целевому N_j^* . Это решается задачей минимизации специальной меры близости d (формула 2.9):

$$N_j^\delta = \arg_j \min d(N_j, N_j^*), \quad (2.9)$$

где: N_j – комбинация значений параметров;

N_j^* – набор идеальных значений управляемых параметров.

Учитывая разнородность и разную значимость параметров (например, время и стоимость), в качестве меры d нельзя использовать стандартные евклидовы расстояния маршрутов транспортной работы из-за их усредненности. Требуется разработка взвешенной метрики, учитывающей приоритеты управления ИМТС.

Седьмой этап представляет собой выработку и реализацию управляющих воздействий. Найденный субоптимальный набор значений N_j^δ трансформируется в конкретные управленческие решения, директивы и регламенты для различных уровней управления МТС. Это могут быть скорректированные графики движения, планы ремонта оборудования, программы обучения персонала или изменения в технологических картах обработки грузов.

Таким образом, последовательная реализация семи этапов алгоритма позволяет провести системную декомпозицию множества параметров управления X и осуществить на этой основе синтез эффективных управляющих воздей-

ствий. Данный метод обеспечивает переход к упреждающему управлению, ориентированному на реализацию наилучшего из возможных сценариев развития технологических процессов в интеллектуальной мультимодальной транспортной системе, что повышает ее устойчивость, гибкость и общую эффективность.

Итоговый алгоритм декомпозиции и синтеза параметров управления технологическими процессами в мультимодальной транспортной системе представлен на рисунке 2.3. Основная последовательность этапов (центральная вертикальная цепь) представлена в таблице 2.4:

Таблица 2.4 – 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. Для каждого сценария S_k определяется, какая комбинация значений параметров N_j (где $N_j \subseteq X$) ведет к его реализации, где f – оператор управления; $j = \overline{1..n}$ – диапазон изменения комбинации параметров N ; N_j – комбинация значений параметров
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 идеальных значений параметров N_j^* для целевого сценария S_k . Расчет проводится на основе обращения зависимости, заданной оператором f по формуле $N_j^* = f^{-1}(S_k^*)$, где f – оператор управления; N_j^* – набор идеальных значений управляемых параметров; 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 U_i (корректированные технологические карты и графики, планы и этапы выполнения работ, программы и стратегии развития и т.п.)

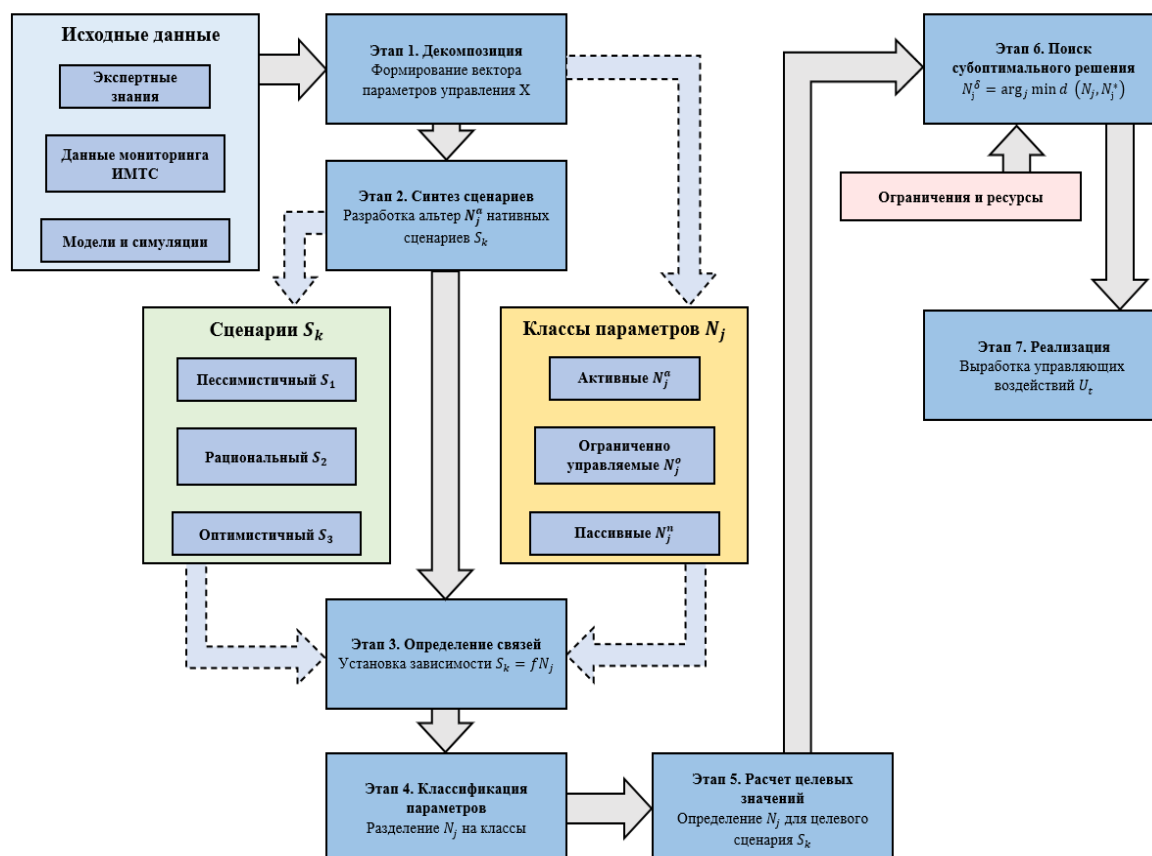


Рисунок 2.3 – Алгоритм декомпозиции и синтеза параметров управления технологическими процессами в мультимодальной транспортной системе

Предложенный подход позволяет перейти от реактивного управления (по факту возникновения проблем) к упреждающему, основанному на прогнозировании сценариев и заблаговременной корректировке управляемых параметров. Это повышает гибкость, надежность и эффективность ИМТС в условиях неопределенности развития и анализа множества взаимосвязанных параметров.

2.4 Нормативное обеспечение разработки и выбора систем управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на принципах цифровизации и интеллектуализации

Разработка, внедрение и эксплуатация интеллектуальных систем управления транспортом на критически важной инфраструктуре, такой как железнодорожный транспорт, невозможна без строгого соответствия установленной

нормативно-правовой базе. Нормативное обеспечение формирует каркас, определяющий требования к безопасности, надежности, совместимости и информационной безопасности систем. Его анализ задает обязательные к выполнению исходные требования, на которых строится вся архитектура интеллектуальных решений.

Фундаментом для создания интеллектуальных транспортных систем являются стандарты, устанавливающие единую терминологию и базовые принципы. Например, к ним можно отнести ГОСТ 2.051-2013 «Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения [192]; ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения» [193]; Отраслевые стандарты (ОСТ): ОСТ 32.1-2002 «Системы автоматизации и телемеханики на железнодорожном транспорте. Термины и определения»; ГОСТ Р 43.0.5-2009 «Информационное обеспечение техники и операторской деятельности. Процессы обработки информации. Общие положения») [194] и др.

Если фундаментальные и общетехнические стандарты создают статичную основу, то динамика функционирования и взаимодействия элементов железнодорожной инфраструктуры обеспечивается документами более высокого уровня управления — Едиными технологическими процессами (ЕТП). Именно ЕТП выступают тем связующим звеном, которое переводит требования безопасности и совместимости в плоскость конкретных операционных процедур.

ЕТП представляет собой согласованный сторонами регламент, определяющий систему организации движения, порядок обработки вагонов и составов, а также технологию взаимодействия перевозчика, владельца инфраструктуры и контрагентов. В условиях цифровизации ЕТП приобретает новое значение, становясь не просто статическим документом, а основой для формализации требований к интеллектуальным системам управления.

В контексте разработки систем управления на принципах интеллектуализации анализ ЕТП позволяет выделить ключевые объекты для автоматизации и

цифрового моделирования. Методология работы с ЕТП включает в себя следующие аспекты:

1. Анализ существующих технологических процессов. Первым этапом является декомпозиция операций, зафиксированных в ЕТП (прием/сдача грузов, маневровая работа, подача и уборка вагонов, погрузочно-разгрузочные работы). Это позволяет идентифицировать "узкие места", циклы ожидания и операции, потенциально реализуемые в автоматическом режиме.

2. Разработка (актуализация) технологических процессов под задачи цифровизации. Внедрение интеллектуальных систем требует пересмотра классических ЕТП. Как показывает практика, корректировка ЕТП осуществляется в порядке, аналогичном порядку, установленному для его разработки. Это подразумевает создание новых или адаптацию существующих технологических карт, учитывающих:

- Применение бортовых микропроцессорных систем и средств диагностики;

- Использование автоматизированных систем управления (например, АС ЕТП, КСАУ СП, АСУ-Д), которые позволяют перейти от бумажных регламентов к цифровым моделям взаимодействия;

- Внедрение сценарного подхода для автоматического (беспилотного) управления движением, как это прорабатывается на Московском центральном кольце, где ЕТП нормирует функционирование систем и действия участников в различных ситуациях.

Помимо организационно-технологических регламентов, ключевую роль играют нормативы на выполнение технологических процессов. Они устанавливают количественные и качественные показатели, которым должны соответствовать как традиционные, так и интеллектуальные системы управления. К таким нормативам относятся:

- Нормы времени на выполнение маневровых и технологических операций.
- Нормативы межремонтных пробегов и простоев в ожидании обработки.

- Технические нормативы на использование погрузочно-разгрузочных механизмов и устройств.

Важно отметить, что в современных условиях наблюдается тенденция к консолидации множества регламентирующих документов в рамках ЕТП. Для повышения эффективности перевозочного процесса разрабатываются комплексные ЕТП, увязывающие в единое целое технологию работы станций, путей необщего пользования и даже смежных видов транспорта (например, в транспортных узлах «железная дорога – порт – водный транспорт»).

Таким образом, нормативное обеспечение разработки и выбора интеллектуальных систем управления представляет собой иерархическую структуру. На верхнем уровне находятся федеральные законы, задающие правовые рамки. Средний уровень формируют стандарты (ГОСТ, ОСТ), унифицирующие терминологию и технические требования. Базисом же для непосредственного проектирования и внедрения цифровых решений служат Единые технологические процессы и нормативы на них, так как именно они формализуют ту предметную область, в которой предстоит функционировать интеллектуальной системе управления.

Нормативная база включает также в себя стратегические документы, задающие вектор развития: Транспортная стратегия РФ [215]; Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ до 2030 г. [195]; Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 г. [196] и др.

Также к нормативному обеспечению разработки и обоснования выбора систем управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на принципах цифровизации и интеллектуализации можно отнести Своды правил (СП) и строительные нормы и правила (СНиП). Например, СНиП 2.05.07-91 «Промышленный транспорт» [197]; СП 238.1326000.2015 «Системы железнодорожной автоматики и телемеханики. Правила проектирования» [198]; СП 131.13330.2020 «Сети связи зданий и сооружений. Основные положения проектирования» [199] и др.

Перечень основных документов нормативно-правового обеспечения интеллектуальных систем управления на железнодорожном транспорте представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Нормативно-правовое обеспечение цифровизации транспортно-технологических процессов

№ п/п	Уровень и тип документа	Ключевые документы	Основное назначение и роль в разработке ИТС
1	Базовые стандарты (ГОСТ, ОСТ)	• ГОСТ 2.051-2013 • ГОСТ 34.003-90 • ОСТ 32.1-2002 • ГОСТ Р 43.0.5-2009	Установление единой терминологии и базовых принципов. • Определение статуса электронных документов (основа цифрового документооборота). • Закрепление ключевых понятий (АСУ, АС). • Конкретизация отраслевых терминов ("станция", "перегон" и т.п.). • Косвенное определение "интеллекта" системы через требования к функциям: адаптивность, самообучение, прогнозирование.
2	Стратегические документы	• Транспортная стратегия РФ • Стратегия развития ж.-д. транспорта до 2030 г. • Национальная стратегия развития ИИ до 2030 г.	Формирование нормативного запроса и задание вектора развития. • Определение целей: повышение пропускной способности, безопасность, качество услуг. • Прямое указание на необходимость цифровой трансформации и внедрения интеллектуальных систем ("Цифровая железная дорога"). • Создание рамок для применения ИИ-технологий в критических инфраструктурах.
3	Практическая реализация в сводах правил (СП) и СНИПах	• СНИП 2.05.07-91 • СП 238.1326000.2015 • СП 131.13330.2020 • СП 119.13330.2024	Регламентация проектирования, строительства и оснащения объектов инфраструктуры (физическая основа ИСУ). • Определение требований к надежности, безопасности

Принципы нормативной базы интегрируются в процесс аксиоматического системотехнического моделирования, рассматриваемого в диссертации, согласно последовательности:

1. **Нормативные документы как источник аксиомат** формируют набор обязательных норм (А-Норм) для проектируемой системы. Например: *А-Норм1*: Система должна обеспечивать 99,99 % времени безотказной работы (следуя из требований к надежности в СП); *А-Норм2*: Алгоритмы принятия решений должны быть документированы и верифицируемы (требование к инфор-

мационному обеспечению и безопасности); *А-Норм3*: Система должна использовать единые отраслевые протоколы обмена данными (требование ГОСТ по совместимости).

2. Обоснование выбора конкретной архитектуры, технологий ИТС (включая алгоритмы ИИ) и поставщиков должен осуществляться через призму соответствия этим нормам.

3. Стратегии развития аксиомат задает нормы не столько для текущего состояния системы, но и для ее эволюции (масштабируемость, возможность интеграции с будущими цифровыми платформами).

Таким образом, нормативное обеспечение представляет собой целостную систему требований, формирующую исходные условия (аксиомы) для проектирования интеллектуальных систем управления транспортным производством. Его анализ является критически важным этапом, обеспечивающим легитимность, безопасность и практическую реализуемость предлагаемых методов интеллектуализации. Соответствие нормам является не ограничивающим фактором, а основой для построения крепких, надежных и эффективных систем, интегрированных в национальную транспортную экосистему.

2.5 Развитие критериев оценки степени эффективности цифровизации систем управления железнодорожным транспортным производством

Эффективное функционирование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на железнодорожном транспорте невозможно без адекватного аппарата оценки их эффективности. Традиционные критерии, ориентированные на оценку детерминированных и статических процессов, оказываются недостаточными для систем, обладающих свойствами адаптивности, самообучения и принятия решений в условиях неопределенности.

Для методологического обоснования необходимости формирования новой системы критериев целесообразно провести структурированный анализ существующего подхода. В качестве инструмента такого анализа применяется

диаграмма Исикавы (рисунок 2.4), которая позволяет систематизировать ключевые причины несоответствия традиционных критериев современным требованиям цифровизации управления ИТС.



Рисунок 2.4 Анализ недостатков существующей системы критериев оценки цифровизации систем управления на транспорте

Развитие системы критериев оценки эффективности является неотъемлемой частью процесса интеллектуализации управления на железнодорожном транспорте, поскольку именно критериальная база определяет направленность и качество принимаемых управленческих решений. Предложенный подход, основанный на дополнении традиционных показателей группами когнитивных, оперативных и системно-интеграционных критериев, позволяет перейти от оценки исключительно результатов деятельности к оценке потенциала и качества интеллектуального процесса управления. Такой сдвиг акцентов даёт возможность учитывать не только конечные производственные показатели, но и способность системы к обучению, адаптации и накоплению опыта, что особенно важно в условиях роста сложности транспортных задач.

Это создает теоретическую основу для объективного сравнения различных архитектур интеллектуальных транспортных систем, обоснования инвестиций в их разработку и оценки реальной эффективности их внедрения в транспортно-технологические процессы.

Рассмотрим критерии оценки цифровизации управляющих процессов на транспорте, разработанные в рамках исследования:

1 - уровень цифровизации процессов управления

$$A = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (W_i \cdot d_i)}{\sum_{i=1}^N (W_i)} \right) \cdot 100 \%, \quad (2.10)$$

где: W_i — весовой коэффициент (важность) i -го процесса управления. Оценить важность каждого процесса для системы можно экспертным методом или на основе статистических данных; d_i — степень автоматизации i -го процесса управления; N - общее количество процессов управления в системе.

Данная формула вычисляет средневзвешенный уровень автоматизации всех процессов управления в системе. Она учитывает, как важность каждого процесса, так и степень его автоматизации. Весовой коэффициент W_i отражает значимость каждого процесса для функционирования системы. Чем выше W_i , тем более важным считается процесс. Степень автоматизации d_i , оценивает, насколько автоматизирован конкретный процесс. Принимает значения от 0 до 1: $d_i = 0$ – процесс полностью ручной, $d_i = 1$ – процесс полностью автоматизирован. Промежуточные значения отражают частичную автоматизацию. Числитель $\sum_{i=1}^N (W_i \cdot d_i)$ отражает совокупный вклад автоматизированных процессов, учитывая их важность. Знаменатель $\sum_{i=1}^N (W_i)$ - сумма всех весовых коэффициентов, обеспечивает нормализацию показателя, чтобы итоговый уровень автоматизации был в процентах.

Пример расчета. Предположим, что в транспортной системе выполняется 5 процессов управления со следующими характеристиками:

Таблица 2.6 – Характеристики процессов управления транспортной системы

Процесс (i)	Важность (W_i)	Степень автоматизации (d_i)
1	5	1.0
2	3	0.8
3	4	0.5
4	2	0.0
5	1	0.3

Шаг 1: Вычисляем числитель

$$\sum_{i=1}^N (W_i \cdot d_i) = (5 \cdot 1.0) + (3 \cdot 0.8) + (4 \cdot 0.5) + (2 \cdot 0.0) + (1 \cdot 0.3) = 9.7$$

Шаг 2: Вычисляем знаменатель

$$\sum_{i=1}^N (W_i) = 5 + 3 + 4 + 2 + 1 = 15$$

Шаг 3: Вычисляем уровень автоматизации системы

$$A = (\sum_{i=1}^N (W_i \cdot d_i) / \sum_{i=1}^N (W_i)) \times 100\% \approx 64,67\%$$

Если важный процесс (например, с $W_i = 5$) имеет низкую степень автоматизации (например, $d_i = 0,2$), это может быть сигналом к необходимости инвестирования в автоматизацию данного процесса для повышения общего уровня эффективности системы. Данная формула помогает определить текущий статус системы и наметить пути для ее дальнейшего развития и совершенствования.

2 – степень использования искусственного интеллекта аналитики данных. Предлагается следующая многосоставная формула, опирающаяся на принципы многокритериального анализа, учитывающая различные аспекты использования ИИ и цифровизации аналитики данных, включая технические, эксплуатационные и результативные показатели, а также позволяет адаптировать модель под особенности конкретной транспортной системы путем настройки экспонент:

$$I = \left(\left(\frac{N_{AI}}{N_{total}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{D_{AI}}{D_{total}} \right)^\beta \cdot R_{automation}^\gamma \cdot E_{efficiency}^\delta \cdot S_{safety}^\varepsilon \right) \cdot 100 \% , \quad (2.11)$$

где: N_{AI} – количество компонентов или подсистем, оснащенных ИИ; N_{total} – общее количество компонентов или подсистем в ИТС; D_{AI} – объем данных, обрабатываемых с помощью аналитики данных и ИИ (ГБ); D_{total} – общий

объем данных, генерируемых системой (ГБ); $R_{\text{automation}}$ – уровень автоматизации процессов в системе (доля автоматизированных процессов от общего числа, вид коэффициента от 0 до 1, где 0 означает полное отсутствие автоматизации, а 1 – полностью автоматизированная система); $E_{\text{efficiency}}$ – коэффициент повышения эффективности системы благодаря внедрению ИИ и аналитики данных; S_{safety} – коэффициент улучшения показателей безопасности движения из-за использования ИИ; $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ — весовые показатели (экспоненты), отражающие значимость каждого фактора в общей оценке степени использования ИИ и аналитики данных. Значения экспонент можно определить экспертным путем или на основе статистического анализа данных системы.

Пример расчета. Предположим, что определенная ИТС имеет следующие показатели: $N_{\text{AI}} = 50$; $N_{\text{total}} = 100$; $D_{\text{AI}} = 800$ ГБ; $D_{\text{total}} = 1000$ ГБ; $R_{\text{automation}} = 0.7$ (70 % процессов автоматизировано); $E_{\text{efficiency}} = 1.2$ (эффективность повысилась на 20 %); $S_{\text{safety}} = 1,5$ (количество инцидентов снизилось на 50 %); $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 1, \delta = 1, \varepsilon = 1$.

$$\text{Тогда } I = \left(\frac{50}{100}\right)^1 \cdot \left(\frac{800}{1000}\right)^{\beta 1} \cdot 0,7^1 \cdot 1,2^1 \cdot 1,5^1 \cdot 100 \% \approx 50 \%.$$

Это свидетельствует о средней степени использования ИИ и цифровизации в данной Интеллектуальной транспортной системе.

3. Показатели для формирования интегральной формулы оценки

Для повышения уровня цифровизации систем управления железнодорожным транспортным производством организации необходимо достижения максимума интегрального показателя.

3.1 Интегрированность (G) информационных и управляющих систем (ИУС)

Коэффициент, характеризующий интегрированность (G) информационных и управляющих систем (ИУС) в транспортной работе к общему количеству перерабатываемых грузо- или вагонопотоков в системе, равен

$$G = \frac{I_{\text{ИУС}}^{\text{факт}}}{N_{\text{сп}}^{\text{факт}}}, \quad (2.12)$$

где $I_{\text{ИУС}}^{\text{факт}}$ – количество используемых интегрированных информационных и управляющих систем в транспортное производство за сутки; $N_{\text{ср}}^{\text{факт}}$ – среднее количество вагонов, перерабатываемое подсистемой за сутки.

3.2 Адаптивность и гибкость системы управления (F)

Параметр зависит от принятого варианта управления транспортной работой, временных характеристик и количества аксиомат. Следовательно, систему управления характеризует количество аксиомат и суммарное время выполнения технологических операций в фазах аксиомат, приходящихся на один переработанный вагон (1 т груза):

$$F = \frac{N_{\text{АСТТП}}^{\text{факт}} \cdot t_{\text{АСТТП}}}{N_{\text{ср}}^{\text{факт}}}, \quad (2.13)$$

3.3 Эффективность прогнозирования и планирования (P)

Параметр характеризует степень расхождения фактических результатов управления реальной транспортной работой и прогнозных, выдаваемых цифровой моделью транспортного производства, по известному набору аксиомат. Для оценки может использоваться отношения времен простоя подвижного состава (оборот транспортного средства в системе) фактический и прогнозируемый.

$$P = \frac{\theta_{\text{ИУС}}^{\text{факт}}}{\theta_{\text{ИУС}}^{\text{прогноз}}}, \quad (2.14)$$

3.4 Уровень участия человека в управлении системой (H)

Параметр характеризует степень участия ЛПР в управлении транспортной работой в течении смены до и после внедрения интеллектуальной системы управления. Для оценки может использоваться время принятия решений ЛПР до и после внедрения системы интеллектуального управления:

$$H = \frac{T_{\text{ЛПР}}^{\text{факт}}}{T_{\text{ЛПР}}^{\text{ИУС}}}, \quad (2.15)$$

3.5 Экономическая эффективность (E) цифровой системы управления

Данный параметр оценивает степень эффективности вложения денежных средств во внедрение цифровой системы управления. Показатель равен

$$E^{1\text{ ваз}} = \frac{\sum_{k=1}^z \sum_{i=1}^n (\mathcal{E}_{ki} + E_n \cdot K_{ki})}{N_{cp}}, \text{ руб./ваг}, \quad (2.16)$$

где: $\mathcal{E}_{ki}$ – эксплуатационные расхода по k -элементу i -й фазы АСТТП; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; K_{ki} – капитальные затраты на k -й элемент i -й фазы АСТТП; z – количество элементов в i -й фазе цифрового управления; N_{cp} – среднее количество подвижного состава, перерабатываемое в цифровой системе управления, ваг.

Для перехода к интегрированному показателю оценки вводятся безразмерные значения параметров по формулам:

$$G' = \frac{G}{G_{opt}}; F' = \frac{F}{F_{opt}}; P' = \frac{P}{P_{opt}}; H' = \frac{H}{H_{opt}}; E' = \frac{E^{1\text{ ваз}}}{E_{opt}^{1\text{ ваз}}}. \quad (2.17)$$

В числителе принимаются параметры анализируемого варианта подсистемы, в знаменателе – эталонные значения параметров, определенные, например, методом экспертных значений. Неодинаковая значимость параметров учитывается введением весовых коэффициентов, показывающих вес данного параметра в общей сумме.

$$INT_{ису} = 0,1 \cdot G' + 0,2 \cdot F' + 0,2 \cdot P' + 0,1 \cdot H' + 0,4 \cdot E' \rightarrow \max. \quad (2.18)$$

Данные показатели и формулы позволяют всесторонне оценить степень интеллектуализации транспортной системы, и могут быть адаптированы под конкретные условия и доступные данные.

2.6 Выводы по главе

Проведенное во второй главе исследование теоретических основ цифровизации в методах решения прикладных задач управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами позволило сформулировать следующие выводы:

1. Анализ научных знаний показал, что интеллектуализация управления железнодорожными транспортными процессами эволюционирует от локальной автоматизации отдельных операций к созданию комплексных киберфизических

систем. Современный тренд заключается в интеграции технологий больших данных, искусственного интеллекта, интернета вещей (IoT) и цифровых двойников, что позволяет переходить от реактивного к предиктивному и адаптивному управлению.

2. Параметризация технологических связей является фундаментальной основой для формализации и цифрового описания организационно-технической системы транспорта. Установлено, что эффективная параметризация должна охватывать не только технико-эксплуатационные показатели, но и логистические, экономические, ресурсные и временные параметры, формируя тем самым многомерное пространство состояний системы.

3. Метод декомпозиции и синтеза параметров управления для мультимодальной транспортной системы признан необходимым инструментом для преодоления мер сложности. Декомпозиция позволяет разделить глобальную задачу управления на иерархические, взаимосвязанные подзадачи (уровень инфраструктуры, подвижного состава, перевозочного процесса, логистики). Последующий синтез, основанный на цифровых платформах и единых стандартах данных, обеспечивает согласованность решений и достижение общесистемных целей.

4. Нормативно-правовое обеспечение выступает критическим фактором успеха цифровой трансформации. Разработка и выбор систем управления должны базироваться на гармонизированной системе стандартов, регламентирующих как технические аспекты (интерфейсы, протоколы, кибербезопасность), так и методологические (процессы жизненного цикла цифровых систем, оценка их зрелости).

5. Критериальная база для оценки эффективности цифровизации требует развития и перехода от традиционных показателей (коэффициент использования вагонного парка, оборот вагона и т.п.) к многокритериальной системе. Новая система должна включать: операционно-технологические критерии (точность прогнозирования, гибкость реакции на нарушения, уровень автоматизации решений); экономические критерии (окупаемость цифровых инвестиций, снижение ресурсоемкости); качественные и системные критерии (надежность и

отказоустойчивость цифрового контура, скорость обмена данными, уровень цифровой зрелости процессов, синергетический эффект от интеграции);

6. Теоретическим ядром цифровизации прикладных задач управления является создание целостной цифровой модели транспортно-технологических процессов, которая служит связующим звеном между параметризацией, декомпозицией, нормативными требованиями и критериями эффективности. Эта модель, функционирующая на принципах интеллектуализации, становится основным инструментом для имитационного моделирования, оптимизации, поддержки принятия решений и, в перспективе, автономного управления.

Таким образом, теоретические основы, рассмотренные в главе, формируют комплексный концептуальный каркас для цифровой трансформации управления на железнодорожном транспорте. Они задают принципы формализации сложных процессов, определяют требования к системам и методам их построения, а также задают вектор для разработки адекватных измерителей эффективности внедрения цифровых решений, что является необходимой базой для дальнейшего практического исследования и разработки конкретных прикладных инструментов и алгоритмов. Развитие цифровизации на транспорте на принципах аксиоматического моделирования является перспективным направлением углублённой формализации управления транспортно-технологическими процессами. Аксиоматический подход позволяет формализовать сложные, многокомпонентные процессы взаимодействия инфраструктурных объектов через систему логически связанных алгоритмических последовательностей - аксиомат. Несмотря на наличие опыта применения, данное научное направление остаётся малоизученным в части интеграции аксиоматики с современными инструментами искусственного интеллекта (рекуррентные нейронные сети, теория нечетких множеств, теория активных систем и др.), что позволит перейти от статических моделей к динамическим, адаптивным и самообучающимся системам поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределённости и конфликтов ресурсов.

3 РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПРИНЦИПАХ ЦИФРОВОГО АКСИОМАТНОГО СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Методологические основы цифрового аксиоматного моделирования транспортной работы

Известно, что аксиомата – это алгоритм, представляющий собой набор определенных действий, связанных между собой устойчивой логикой последовательности выполнения транспортных событий и обеспечивающий в результате выполнение определенного процесса [200]. Массив аксиомат, включающий логические группы задач, поставленных перед объектом транспортной инфраструктуры, называется аксиоматной моделью транспортного объекта (АМТО). Аксиоматной моделью высокого уровня можно назвать такую модель, которая использует принципы машинного обучения и теории нечетких множеств. Аксиоматное моделирование предназначено для анализа состоятельности проектных решений, оценки последствий предпринимаемых действий, может быть использована для диагностики аварийных режимов и ситуаций.

Метод управления железнодорожным транспортным производством на принципах аксиоматики – метод аксиоматики станционных транспортно-технологических процессов (АСТТП) [201], представляющий собой логическую спецификацию транспортных процессов, событий и структур в исполнимом логическом языке. Исполнение этой спецификации дает логическую модель (прототип) процесса или структуры станции (информационная, инфраструктурная, событийная и т.п.).

Первоначально аксиоматное моделирование направлено на оптимизацию временных технологических параметров транспортного инфраструктурного объекта.

Спецификация логической модели (прототипа) транспортного объекта задается формулами вида $\forall \bar{x}(\varphi(\bar{x}) \rightarrow \psi(\bar{x}))$, где $\bar{x}$ – вектор переменных параметров, $\varphi(\bar{x})$ – конъюнкция отношений (предикатов), равенств термов или их отрицаний, $\psi(\bar{x})$ – конъюнкция предикатов и термов, рассматриваемых как определение отношения или функции в логической модели.

Одним из основных методов интерпретации аксиоматной модели является модельная схема транспортного объекта [202] – метод формирования логической схемы транспортного объекта для формализации управляющих воздействий и проведения экспериментов по вариантам организации транспортной работы при различных степенях загрузки объектов и распределении местного грузопотока.

Необходимость комплексного развития методов аксиоматного моделирования обусловлена ограничениями традиционных методов моделирования, проблемами с масштабируемостью и адаптивностью. Аксиоматное моделирование в своем «базовом» формате также обладает выраженной жесткостью описываемых моделей, что проявляется в недостаточной адаптации системы к изменениям [203, 204]. Комплексно развивающаяся «плеяда» интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на транспорте также бросает новые вызовы методам аксиоматного моделирования – усложнение технологий и кратное увеличение объемов данных транспортной работы требует все более гибких интеллектуальных подходов.

Кроме того, развитие метода может быть направлено на создание гибридных моделей, сочетающих аксиоматический подход с имитационным и агентным моделированием. Такой синтез позволит учесть как фундаментальные законы функционирования транспортных систем, так и индивидуальное поведение элементов системы. Это обеспечит более глубокое понимание процессов и повысит точность прогнозирования.

Развитие метода также способствует созданию единой цифровой платформы для управления перевозками, где аксиоматические модели будут взаимодействовать с системами мониторинга, планирования и прогнозирования.

Это обеспечит сквозную цифровизацию процессов и усилит синергетический эффект от применения различных интеллектуальных технологий [205]. В итоге, это приведёт к повышению качества услуг, оптимизации затрат и укреплению позиций железнодорожного транспорта на рынке перевозок. SWOT-анализ перспектив развития аксиоматного моделирования транспортных процессов представлен на рисунке 3.1.

Преимущества (S)	Недостатки (W)
- Применение новых принципов построения систем поддержки принятия решений на основе нечеткой логики - Повышение уровня эффективности эксплуатации транспортно-технологических систем за счет многовариантности решений - Комплексное повышение степени цифровой трансформации транспортной отрасли	- Необходимость повышения уровня цифровой компетенции работников транспорта - Недостаточно полная технологическая и нормативная база транспортных объектов
Возможности (O)	Угрозы (Т)
- Развитие систем автоматизации планирования перевозочного процесса на нейронечетких принципах - Создание универсальной системы интеллектуальной поддержки принятия решений - Конкурентные преимущества по сравнению с другим программным обеспечением	- Необходимость учитывать непредвиденные и форс-мажорные ситуации в транспортно-логистической цепи - Меняющаяся конъюнктура транспортного рынка

Рисунок 3.1 SWOT-анализ перспектив развития аксиоматного моделирования [206].

В зависимости от поставленных задач, можно создавать аксиоматную модель, в принципе, любого объекта транспортной инфраструктуры, логистического грузового терминала, порта, железнодорожной станции, мультимодальной транспортной системы узла, так как сочетание методов математического моделирования с методами интеллектуализации транспортных процессов позволяет проводить эффективный анализ, структурирование и дополнение информации для управления логистическими процессами транспортных систем. Это также способствует созданию последовательности решения задачи управления, включающей технологические алгоритмы, логику моделей и

инструменты принятия решений в условиях сложноформализуемых параметров [207] (рисунок 3.2.).

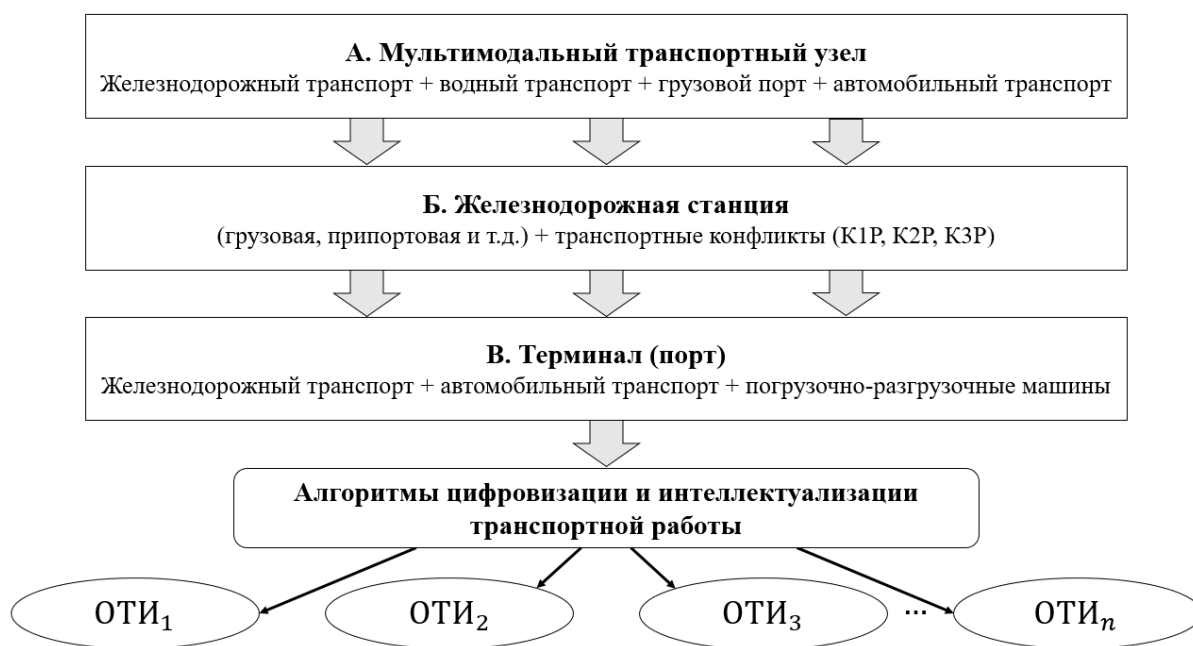


Рисунок 3.2 Последовательность решения задачи управления транспортно-технологическими процессами на принципах аксиоматного моделирования

Постановка задачи: в ТТС при известных показателях транспортного производства необходимо таким образом организовать технологическое управление, чтобы параметры транспортных процессов в условиях нечеткого системотехнического взаимодействия и возможных транспортных конфликтах, были наиболее рациональными. Зависимость имеет вид:

$$M^* = \arg \min_{m \in M} \left(\sum_{c \in C} w_c \cdot P_c(t + \tau) \cdot I[c \in m] + \lambda \cdot T(\text{АСТТП}_m) \right), \quad (3.1)$$

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 - весовой коэффициент значимости c -го конфликта, определяемый на основе экономических потерь от простоев и сбоев; $P_c(t + \tau)$ - прогнозируемая верхним уровнем РНС вероятность возникновения конфликта c на горизонте упреждения τ ; $\mathbb{I}[c \in$

$m]$ - индикаторная функция, принимающая значение 1, если при реализации варианта m конфликт с потенциально возможен, и 0 в противном случае; λ - коэффициент регуляризации, обеспечивающий баланс между стремлением минимизировать риски конфликтов и сократить время выполнения технологических операций; $T(\text{АСТТП}_m)$ - прогнозное время выполнения аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов при выборе варианта m . Решением M^* является такой вариант управления, который доставляет минимум взвешенной сумме ожидаемых потерь от конфликтов и временных затрат, что соответствует принципу проактивного (упреждающего) управления в условиях нечеткой и динамически изменяющейся оперативной обстановки.

В условиях сложноформализуемых факторов управления рассмотрена постановка задачи с позиций нечеткой временной аксиоматики, где s_k - параметры транспортных процессов ($k = 1, 2, \dots, v$); h_r - количество управляющих воздействий по варианту транспортной работы ($r = 1, 2, \dots, z$); $\tilde{A}_{kr} = \{(t_{kr} | \mu_{\tilde{A}}(t_{kr}))\}$ - технология работы блока управления и его продолжительность (аксиомата $\tilde{A}_{kr}$ в нечетком функциональном представлении, $\mu_{\tilde{A}}(t_{kr})$ - степень (доля) принадлежности t_{kr} в $\tilde{A}_{kr}$); a_i - количество груза или транспортных средств (грузовых поездов, передач вагонов, автомобилей, судов), прибывающих в транспортную систему за расчетный период времени ($i = 1, 2, \dots, n$), b_j - количество груза или транспортных средств, которые могут быть переработаны транспортной системой ($j = 1, 2, \dots, m$), при условии максимального обеспечения всех грузовых фронтов и минимального времени простоя подвижного состава. Тогда множество вариантов управления $\tilde{A}(\tilde{S})$ технологических блоков $\tilde{s}_k$ ОТСУ, обеспечивающих рациональный вариант организации транспортного производства, примет вид $\tilde{A}(\tilde{S}) = \min_{i,j,k,r} \{t_{ij}, \tilde{A}_{kr} | \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)\}$, где $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)$ - доля использования блока $\tilde{s}_k$ ОТСУ в последовательности блоков событий управления нечеткого подмножества $\tilde{A}_{ij}$, принимает значения от 0 до 1.

Для оценки нечеткости составляющих компонентов ОТСУ применима энтропия системы относительно значений вероятностей использования n -блоков структуры управления $H(h_1, h_2, \dots, h_r) = -\sum_{r=1}^Z h_r \cdot \ln h_r$. Для оценки энтропии по нечеткости подмножества параметров блоков, или составляющих времен простоя для аксиомат управления, используется формула $H(\mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_1), \dots, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)) = -\frac{1}{\ln k} \sum_{k=1}^v \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k) \cdot \ln \mu_{\tilde{A}}(\tilde{s}_k)$ или по нечеткости времен простоя подвижного состава $H(\mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_1), \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_2), \dots, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r)) = -\frac{1}{\ln z} \sum_{r=1}^Z \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r) \cdot \ln \mu_{\tilde{A}}(\tilde{t}_r)$.

Критерии рациональности:

1 – минимальное время простоя t_{ij} подвижного состава в транспортной системе и выполнения аксиоматы $T(\text{АСТТП}_m) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v t_{ij} s_k \rightarrow \min$;

2 – минимальное количество управленческих воздействий при выполнении максимальных объемов работы $Z(S) = \arg \min_{i,j,r,k} \{t_{ij}, h_r, \text{sgn } s_k\}$,

3 – минимальные организационные издержки системы управления $S(r) = \frac{(T_{\text{пер}} + A \cdot r) e_{\text{лок-ч}}}{M(T_{\text{цикл}})} + \bar{X}(t) \cdot e_{\text{ваг-ч}} + \frac{M(T_o)}{M(T_{\text{цикл}})} (\sum_{p=1}^l \Pi_p) \cdot e_{\text{п}} \rightarrow \min$, где $T_{\text{пер}}$ – технологическое время на передачу вагонов; A – нормативный коэффициент маневровой работы по расформированию передачи вагонов; r – количество назначений в подаче; $e_{\text{лок-ч}}$ – стоимость локомотиво-часа маневровой работы; $M(T_{\text{цикл}})$ – интервал отсутствия вагонов на обменных путях; $\bar{X}(t)$ – парк местных вагонов; $e_{\text{ваг-ч}}$ – стоимость вагоно-часа простоя; $M(T_o)$ – среднее время нахождения системы в состоянии отсутствия вагонов; Π_i – перерабатывающая способность p -го грузового фронта; $e_{\text{п}}$ – величина потерь от резервного хранения 1 т неотправленного груза.

Варианты организации транспортной работы с набором АСТТП представлены в виде объединения набора последовательности событий:

$$\{\text{АСТТП}_1 = (t_1^1, t_2^1, t_3^1, \dots, t_k^1) \wedge \dots \wedge \text{АСТТП}_r = (t_1^r, t_2^r, t_3^r, \dots, t_k^r) \wedge \dots\}, \quad (3.2)$$

Последовательность управляющих событий может быть представлена в виде вариантов процессов в структуре ОТСУ (рис. 3.3).

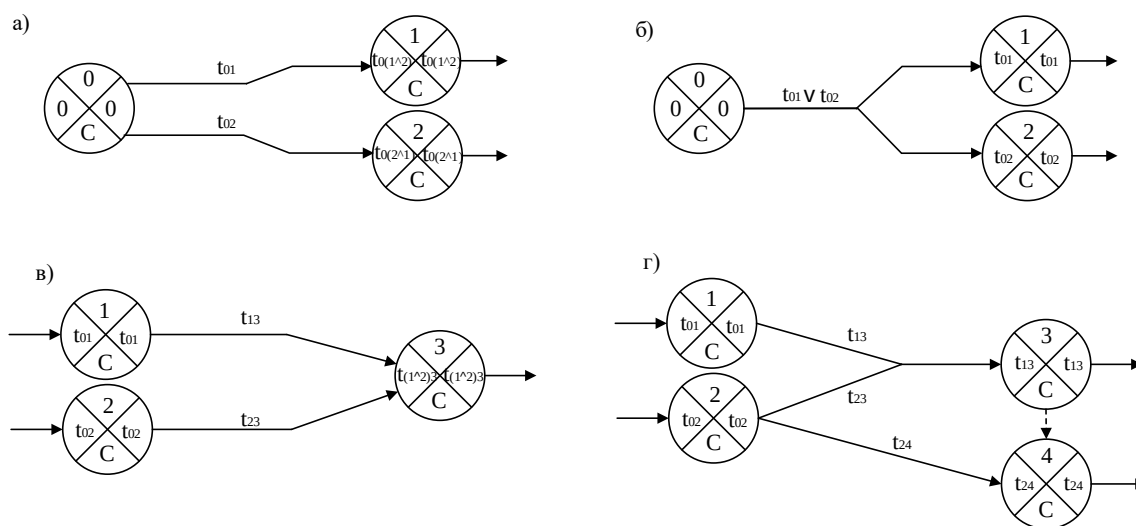


Рисунок 3.3 – Последовательность управляющих событий:

- а – после начального события «0» выполняются события «1» и «2»;
- б – после начального события «0» выполняется событие «1» или «2»;
- в – событие «3» выполняется только после событий «1» и «2»;
- г – событие «3» выполняется после события «1» или «2», а событие «4» выполняется после события «2» одновременно с событием «3»

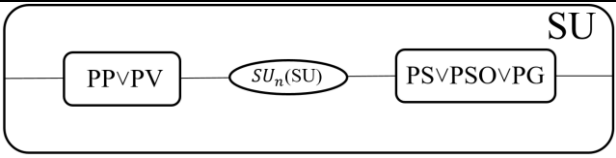
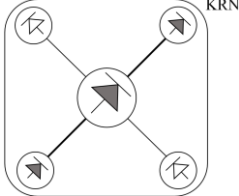
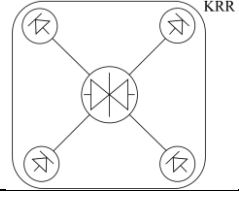
Таким образом, процесс выбора рациональных вариантов транспортной работы будет реализован посредством логических операторов управления – в виде логических цепей АСТТП. В результате формируется модель организации транспортной работы ОТИ с набором взаимодействующих аксиомат АСТТП, которая представляет собой многокритериальную задачу целочисленного линейного программирования. В разработанной математической модели могут также использоваться экономические критерии оценки качества взаимодействия станции и порта (стоимость простоя местного вагона, стоимость подачи-уборки вагонов и т. п.). Следует отметить, что выбор той или иной аксиоматы часто зависит от логических условий выполнения конкретного транспортного процесса. То есть имеет место нечеткое множество разнородных параметров управления. [70, 72, 167]

В рамках диссертационного исследования была разработана библиотека модулей аксиоматических моделей ОТИ, представленная в таблице 3.1. Данная библиотека представляет собой расширенное и углубленное представление аксиоматного моделирования объектов транспортной инфраструктуры.

Таблица 3.1 – Библиотека обозначения модулей усовершенствованных аксиоматических моделей железнодорожной станции

Обозначение парка (устройства)	Нечеткое описание модуля	Графологическое представление модуля
1	2	3
Пассажирский приемоотправочный парк	$\mu(PP)$	
Грузовой приемоотправочный парк	$\mu(PG)$	
Сортировочный парк	$\mu(PS)$	
Районный парк	$\mu(PR)$	
Сортировочно-отправочный парк	$\mu(PSO)$	
Выставочный (обменный) парк	$\mu(PV)$	
Пути/парк отстоя пассажирских составов	$\mu(PO)$	
Парк подготовки вагонов (цистерн)	$\mu(PPV)$	
Грузовые фронты мест общего пользования	$\mu(GFO)$	
Грузовые фронты мест необщего пользования	$\mu(GFN)$	
Погрузочно-выгрузочные пути (фронты, причалы) порта	$\mu(GFP)$	
Фронты слива/налива нефтепродуктов (химических грузов)	$\mu(FS/FN)$	
Локомотивное хозяйство	$\mu(LH)$	
Вагонное хозяйство	$\mu(VH)$	
Багажное отделение станции	$\mu(BO)$	

Продолжение таблицы 3.1 – Библиотека обозначения модулей усовершенствованных аксиоматических моделей железнодорожной станции

Сортировочные устройства (горки, полугорки, вытяжные пути)	$\mu(SU)$	
Критические одноуровневые пересечения железнодорожных путей (неравнозначные)	$\mu(KRN)$	
Критические одноуровневые пересечения железнодорожных путей (равнозначные)	$\mu(KRR)$	

Таким образом, аксиоматное моделирование имеет большой потенциал к развитию путем интеграции с принципами интеллектуального машинного обучения, нейросетевых моделей, а также теории нечетких множеств, комплексно приближаясь к концепции интеллектуальных транспортных систем.

3.2 Формирование структуры уровней цифрового аксиоматного моделирования мультимодальных транспортно-технологических процессов

Традиционные методы управления транспортно-технологическими процессами объектов транспортной инфраструктуры сталкиваются с рядом ограничений, возникающих по мере развития отрасли, а именно [70]:

- необходимостью повышения пропускной способности ОТИ без значительных капиталовложений;
- комплексного непрерывного увеличения сложности систем управления транспортной системой из-за повышающейся и перемещающейся плотности движения, а также из-за негативного влияния санкционного давления;
- необходимости минимизации эксплуатационных расходов: энергопотребления, износа оборудования и инфраструктуры, простое;

- необходимости снижения влияния человеческого фактора для повышения общего уровня безопасности функционирования ОТИ.

В диссертационном исследовании сформированы авторские логические группы аксиоматных моделей вариантов взаимодействия видов транспорта в мультимодальных системах с учетом разработанного метода разрешения транспортных конфликтов.

Рассмотрим формирование структуры уровней цифровых аксиомат моделей мультимодальных транспортно-технологических процессов

1. Аксиоматное моделирование узлового мультимодального взаимодействия видов транспорта (водного и железнодорожного), осуществляющую перевозку грузов (перевалка с железнодорожного транспорта на водный).

Со стороны железнодорожного транспорта в данном технологическом процессе участвует железнодорожная станция «Н», примыкающая к порту «П». Модельная схема станции «Н» согласно принципам аксиоматного моделирования может быть разделена на 34 группы аксиомат. У каждой из аксиомат имеется свой набор модулей, предназначенный для выполнения конкретной грузовой или маневровой операции. В рамках взаимодействия водной и железнодорожной инфраструктуры выделим фрагмент модельной схемы станции «Н», предназначенный для перевалки груза (например, металлолом) через склад порта [207].

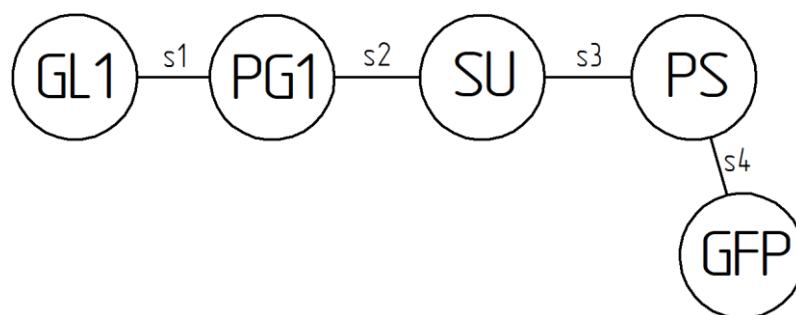


Рисунок 3.4 – Фрагмент модельной схемы станции «Н»

Представленный на рисунке 3.4 фрагмент модельной схемы является основой для формирования аксиоматного описания технологического процесса

перевалки грузов в мультимодальном узле. Развитие аксиоматического подхода, реализованное в Приложении Б, в данном контексте заключается в переходе от статического описания инфраструктуры к динамической модели, учитывающей временные и вероятностные характеристики выполнения операций.

Каждая аксиомата, как элементарная неделимая транспортно-технологическая операция, в рамках предложенной методологии получает не только логическую, но и временную и вероятностную интерпретацию. Это позволяет перейти от детерминированных нормативов к адаптивному управлению на основе прогнозирования состояния системы.

Развитие аксиоматики реализуется через:

- Формализацию связей между аксиоматами разных логических групп (АСТТП, ТСПВТ, АТПВТ, АПРМ), что обеспечивает целостное описание мультимодального процесса;

- Введение динамических параметров выполнения аксиомат, зависящих от текущей загрузки элементов инфраструктуры и внешних факторов;

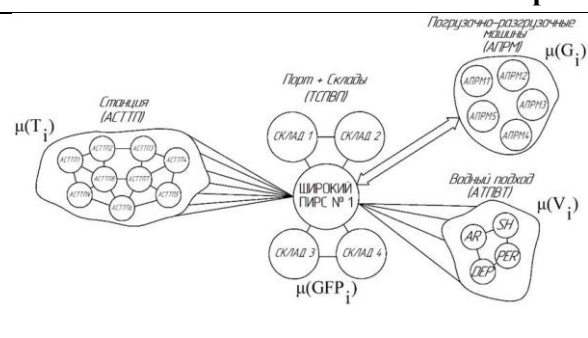
- Интеграцию вероятностных моделей для оценки рисков возникновения транспортных конфликтов на стыках взаимодействия различных видов транспорта.

Со стороны водного транспорта задействован сухогрузный теплоход – площадка погрузки. Взаимодействие между железнодорожным и водным видами транспорта осуществляется посредством широкого пирса № 1 и склада для хранения металлолома.

Аксиоматная модель разбита на 3 составляющие: 1) АСТТП – аксиоматы станционных транспортно-технологических передвижений (железнодорожный транспорт); 2) АТПВТ – аксиоматы технологических процессов водного транспорта (водный транспорт); 3) ТСПВП – транспортно-складские погрузочно-выгрузочные процессы, обеспечивающие связь между двумя логическими группами аксиомат АСТТП и АТПВТ; 4) АПРМ – аксиоматы погрузочно-разгрузочных машин, задействованных в грузовой работе складов.

Логические группы аксиоматных моделей вариантов транспортной работы транспортного узла представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Логические группы аксиоматных моделей вариантов транспортной работы транспортного узла

АМТПП транспортного взаимодействия	Логические группы АМТПП
Транспортный узел	
	$\mu\{\text{АСТПП}\} = \mu\{\text{GL1} \leftrightarrow \text{PG1} \leftrightarrow \theta(\text{SU}) \leftrightarrow \text{PS} \leftrightarrow \text{GFP1}\},$ $\mu\{\text{ТСПВП} + \text{АПРМ}\} = \mu\{\theta(\text{PRM}_i) \leftrightarrow \text{DWL} * \text{Q}_i \leftrightarrow \text{WRH} \leftrightarrow \theta(\text{PRM}_i)\},$ $\mu\{\text{АТПБТ}\} = \mu\{\text{PER} \leftrightarrow \text{SH} \leftrightarrow \text{DEP}\},$ $\mu\{\text{АСТПП} + \text{ТСПВП} + \text{АТПБТ}\} = \mu\{\text{GL1} \leftrightarrow \text{PG1} \leftrightarrow \theta(\text{SU}) \leftrightarrow \text{PS} \leftrightarrow \text{GFP1} \leftrightarrow \mu\{\theta(\text{PRM}_i) \leftrightarrow \text{DWL} * \text{Q}_i \leftrightarrow \text{WRH} \leftrightarrow \theta(\text{PRM}_i) \leftrightarrow \text{PER} \leftrightarrow \text{SH} \leftrightarrow \text{DEP}\}$

2. Аксиоматное моделирование стационарных железнодорожных транспортных процессов.

Для стационарных железнодорожных транспортных процессов разработана специализированная модельная схема, отражающая специфику работы припортовой железнодорожной станции. Особенностью данной схемы является наличие маневровых районов, сортировочных и приемо-отправочных путей, а также взаимосвязей с примыкающими перегонами и портовой инфраструктурой.

Новизна предложенной аксиоматной модели мультимодального взаимодействия заключается в интеграции в её структуру системного учёта транспортных конфликтов. В отличие от классических подходов, разработанная модель включает:

1. Явное выделение конфликтных зон - пересечений маршрутов различных видов транспорта (одноуровневые пересечения стрелочных горловин, причальных фронтов, въездов на складские территории).
2. Вероятностную оценку возникновения конфликтов — для каждой пары аксиомат, имеющих одноуровневое пересечение, вычисляется вероятность совместного появления и ожидаемая продолжительность конфликта.

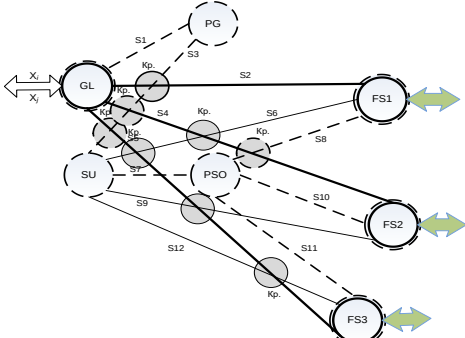
3. Классификацию конфликтов по трём родам (I, II и III), что позволяет дифференцированно подходить к выбору управленческих решений в зависимости от природы конфликтной ситуации.

Таким образом, новизна модели заключается не просто в формализации технологических операций, а в **прогностическом учёте конфликтного потенциала** системы. Это позволяет перейти от реактивного управления (реагирование на уже возникший конфликт) к проактивному (предотвращение конфликта на этапе планирования маршрутов и выбора аксиомат). Предложенный подход впервые объединяет аксиоматное описание инфраструктуры и технологии с вероятностным моделированием конфликтов, что создаёт основу для интеллектуального управления в реальном времени.

Согласно технологическим процессам, технико-распорядительным актам станции, технологическим картам погрузочно-разгрузочных работ и графикам движения поездов, был произведен программный анализ и интеллектуализация разработанных аксиоматных моделей. Результаты данного анализа, включая численные значения параметров для каждой группы аксиомат и сценарии их взаимодействия, представлены в Приложении Б.

Логические группы аксиоматных моделей вариантов транспортной работы припортовой ж.-д. станции представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Логические группы аксиоматных моделей вариантов транспортной работы припортовой ж.-д. станции

АМТП транспортного взаимодействия	Логические группы АМТП
Припортовая ж.-д. станция	
	$\begin{aligned} \mu\{\text{АМТП1}\} &= \mu\{\text{GL} \overleftrightarrow{\text{кр.}} \mu_{\bar{A}}(\text{FS})_k\}, \\ \mu\{\text{АМТП2}\} &= \mu\{\text{GL} \leftrightarrow \text{PG} \overleftrightarrow{\text{кр.}} \mu_{\bar{A}}(\text{SU}) \leftrightarrow \\ &\mu_{\bar{A}}(\text{PSO}) \overleftrightarrow{\text{кр.}} \mu_{\bar{A}}(\text{FS})_k\}, \\ \mu\{\text{АМТП3}\} &= \mu\{\text{GL} \leftrightarrow \text{PG} \overleftrightarrow{\text{кр.}} \mu_{\bar{A}}(\text{SU}) \overleftrightarrow{\text{кр.}} \mu_{\bar{A}}(\text{FS})_k\}, \\ \mu\{\text{АМТП4}\} &= \mu\{\mu_{\bar{A}}(\text{FS})_k \overleftrightarrow{\text{кр.}} \mu_{\bar{A}}(\text{PSO}) \leftrightarrow \mu_{\bar{A}}(\text{SU}) \\ &\overleftrightarrow{\text{кр.}} \mu_{\bar{A}}(\text{FS})_k\}. \end{aligned}$

3. Аксиоматное моделирование работы транспортно-складского комплекса (логистического терминала)

Модельная схема в транспортно-складского комплекса (логистического терминала) имеет набор определенных модульных элементов [202]. Каждый из них имеет свои характеристики, описание, а также грузовую операцию, которую он выполняет. Помимо модульных элементов на схеме присутствуют области, обозначающие железнодорожные пути, крытые склады, открытые площадки для грузов, ангары. Также модельная схема имеет дороги s_i , соединяющие модульные элементы. Все они разной длины и имеют разное время прохождения их грузовой автомашиной.

Логические группы аксиоматных моделей вариантов транспортной работы транспортно-складского комплекса представлены в таблице 3.4.

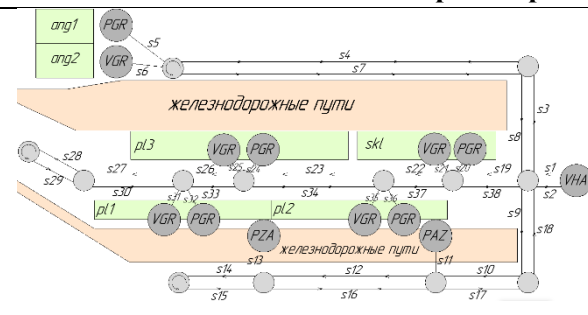
АМТПП транспортного взаимодействия	Логические группы АМТПП
Транспортно-складской комплекс	
	$\mu\{\text{АПРМ1}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{VGR}(\text{pl1} \vee \text{pl2}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ2}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{PGR}(\text{pl1} \vee \text{pl2}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ3}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{VGR}(\text{pl3}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ4}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{PGR}(\text{pl3}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ5}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{VGR}(\text{skl}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ6}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{PGR}(\text{skl}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ7}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{VGR}(\text{ang1} \vee \text{ang2}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ8}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{PGR}(\text{ang1} \vee \text{ang2}) \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ9}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{PZA} \leftrightarrow \text{VHA}\},$ $\mu\{\text{АПРМ10}\} = \mu\{\text{VHA} \leftrightarrow \text{PAZ} \leftrightarrow \text{VHA}\}$

Таблица 3.4 – Логические группы аксиоматных моделей вариантов транспортной работы транспортно-складского комплекса

На основе модельной схемы транспортно-складского комплекса станции «З» описываются массивы аксиомат, описывающие различные грузовые операции, выполняемые грузовыми автомобилями. Каждую аксиомату можно сопоставить с множеством других аксиомат в рамках множества экспериментов транспортной работы (для одной и той же аксиоматы).

Каждая грузовая автомашина, заезжающая на территорию транспортно-складского комплекса, имеет определенную транспортную задачу, которая соответствует определенной аксиомате. Это погрузка-выгрузка-перевалка по прямому варианту на одном из модулей аксиоматной модели ТСК, представляющих собой складские объекты. В зависимости от потребности ТСК в конкретной грузовой операции, лицом принимающим решение выбирается соответствующая площадка или склад. На выбор влияют различные данные и характеристики, которые указываются в конкретном транспортном процессе.

В табл. 3.5 представлены модули аксиоматной модели ТСК и их обозначения на примере ТСК станции «З».

Таблица 3.5 – Модули инфраструктуры транспортно-складского комплекса станции «З»

Модуль схемы ТСК	Обозначение модуля
<i>VHA</i>	Въезд-выезд с территории
<i>PGR</i>	Погрузка грузовых автомобилей
<i>VGR</i>	Выгрузка грузовых автомобилей
<i>PZA</i>	Прямая перегрузка по варианту «железная дорога – автомобиль»
<i>PAZ</i>	Прямая перегрузка по варианту «автомобиль - железная дорога»
<i>skl_i</i>	Крытый быстровозводимый склад
<i>pl₁</i>	Открытая площадка для тяжеловесных грузов, секция 1
<i>pl₂</i>	Открытая площадка для тяжеловесных грузов, секция 2
<i>pl₃</i>	Контейнерная площадка
<i>ang_i</i>	Ангар типа «Липецк»
	Поворот соединительной дороги для грузовых автомашин
	Разворот соединительной дороги для грузовых автомашин
<i>s_i</i>	Соединительные дороги для грузовых автомашин

Таким образом, изучая каждую аксиомату, можно производить анализ данных и предпринимать соответствующие рациональные управленческие решения, направленные на повышение эффективности транспортного производства ОТИ. Реализация аксиоматного моделирования транспортно-складского комплекса представлена в Приложении Б.

3.3 Развитие метода решения транспортных конфликтов в системе цифрового аксиоматного моделирования

Транспортный конфликт (ТК) – это состояние, при котором элемент инфраструктуры ТТС занят несколькими АТПП в один и тот же момент времени.

Для интеллектуализации цифровых решений в управлении железнодорожными транспортно-технологическими системами (ТТС) важное значение имеет классификация транспортных конфликтов, в качестве которых могут выступать одноуровневые пересечения маршрутов движения, ограничения пропускной способности перегонов и парков станций, недостаточные перерабатывающие способности инфраструктурных объектов, грузовых фронтов и т.п. Интерпретируя условия [212], определены ТК первого рода (К1Р) – состояния, при которых множеству транспортных средств (поездов, подач вагонов) в один и тот же момент времени требуется одна и та же АТПП, в результате чего возможны задержки обслуживания транспортных объектов и появление очередей. ТК второго рода (К2Р) – состояние, при котором множество транспортных средств (поездов, подач вагонов) ТТС использует множество АТПП, имеющих однотипные участки по маршруту движения и точки (ответственные стрелочные переводы) взаимного пересечения, в результате чего появляются враждебные и параллельные маршруты с необходимостью расчета времени загрузки пересечения. ТК третьего рода (К3Р) – состояние, представляющее собой смешанный конфликт первого и второго рода. Бесконфликтность ТТС – это отсутствие конфликтов первого, второго и третьего рода [17, 18].

Представлена классификация транспортных конфликтов для основных типов объектов транспортной инфраструктуры (таблица 3.6). Для каждого типа конфликта приведены примеры на трёх типах объектов: железнодорожная станция, мультимодальный транспортный узел и транспортно-складской комплекс. Данные объекты проанализированы в экспериментах, описанных в Приложении Б.

Таблица 3.6 – Классификация транспортных конфликтов для основных типов объектов транспортной инфраструктуры

Тип конфликта	Сущность	Ж/д станция	МТУ	ТСК
Конфликт I рода	Одна и та же аксиомата требуется двум или более транспортным единицам в один и тот же момент времени	Ситуация: Два грузовых поезда одновременно прибывают на один и тот же свободный путь в парке прибытия. Аксиомата: «занятие пути Р1». Последствие: один состав вынужден ожидать освобождения пути, что задерживает его обработку и увеличивает простой.	Ситуация: К одному причалу порта одновременно подходят два судна под погрузку/разгрузку. Аксиомата: «швартовка к причалу №3». Последствие: одно судно становится на рейд в ожидании, увеличивается время стоянки судна и задержка обработки грузов.	Ситуация: Два автомобиля-фуры одновременно прибывают на один и тот же ворота склада под разгрузку (или на один док). Аксиомата: «заезд на док №2». Последствие: второй автомобиль ожидает в очереди, что задерживает его загрузку/разгрузку и увеличивает время простоя.
Конфликт II рода	Одноуровневое пересечение маршрутов двух разных аксиомат (маршрутов) в один момент времени	Ситуация: Маневровый состав движется по стрелочной горловине на вытяжной путь для расформирования, а в это же время по этой же стрелке проходит поезд на припортовый фронт. Пересечение: одноуровневое пересечение маршрутов «маневры» и «поступление поезда». Последствие: один из маршрутов блокируется, что вызывает задержки и сбои в технологии работы станции.	Ситуация: Железнодорожный состав подаётся под выгрузку на причал, а с другого конца этого же причала одновременно выезжает автомобиль с территории порта, пересекая железнодорожный переезд. Пересечение: одноуровневое пересечение маршрутов «железнодорожный состав» и «автомобиль». Последствие: переезд закрывается, вызывая задержку одного из видов транспорта и простои в ожидании.	Ситуация: Автомобиль с грузом выезжает из зоны склада через ворота А, а в это же время вилочный погрузчик с другого склада движется в ту же зону по той же дороге, пересекая маршрут автомобиля. Пересечение: одноуровневое пересечение маршрутов «выезд фуры» и «движение погрузчика». Последствие: возникает затор, снижается скорость обработки грузов, появляются простои.
Конфликт III рода	Смешанный конфликт, сочетающий признаки конфликтов I и II рода	Ситуация: Одновременно возникают две проблемы: 1) одно и то же сортировочное устройство нужно двум маневровым составам (I род); 2) при этом маршруты их движения пересекаются на стрелочной горловине (II род). Последствие: требуется сложное перепланирование маневровой работы, увеличивается риск сбоев.	Ситуация: Один причал требуется одновременно двум судам (I род), и при этом пути подхода к этому причалу занимают и обрабатывают другие транспортные средства, пересекая маршруты подачи судов (II род). Последствие: комплексная остановка работы, задержки и рост простоев как судов, так и наземного транспорта.	Ситуация: Один док склада требуется одновременно двум фурам (I род), при этом их маршруты движения по территории пересекаются (II род). Последствие: необходимо пересматривать всю логистику заезда и выезда, возникают простои всех участников.

Рассмотрено моделирование ТК на примере модельных схем АТПП станции «Г». Инфраструктурные элементы станции «Г» включают в себя: однопутный подход главного пути (GL); грузовой парк (PG); сортировочно-отправочный парк (PSO); вытяжной путь (SU); три грузовых фронта необщего пользования (FS); узлы пересечений маршрутов – транспортные конфликты (KRR). Разработана методика интерпретации аксиоматной модели с включением блока транспортных конфликтов. На рисунке 3.5 приведен данный пример интерпретации схемы припортовой железнодорожной станции.

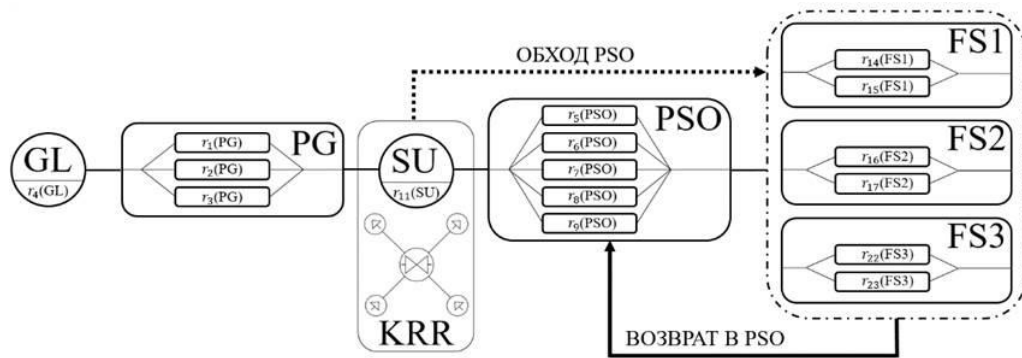


Рисунок 3.5 – Интерпретация АСТПП припортовой железнодорожной станции с блоком транспортных конфликтов

Рассмотрим моделирование ТК на примере взаимодействия АТПП1 и АТПП2. Данные АТПП выделены на рис. 3.5 жирными и штриховыми линиями. В результате формируется транспортная ситуация порождающая одноуровневое пересечение равноправных маршрутов – ТК первого и второго рода ($\overleftarrow{\text{кр.}}$), которое можно представить в виде:

$$\{\text{АТПП1}\} = \{\text{GL}\} \cup \{s5 \in \overleftarrow{\text{кр.}}\} \cup \{\mu_{\bar{A}}(\text{FS})_1\}$$

$$\cap \{\text{АТПП2}\} = \{\text{GL}\} \cup \{s1\} \cup \{\text{PG}\} \cup \{s2 \in \overleftarrow{\text{кр.}} 1 \in \overleftarrow{\text{кр.}} 5 \in \overleftarrow{\text{кр.}} 4\} \cup \{\mu_{\bar{A}}(\text{SU})\} \cup \{s3 \in \overleftarrow{\text{кр.}} 3\} \cup \{\mu_{\bar{A}}(\text{PSO})\} \cup \{s4 \in \overleftarrow{\text{кр.}} 2\} \cup \{\mu_{\bar{A}}(\text{FS})_1\}.$$

При этом возможны варианты:

1 – $\{\text{АТПП1}\} \cap \{\text{АТПП2}\} = \emptyset$, когда по схеме возможно сочетание маршрутов, а согласно технологии управления таких пересечений нет;

2 – $\{АТТП1\} \cap \{АТТП2\} = \text{Pr}_{12}\{АТТП_1, АТТП_2, R(t_{12})\}$, когда технология управления предусматривает одноуровневое пересечение, где $R(t_{12})$ – временные параметры АТТП.

Допустимость загрузки $\overrightarrow{\text{кр.}}$ соответствует условию $T_{\text{загр}} < 1440$ мин. При неравномерном движении, в качестве расчетного периода T_p принимается период наиболее интенсивной работы и проверяется условие $T_{\text{загр}} < T_p$. Вероятности данных событий примут вид: $P(АТТП1) = \frac{n_1 t_1}{T_p}$, $P(АТТП2) = \frac{n_2 t_2}{T_p}$. Продолжительность совпадений маршрутов равна $T_{АТТП1-АТТП2}^{\text{сов}} = \frac{n_1 t_1 n_2 t_2}{T_p} = \frac{10 \cdot 5 \cdot 40 \cdot 5}{1440} \approx 7$ мин.

На основе комбинаторных методов и теории вероятностей [4] рассмотрено моделирование исходов независимых событий АТТП1 и АТТП2. При начальной постановке $P(АТТП1) = 0,1$; $P(АТТП2) = 0,4$.

Вероятностная модель условий событий для расчета загрузки пересечения:

$A_0 = \{\text{обе аксиоматы произойдут}\}$,

$A_1 = \{\text{хотя бы одна аксиомата не произойдет}\}$,

$A_2 = \{\text{только одна аксиомата произойдет}\}$.

Независимые события примут вид: $C = \{\text{АСТТП1 произойдет}\}$, $D = \{\text{АСТТП2 произойдет}\}$.

Так как $A_0 = CD$, то $P(A_0) = P(АТТП1) \cdot P(АТТП2) = 0,1 \cdot 0,4 = 0,04$. Для $A_2 = C\bar{D} + \bar{C}D$, тогда $P(A_2) = P(C\bar{D}) + P(\bar{C}D)$ из условия, что события несовместны. $P(A_2) = P(C)P(\bar{D}) + P(\bar{C})P(D) = 0,1(1 - 0,4) + (1 - 0,1)0,4 = 0,42$. Событие $A_1 = \bar{A}_0$ и $P(A_1) = 1 - P(A_0) = 0,96$.

Для крупных станций задача усложняется, так как АТТП становится значительно больше и повышается степень конфликтности в вариантах управления. Для моделирования вариантов управления в среде *Python* разработана программа расчета параметров транспортных процессов *Axiomatic v.1.0* (св-во о регистрации № 2022681955 от 17.11.2022) и АМПВ v. 1.0 (св-во о регистрации № 2026683768 от 04.08.2026).

Таким образом, степень загрузки одноуровневого пересечения из условия моделирования транспортных событий при 100 экспериментах взаимодействия АТП1 и АТП2, составила при времени АТП1 – 4,22 час и АТП2 – 7,56 час, для вариантов ТК – от 4,22 до 4,45 час для АТП1 и от 7,56 до 7,8 час для АТП2. Это позволяет делать выводы о путях сокращения простоя подвижного состава и в перспективе применять рекуррентные нейронные сети прямого распространения в выборе вариантов цифровых управленческих решений в транспортном производстве железнодорожных станций. Блок-схема решения К1Р по варианту транспортной работы припортовой станции «Г» представлена на рисунке 3.6.

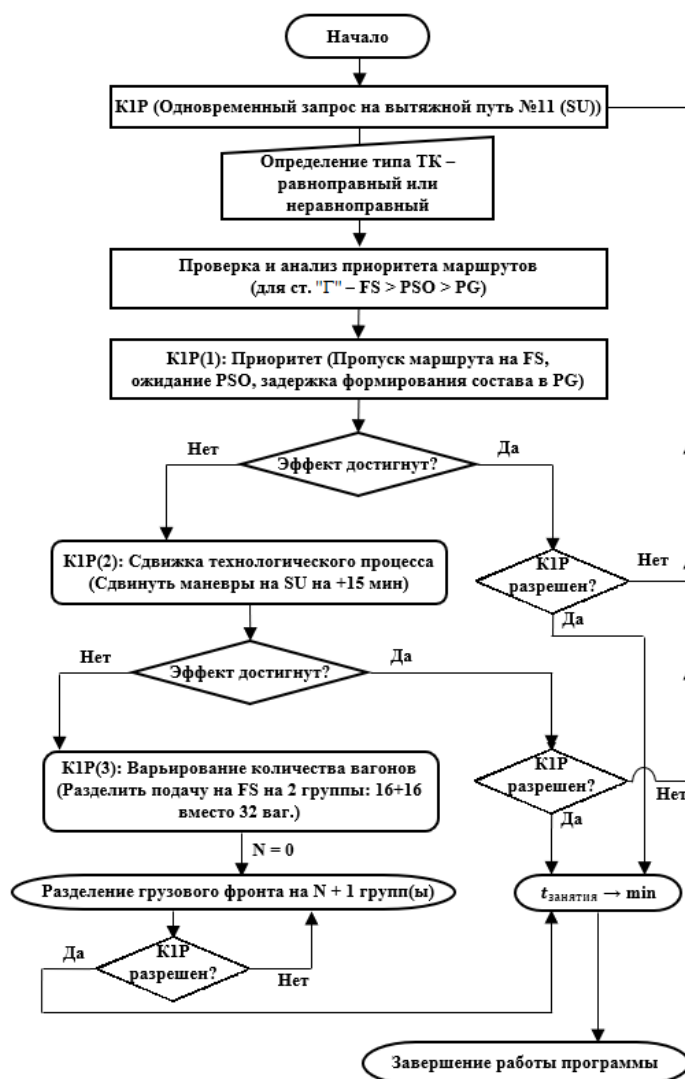


Рисунок 3.6 – Блок-схема решения К1Р по варианту транспортной работы припортовой станции «Г»

Проведенное исследование показало, что наиболее распространенным для станции оказался К1Р, проявляющийся в конкуренции транспортной операцией на вытяжном пути. К2Р, связанный с пересечением поездных и маневровых маршрутов, увеличивает время обработки местного вагона на 15–20 %. К3Р проявляется сравнительно редко и связан с несоответствием длины маршрутов вместимости путей приема-отправления. Укрупненные блок-схемы решения транспортных конфликтов по вариантам управления местной работой станции «Г» представлены на рисунке 3.7.

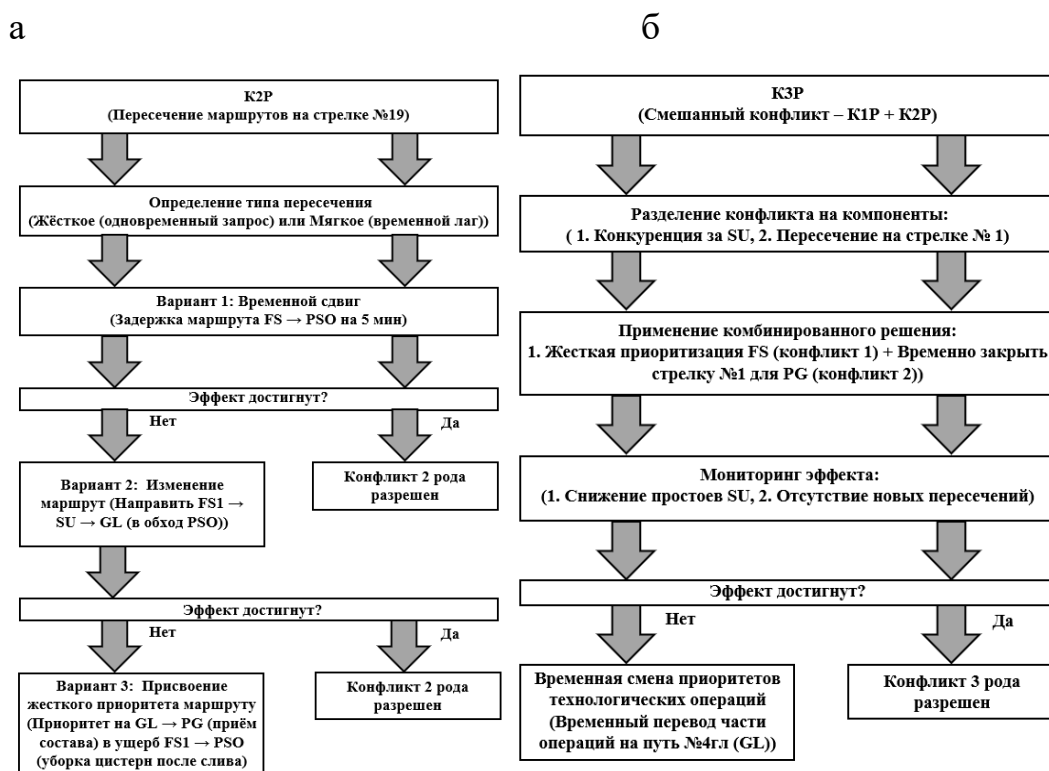


Рисунок 3.7. – Укрупненные блок-схемы решения транспортных конфликтов по вариантам управления местной работой станции «Г»: а – К2Р, б – К3Р

Таким образом, возможно и целесообразно развитие интеллектуализации и цифровизации управления транспортной работой железнодорожных припортовых станций на основе усовершенствованной аксиоматики транспортно-технологических процессов и нейросетевых моделей для прогнозирования очередности обслуживания грузовых фронтов и решения транспортных конфликтов. Дальнейшее раз-

витие программного модуля Axiomatic связано с добавлением новых функций анализа местной работы, ее планирования и оптимизации с формированием базы больших данных временных и инфраструктурных параметров и их оценки.

3.4 Логические группы жесткой (АСТТП-Б) и мягкой (АСТТП-М) цифровой аксиоматной модели транспортной работы

Рассмотрим развитие авторской методики аксиоматики транспортно-технологических процессов в части исследования, анализа, и последующей оптимизации технологии работы инфраструктурных объектов системы «станция – порт» с применением принципов базовой (АМТТП-Б) и модернизированной (АМТТП-М) аксиоматной модели транспортно-технологических процессов. Аксиоматное моделирование имеет связь с классическим многоуровневым программированием, а также с применением принципов формирования рекуррентных нейронных сетей (РНС), теории активных систем (ТАС), а также теорией нечетких множеств (ТНМ). Аксиоматная модель может формализовать процесс, связанный с функционированием объектов транспортной инфраструктуры, а также составляющие части её технологии работы. Совокупность аксиомат, выполняющих массив транспортных задач, поставленных перед объектом управления, представляет собой аксиоматную модель транспортно-технологических процессов (АМТТП). Модель, не прошедшая обработку средствами ТНМ, РНС, ТАС, называется базовой (АМТТП-Б).

АМТТП-М может принять 2-й или 3-й уровень сложности. В рамках данной научной работы с помощью разработанного и сертифицированного программного модуля Axiomatic v. 1 и АМПВ v. 1, применим принципы формирования РНС, переведем АМТТП-Б в АМТТП-М 1-го уровня сложности.

Согласно рис. 3.9, для осуществления перехода из АМТТП-Б в АМТТП-М необходимо применить методы обработки данных, основанные на принципах рекуррентных нейронных сетей, теории активных систем и теории нечетких множеств. В результате применения один из выше перечисленных методов обработки информации

транспортного объекта базовая аксиоматная модель становится модернизированной 1-го уровня сложности. При комбинированном применении данных принципов АМТПП-М может принять 2-й или 3-й уровень сложности. Рассмотрим с помощью разработанного и сертифицированного программного модуля Axiomatic v. 1 и АМПВ v. 1 [214, 216], применение принципов формирования РНС, переводя АМТПП-Б в АМТПП-М 1-го уровня сложности (рисунок 3.8)

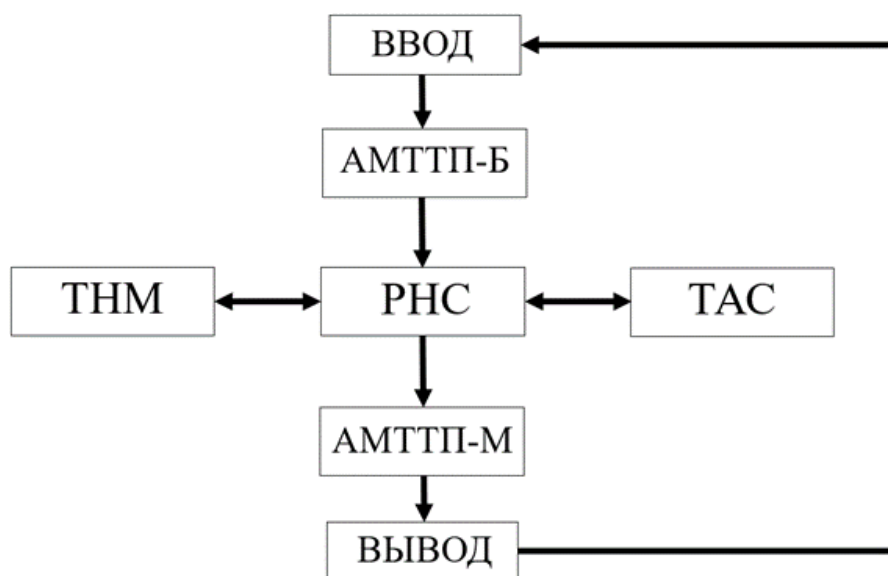


Рисунок 3.8 – Схема обработки массивов данных транспортного объекта в системе аксиоматного транспортно-технологического моделирования

Базовой «жесткой» аксиоматной моделью (АМТПП-Б) называют такую аксиоматную модель, не прошедшую обработку средствами ТНМ, РНС, ТАС.

АМТПП-Б имеет ряд ограничений в аспектах обработки неопределенности системы и адаптации к изменяющимся условиям. Именно поэтому актуальным становится развитие "мягких" аксиоматных моделей (АМТПП-М), использующих современные методы искусственного интеллекта для повышения гибкости и точности моделирования.

SWOT-анализ жесткой и модернизированной (мягкой) аксиоматной модели представлен в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – SWOT-анализ жесткой и модернизированной (мягкой) аксиоматной модели

Категория	Жесткая аксиоматная модель	Модернизированная (мягкая) аксиоматная модель
S (Сильные стороны)	• Простота: Легка в реализации, понимании и объяснении. • Прозрачность: Полная ясность логики и последовательности действий. • Предсказуемость: Гарантированный результат в идеальных, контролируемых условиях. • Надежность: Минимум ошибок при строгом соблюдении заданных сценариев.	• Адаптивность: Способна учитывать изменения и новые данные. • Устойчивость к неопределенности: Работает в условиях случайных событий (погода, сбои, переменный спрос). • Гибкость: Может обрабатывать нестандартные ситуации и отклонения от сценария. • Релевантность: Более высокая практическая ценность для сложных, динамичных систем (как современный транспорт).
W (Слабые стороны)	• Хрупкость: Любое отклонение от прописанных правил ведет к сбою или неверному результату. • Статичность: Требует дорогостоящего ручного обновления для отражения изменений в реальном мире. • Упрощение: Игнорирует важные стохастические и динамические факторы, что снижает адекватность модели.	• Сложность: Требует более продвинутых методов (вероятностное моделирование, машинное обучение), что усложняет разработку и валидацию. • Непрозрачность: Может превратиться в «черный ящик», где решения труднее интерпретировать (особенно с использованием ИИ). • Затратность: Разработка, внедрение и поддержка требуют больше ресурсов и экспертизы.
O (Возможности)	• Основы для обучения: Идеальна как стартовая точка и учебный материал для понимания базовых принципов системы. • Применение в стабильных средах: Эффективна для простых, изолированных, полностью контролируемых подпроцессов, где нет неопределенности. • Эталон: Может служить базой для сравнения с более сложными моделями.	• Автоматизация управления: Позволяет создавать интеллектуальные системы реального времени (например, адаптивное светофорное регулирование, динамическое расписание). • Повышение эффективности: Оптимизация ресурсов (подвижной состав, энергия) за счет учета текущего контекста. • Улучшение отказоустойчивости: Система может «подстраховаться» себя при сбоях, предлагая альтернативные планы. • Интеграция с Big Data и IoT: Может использовать поток данных с датчиков и историческую статистику для улучшения решений.
T (Угрозы)	• Быстрое устаревание: В изменчивом мире становится нерелевантной и даже вредной. • Системные сбои: Приводит к каскадным ошибкам в сложных взаимосвязанных системах. • Потеря доверия: Неспособность адекватно реагировать на реальные события подрывает доверие пользователей и операторов к системе в целом.	• Некорректная настройка: Риск создания излишне сложной модели, которая будет «переученной» или неустойчивой. • Ошибки в данных: Качество решений напрямую зависит от качества входных данных и их интерпретации. • Сопrotивление внедрению: Сложность модели может вызывать недоверие у персонала, привыкшего к простым и понятным правилам.

Таким образом, современные транспортные системы подвержены влиянию множества факторов, включая неопределенности спроса, погодные условия, технические сбои и другие случайные события. Жесткие аксиоматные модели не позволяют эффективно учитывать эти факторы, что снижает их практическую ценность.

Модернизация моделей необходима для повышения их адаптивности и способности принимать решения в условиях неопределенности.

Мягкие аксиоматные модели строятся с использованием методов искусственного интеллекта, таких как:

- Машинное обучение: позволяет моделям самостоятельно обучаться на основе исторических данных и улучшать свои предсказания.
- Теория нечетких множеств: обеспечивает обработку неопределенной и неполной информации, позволяет оперировать с понятием "более или менее", а не строго "да" или "нет".
- Рекуррентные нейронные сети: эффективно работают с последовательными данными, что важно для моделирования временных зависимостей в транспортных процессах.

Мягкие аксиоматные модели обладают следующими свойствами:

- Адаптивность: способность подстраиваться под изменения в системе и внешних условиях.
- Учет неопределенности: модели могут работать с неполной или нечёткой информацией.
- Обучаемость: возможность улучшения модели на основе новых данных.
- Гибкость: модели способны обрабатывать нестандартные ситуации и принимать соответствующие решения.

Преимущества: Повышенная точность и надежность при моделировании сложных систем, Уменьшение влияния неопределенности на результаты моделирования, Возможность прогнозирования и проактивного управления процессами.

Ограничения: Сложность разработки и реализации, Требование наличия больших объемов качественных данных для обучения, Необходимость в мощностях для обработки данных и обучения моделей, Сравнение жестких и мягких аксиоматных моделей. Анализ сравнительных характеристик аксиоматных моделей представлен в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Анализ сравнительных характеристик аксиоматных моделей

Критерий	Жесткая модель	Мягкая модель
Гибкость и адаптивность	Относительно невысокая	Высокая
Точность и надежность	Ограничена детерминированными сценариями	Высокая за счет обучения данных
Учет неопределенности	Отсутствует	Присутствует
Сложность реализации	Относительно низкая	Высокая

Применение мягких аксиоматных моделей в транспортных системах для решения задач:

- Оптимизация графиков движения: учет задержек, изменений в спросе, технических неполадок;
- Прогнозирование пассажиропотока: адаптация расписания под динамические изменения спроса;
- Управление логистическими цепочками: оптимизация маршрутов, складских запасов и распределения ресурсов;

Интеграция аксиоматных моделей в разряд интеллектуальных транспортных системы (ИТС) дает возможности:

- Трафиковое управление в реальном времени: регулирование потоков на основе текущих данных;
- Система поддержки принятия решений: рекомендации операторам и диспетчерам в нестандартных ситуациях;
- Интеграция с другими видами транспорта: обеспечение межвидовой координации и оптимизации комбинированных перевозок;

Перспективы развития мягких аксиоматных моделей связаны с:

- Развитие методологии моделирования: создание универсальных подходов для различных транспортных систем;
- Повышение эффективности обучения моделей: использование гибридных методов и алгоритмов;
- Интеграция с большими данными (Big Data): использование больших объемов информации для повышения точности моделей;

- Разработка специализированных программных комплексов: облегчение внедрения и использования мягких аксиоматных моделей в отрасли.

Таким образом, переход от жестких к мягким аксиоматным моделям является необходимым этапом развития методологии моделирования транспортных процессов и объектов. Мягкие модели, основанные на современных методах искусственного интеллекта, позволяют более адекватно описывать сложные и динамичные транспортные системы, учитывать неопределенность и адаптироваться к изменениям. Это повышает эффективность управления транспортными процессами, способствует оптимизации ресурсов и улучшению качества услуг.

Дополнительным преимуществом мягких аксиоматных моделей является их способность к непрерывному обучению на основе накапливаемых эксплуатационных данных. В отличие от классических формализаций, зафиксированных на этапе проектирования, такие модели могут корректировать свои параметры и внутренние зависимости по мере поступления новой информации о поведении системы. Это открывает возможность построения самонастраивающихся контуров управления, которые сохраняют работоспособность при изменении структуры грузопотоков, сезонных колебаниях нагрузки или появлении новых технологических ограничений.

3.5 Графологическое формирование математического инструментария АСТТП в условиях нечеткого системотехнического моделирования управления транспортным производством

Для отражения управляющих воздействий в системе АМТПП применимы рекуррентные нейронные сети (РНС) прямого распространения (сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки), которые могут оперировать с неточной информацией и объяснять принятые решения в условиях динамически изменяющейся ситуации. На рисунке 3.10 представлен фрагмент структуры РНС для прогнозирования ЛГ АМТПП.

В качестве входных переменных параметров $R(t) = \{R_{гр}, R_{мсс}, R_{АТТП}, R_t\}$ цифровой интеллектуальной модели АМТТП приняты размеры грузо- и вагонопотока в системе ($R_{гр}$), параметры блоков модельной схемы транспортного объекта ($R_{мсс}$), последовательности вариантов организации транспортной работы АТТП ($R_{АТТП}$), временные параметры АМТТП по вариантам распределения транспортных средств в системе $R(t)$, U – процедура воздействия на последовательность выбора АТТП, V – процедура вывода результатов воздействия на последовательность выбора АТТП. Модель выходных параметров имеет вид $H(t) = \{H_{гр}, H_{мсс}, H_{АТТП}, H_t\}$, W – процедура графологической развертки РНС в зависимости от условий эксплуатации.

Алгоритм развертки РНС при формировании АМТТП на примере грузовой станции может быть представлен в виде последовательности шагов:

Шаг 1 ($W1$) – входные параметры $R(1) = \{\text{схема грузовой станции, ТРА, технологический процесс, показатели работы, пропускная способность, перерабатывающая способность, время занятия и т. п.}\}$, результат = $\{\text{транспортно-технологическая схема станции, модельная схема станции МСС, (0,1)-матрица связей инфраструктурных объектов-блоков, графологическая модель транспортного процесса } G(X, U|S)\}$, выходные параметры $H(1) = \{\text{блоки МСС по вариантам транспортных процессов } G(X, U|S)\}$.

Шаг 2 ($W2$) – входные параметры $R(2) = \{\text{инструкция по организации маневровой работы, технологические времена, пропускная способность, очередность обслуживания и т. п.}\}$, результат = $\{\text{формирование транспортных маршрутов по данным начала и конца из } i\text{-блоков МСС для графа } G(X, U|S)\}$, выходные параметры $H(2) = \{\text{продолжительность транспортных процессов по } G(X, U|S)\}$.

Шаг 3 ($W3$) – входные параметры $R(3) = \{\text{параметры } i\text{-блоков МСС, маневровый маршрут по (0,1) - матрице связей технологических операций и парковых элементов станции, вероятностная матрица связи станционных процессов и модулей путевого развития}\}$, результат = $\{\text{формирование аксиоматы АТТП по процедуре } U\{i\text{-блок МСС}|u\} \in \{АМТТП_i\}\}$, выходные параметры $H(3) = \{\text{продолжительность АМТТП}_1, АМТТП_2, \dots, АМТТП_i\}$.

Шаг 4 (W4) – входные параметры $R(4) = \{\text{последовательности } i\text{-блоков МСС по варианту транспортной работы, времена занятия}\}$, результат = $\{\text{варианты использования блоков АМТПП}_i \text{ по условиям } \text{sgn}\{i\text{-блок}\} \wedge \{i\text{-блок}|S\}, \text{ массив значений времен АМТПП}_i \text{ для U4-условий организации транспортной работы}\}$, выходные параметры $H(4) = \{\text{набор всех возможных аксиомат АМТПП}_1, \text{ АМТПП}_2, \dots, \text{ АМТПП}_i \text{ для U4-условий организации транспортной работы}\}$.

Шаг 5 (W5) – входные параметры $R(5) = \{\text{вероятности использования } i\text{-блоков, времена занятия}\}$, результат = $\{\text{анализ графологических связей } G(X, U|S) \text{ по U5-условиям использования}\}$, выходные параметры $H(5) = \{\text{графологические последовательности АМТПП, массив времен}\}$.

Шаг 6 (W6) – входные параметры $R(6) = \{\text{последовательности } i\text{-блоков МСС по варианту транспортной работы, времена занятия}\}$, результат = $\{\text{формирование и оценка массива времен } t(G_n) \text{ (где } t \text{ – временной параметр модели; } n \text{ – порядковый номер массива) по АМТПП}_i \text{ для условия использования}\}$, выходные параметры $H(6) = \{\text{степень нечеткости использования для U6-условий организации транспортной работы}\}$.

Шаг 7 (W7) – входные параметры $R(7) = \{\text{нечеткие последовательности АМТПП, времена АМТПП}\}$, результат = $\{\text{формирование ЛГ АМТПП } \{LГ_n\} = \cup\{АМТПП_i\}\}$, выходные параметры $H(7) = \{\text{массив времен ЛГ АМТПП для U7-условий организации транспортной работы}\}$;

Шаг 8 (W8) – входные параметры $R(8) = \{\text{ЛГ АМТПП, взаимное использование с учетом ТК, времена занятия}\}$, результат = $\{\text{формирование АМТПП ГС по вариантам ЛГ АМТПП и параметрам использования}\}$, выходные параметры $H(8) = \{\text{параметры АМТПП ГС, показатели работы станции для U8-условий организации транспортной работы}\}$.

Шаг 9 (W9) – входные параметры $R(9) = \{\text{АМТПП ГС}\}$, результат = $\{\text{вариант использования блоков АМТПП ГС, наполнение банка данных временных параметров}\}$, выходные параметры $H(9) = \{\text{возврат данных, анализ новых условий эксплуатации, обучение РНС посредством отбора рациональных структур АМТПП, ЛГ АМТПП и времен ТТП}\}$.

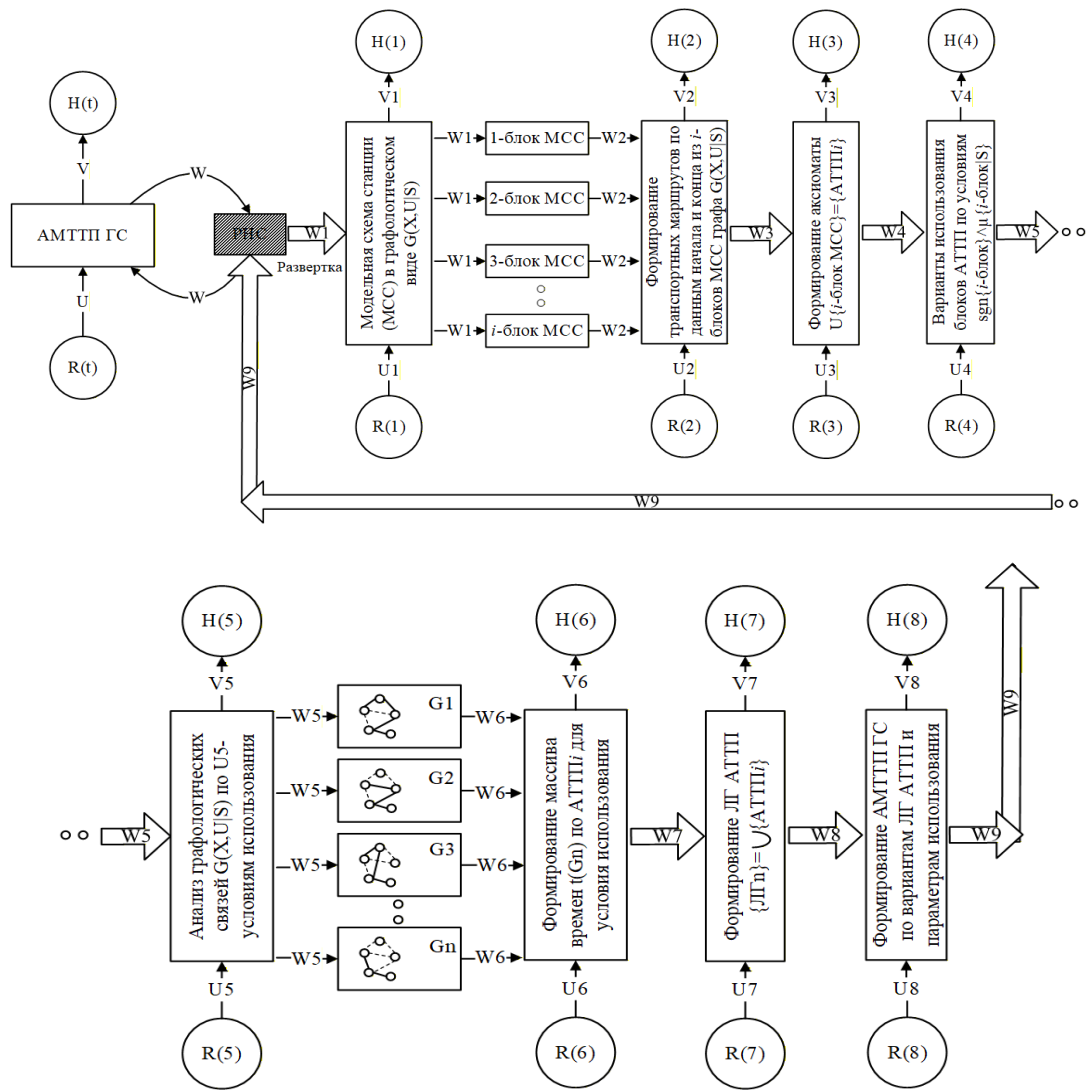


Рисунок 3.9 – РНС графологического формирования АМТПП:

$G(X, U|S)$ – графологическая модель транспортного процесса; X – блок модели; $U|S$ – связи блоков модели по S -условиям организации транспортного процесса

Применение цифровых решений и программных пакетов аналитического моделирования в управлении транспортной работой позволяет сократить временные рамки экспериментов. Данный подход закладывает основы аксиоматного логико-функционального проектирования ТТС, которые могут быть использованы в создании цифровых моделей (двойников) транспортных объектов и интеллектуализации принятия управленческих решений. Логико-функциональное проектирование ТТС, масштабированное на ОТИ, представлено в Приложении Б.

Например, процесс построения базовой аксиоматной модели (АМТПП-Б) взаимодействия водного (АТПВТ) и железнодорожного транспорта на примере припортовой станции «Н» представлен на рисунке 3.10. В рамках моделирования выделены логические группы АМТПП станции «Н» и причалов порта, где $\mu(T_i)$, $\mu(GFP_i)$, $\mu(G_i)$, $\mu(V_i)$ – нечеткие множества параметров.

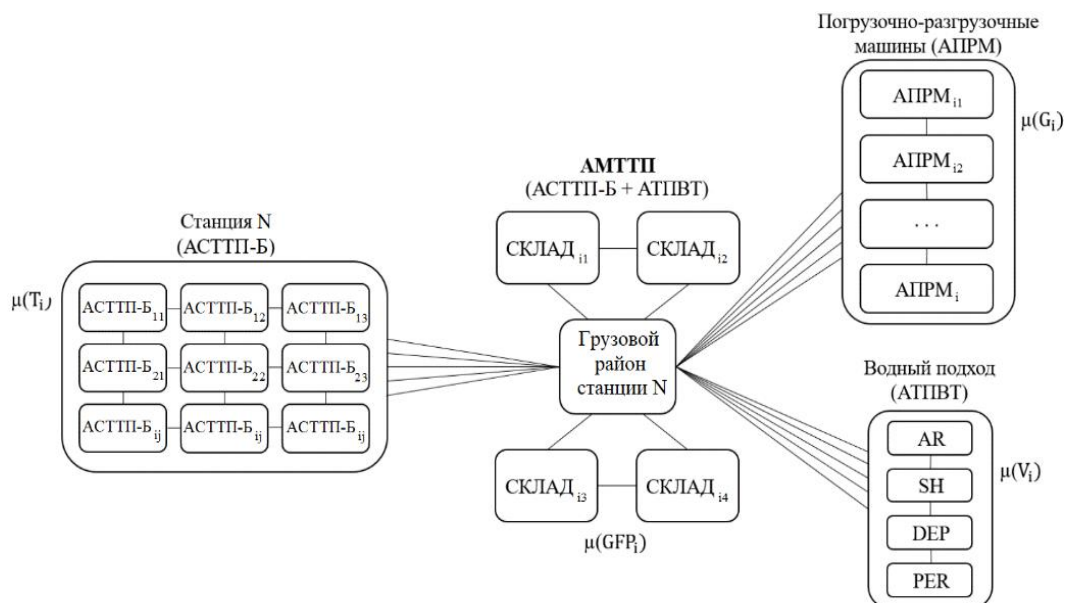


Рисунок 3.10 – Логические группы аксиоматной модели взаимодействия водного и железнодорожного транспорта

Базовая аксиоматная модель АМТПП-Б разбита на 4 составляющие логические группы: 1 – аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов (АСТТП: $\{GL1 \leftrightarrow PG1 \leftrightarrow \theta(SU) \leftrightarrow PS \leftrightarrow GFP1\}$); 2 – аксиоматы технологических процессов водного транспорта (АТПВТ: $\{PER \leftrightarrow SH \leftrightarrow DEP\}$); 3 – аксиоматы транспортно-складских процессов (АТСП: $\{\theta(PRM_i) \leftrightarrow DWL * Q_i \leftrightarrow WRN \leftrightarrow \theta(PRM_i)\}$); 4 – аксиоматы технологических процессов погрузочно-разгрузочных машин, задействованных в грузовой работе складов (АПРМ).

Для осуществления перехода от АМТПП-Б к АМТПП-М применимы методы обработки данных, основанные на принципах РНС, ТАС и ТНМ. Применяя один из выше перечисленных методов обработки информации транспортного объекта, базовая аксиоматная модель становится модернизированной 1-го уровня сложности.

При комбинированном применении АМТПП-М может принять 2-й или 3-й уровень сложности.

Интерпретируя [210, 211], важно отметить, что РНС способна учитывать предыдущие параметры наблюдения, т.е. работать с последовательностью событий транспортных объектов. Известно, что новый временной параметр аксиоматы станционных транспортно-технологических процессов (АСТТП) $t+1$ по новой модели АМТПП-М зависит от нормативного (эталонного) значения аксиомат (АСТТП) t и прошлых значений аксиомат (АСТТП) $t-1$ по варианту уже выполненной работы – базовой АМТПП-Б.

Эти изменения возможно учитывать в моделях управления согласно архитектуре нейронной сети состоящей из трех слоев параметров времен моделей АМТПП, включающих набор значений аксиомат АСТТП: 1 – входной слой Х (базовая модель АМТПП-Б), 2 – скрытый слой Н (нормативные/эталонные значения набора параметров АСТТП по возможным вариантам местной работы станции); 3 – выходной слой У (модифицированная модель АМТПП-М с учетом новых условий управления транспортной работой и новых времен АСТТП). При этом веса АСТТП и временное смещение между входным (базовым) и скрытым слоями обозначаются как $W(\text{АСТТП})_{\text{ХН}}$ и $b(\text{АСТТП})_{\text{Н}}$ соответственно; веса и смещение между скрытым и выходным (модифицированным/прогнозируемым) слоем как $W(\text{АСТТП})_{\text{НУ}}$ и $b(\text{АСТТП})_{\text{У}}$. В архитектуру РНС вводится набор весов установленных (эталонных) параметров времен аксиомат $W(\text{АСТТП})_{\text{НН}}$, который позволит учитывать значения предыдущих времен АСТТП при прогнозировании очередного временного значения параметра транспортной работы по варианту управления. Укрупненная архитектура сети представлена на рисунке 3.11.

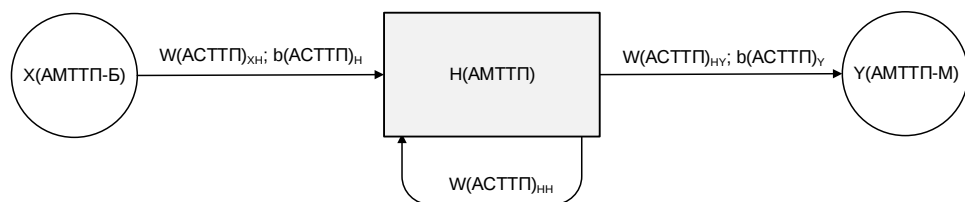


Рисунок 3.11 – Архитектура РНС аксиоматного моделирования

Процесс моделирования начинается с подачи на вход параметров временных данных АСТТП существующей (базовой) АМТПП-Б – $X(AMTTP-B)_{t-1}$, затем значения умножаются веса входного слоя аксиомат $W(ACSTTP)_{XH}$, добавляются временные смещения согласно стратегии управления $b(ACSTTP)_H$ и данные пропускаются через функцию активации F . Находятся значения АСТТП скрытого слоя $H(AMTTP)_{t-1}$.

Семантика выполняемого процесса имеет вид:

$$H(AMTTP)_{t-1} = F \{W(ACSTTP)_{XH} \cdot X(AMTTP-B)_{t-1} + b(ACSTTP)_H\}.$$

Так как АСТТП являются связанными технологическими процессами, то умножая их времена на веса $W(ACSTTP)_{HY}$ и учитывая смещение $b(ACSTTP)_Y$ выходного слоя получаем существующее первое прогнозное значение $Y(AMTTP)_t$:

$$Y(AMTTP)_t = W(ACSTTP)_{HY} \cdot H(AMTTP)_{t-1} + b(ACSTTP)_Y.$$

Прогноз значений времен модели АМТПП сделан на текущий момент управления, результаты которого могут быть уже известны. Интерес вызывает прогноз значений времен АСТТП по будущим вариантам управления, согласно стратегии технологического развития или изменений местной работы станции.

Для этого одновременно используются временные значения АСТТП на текущий момент $X(AMTTP-B)_t$ и значение скрытого слоя на предыдущем варианте управления $H(AMTTP)_{t-1}$ в виде:

$$H(AMTTP)_t = F \{W(ACSTTP)_{XH} \cdot X(AMTTP-B)_t + W(ACSTTP)_{HN} \cdot H(AMTTP)_{t-1} + b(ACSTTP)_H\}.$$

Далее определяются прогнозные значения аксиомат модели $Y(AMTTP-M)_{t+1}$:
 $Y(AMTTP-M)_{t+1} = W(ACSTTP)_{HY} \cdot H(AMTTP)_t + b(ACSTTP)_Y.$

В результате можно сказать, что формируется два «экземпляра» аксиоматных архитектур РНС с петлей, что позволяет «разворачивать технологический процесс» АСТТП и «обучать» ячейки сети (рисунок 3.12).

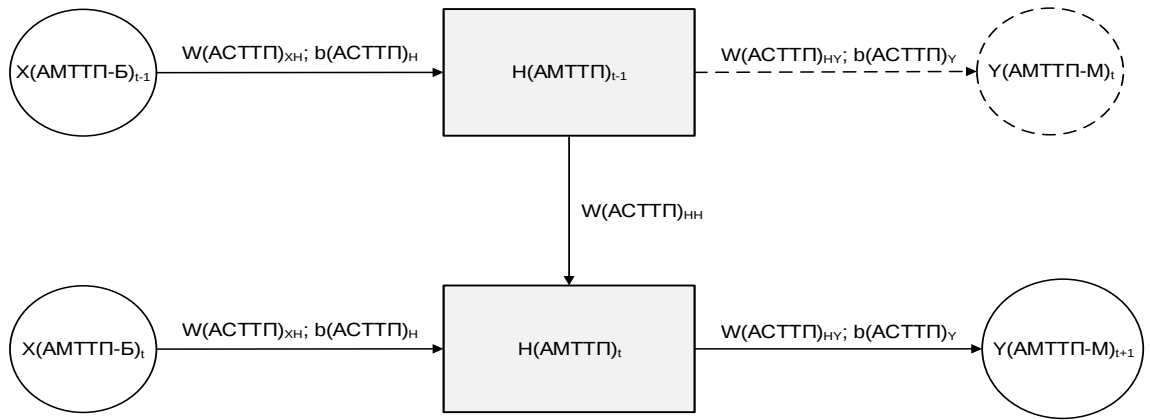


Рисунок 3.12 – Развитие архитектуры РНС с аксиоматной «петлей»

Ограничения параметров РНС аксиоматного моделирования:

1 – параметры $W(AMTTP)_{XH}$, $b(AMTTP)_H$, $W(AMTTP)_{HH}$, $W(AMTTP)_{HY}$, $b(AMTTP)_Y$ постоянны для всех шагов – циклов расчета РНС АМТП;

2 – количество циклов расчета вариантов нейросетевого управления транспортной работой станции может быть различным в зависимости от «длины» (количества технологических блоков) аксиоматы;

3 – ячейка РНС вариантов аксиоматного управления может выдавать выходное значение $Y(AMTTP-M)_{t+1}$ или быть « $\emptyset$ », в зависимости от того, используется ли конкретная АСТТП из набора вариантов аксиомат прогнозной модифицированной модели АМТП-М или нет (рисунок 3.13).

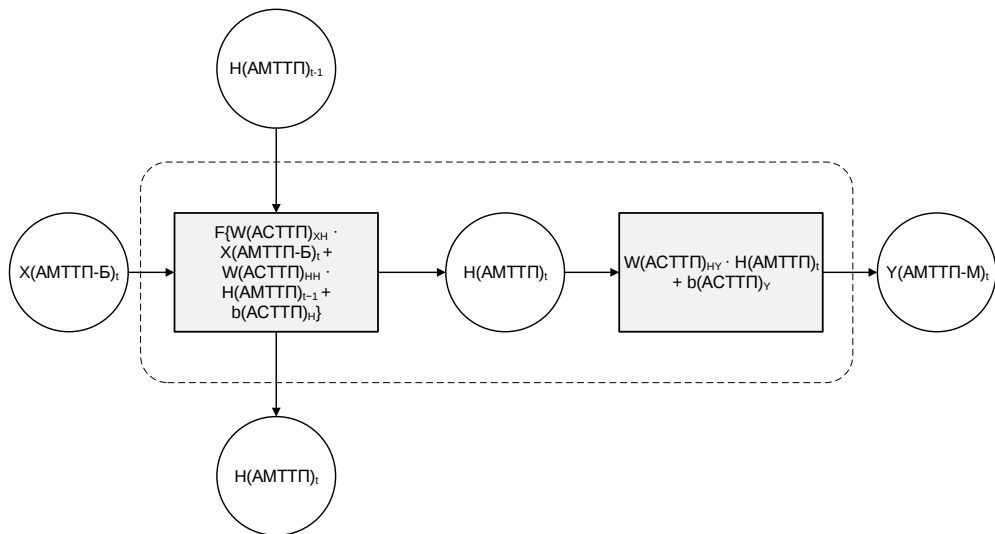


Рисунок 3.13 – Схема управления прогнозом РНС АМТП

В зависимости от того, сколько входов $\forall(X)$ – аксиомат АМТПП-Б и выходов $\forall(Y)$ – 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:

1 - «много в один» (many-to-one) – «МвО»: из множества аксиомат входа $X(\text{АМТПП-Б})$ выбирается одна наиболее рациональная аксиомата выхода $Y(\text{АМТПП-М})$ для данного варианта управления;

2 - «один во много» (one-to-many) – «ОвМ»: аксиомата входа $X(\text{АМТПП-Б})$ в прогнозируемом варианте управления разделяется на несколько аксиомат выхода $Y(\text{АМТПП-М})$;

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

3.6 Критерии оценки эффективности цифровизации систем управления транспортным производством

Традиционные методы анализа массивов данных становятся недостаточными, что обуславливает необходимость внедрения все более современных подходов, основанных на принципах нейронных сетей, машинном обучении и искусственном интеллекте. В условиях мультимодальных транспортных систем, где железнодорожный транспорт взаимодействует с другими видами транспорта, вопрос составления баз данных, включающий в себя их структуру и логику построения, является критически важным для обеспечения эффективности и надежности работы ИТС [213].

Основная проблематика формирования массивов данных ИТС заключается в:

- разрозненности данных, которые часто хранятся в различных, лишь косвенно связанных между собой системах и базах, что затрудняет их интеграцию и

комплексный анализ, причем различные ИТС часто используют свои стандарты и форматы баз данных;

- недостаточной интеграции систем, при которой системы управления и информационные платформы не обеспечивают совместимость и обмен данными в реальном времени, что приводит к задержкам в передаче информации и снижает оперативность управления;

- ограниченных возможностях обработки данных, когда традиционные системы не рассчитаны на большие объемы данных и сложные аналитические задачи/

Дальнейшее развитие принципов реализации структуризации и организации массивов данных ИТС, на которых реализовано аксиоматное моделирование транспортных систем представлено в таблице 3.9. Применение данных принципов позволит также обеспечить высокую точность работы ИТС, сокращение времени обработки информации, повышение уровня «доверия» к данным, получаемых системой и исходящих из неё подсистем.

Таблица 3.9 – Развитие принципов реализации структуризации и организации массивов данных ИТС при реализации аксиоматного моделирования

Принцип структуризации	Краткое описание	Методы реализации
Системность	Обеспечение целостного и интегрированного подхода при формировании единого информационного пространства (ЕИП) как неотъемлемой части цифровой логистики	- Интеграция различных информационных систем для обеспечения единого потока данных; - Стандартизация форматов данных и протоколов обмена для обеспечения совместимости; - Разработка единой архитектуры и общей модели данных для всех участников процесса/
Интерпретируемость	Представление информации в доступной и понятной форме для всех участников цепей поставок, с соблюдением необходимых нормативных требований	- Использование стандартизированных форматов данных для облегчения понимания; - Разработка пользовательских интерфейсов с учётом пользовательского опыта и интуитивно понятного интерфейса; - Обеспечение соответствия нормативным и отраслевым стандартам/
Прозрачность	Обеспечение открытости и доступности информации о процессах и данных для участников системы управления цепями поставок в общедоступной форме и формате	- Создание платформ для обмена информацией, свободного доступа к данным; - Использование систем отслеживания и аудита данных; - Соблюдение требований по раскрытию информации и стандартов отчётности.
Доступность	Гарантирование доступа к информационной базе <i>Big Data</i> всем участникам цепей поставок и контролирующим государственным органам	- Разработка безопасных механизмов доступа к данным, протоколов безопасности для защиты информации; - Использование облачных технологий для масштабируемости и доступности; - Обеспечение высокой надёжности и отказоустойчивости систем на основе резервирования/
Взаимодействие	Обеспечение эффективного взаимодействия информационно-технических систем хранения и обработки <i>Big Data</i> уни- и мультимодальных систем доставки, включая SAN и облачные технологии	- Реализация стандартизированных протоколов взаимодействия для обмена данными; - Использование (программный интерфейс приложений) <i>API</i> для интеграции систем и взаимодействия между приложениями; - Интеграция инфраструктур SAN и облачных хранилищ данных; - Применение микросервисной архитектуры из независимых модулей для облегчения обновления и расширения.

Критериальная оценка баз данных параметров управления технологическими процессами в транспортных системах — это процесс анализа и сравнения различных баз данных, используемых для управления и оптимизации работы. Основная цель — определить, насколько эффективно базы данных поддерживают управление технологическими процессами, обеспечивают точность, актуальность и полноту данных, а также способствуют принятию оптимальных решений. К наиболее важным критериям оценки структуризации и организации баз данных интеллектуальных транспортных систем относится стационарность информации.

Стационарность — это свойство данных, при котором их статистические характеристики (среднее значение, дисперсия, автокорреляция) остаются постоянными во времени. В контексте интеллектуальных транспортных систем стационарность данных важна для корректного анализа, прогнозирования и моделирования. Например, данные о вагонообороте на грузовой станции могут содержать тренды, сезонность или другие нестационарные компоненты, что затрудняет их использование в моделях машинного обучения или статистических методах.

Стационарность данных объектов транспортной инфраструктуры необходимо увеличивать для реализации следующих эффектов:

- устранения тренда и сезонности: показатели работы станции часто содержат тренд сезонности (например, постепенное галопирующее увеличение объема перевозок) и сезонность (пики нагрузки в определенные времена года, месяца, недели). Как тренд, так и сезонность, делают данные нестационарными, что существенно затрудняет построение точных прогнозов с применением искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в ИТС.

- комплексного увеличения качества модели интеллектуальной системы: для этого необходимо сделать данные стационарными, так как многие методы прогнозирования (ARIMA, ИИ, МО), предполагают стационарность данных, а в ином случае модели могут давать некорректные прогнозы и «иллюзии».

- снижение ошибок прогнозирования работы ИТС: нестационарные данные могут приводить к повышенному количеству ошибок прогнозирования, так как модели будут «ловить» тренд и сезонность вместо реальных закономерностей.

- упрощенная интерпретация модели: стационарные данные проще подвергаются интерпретации, так как не содержат в себе сложных зависимостей, что упрощает функционирование модели.

Рассмотрим стационарность на примере технико-технологических данных о количестве вагонов, обрабатываемых на грузовой станции «РТ» за сутки (рисунок 3.15). Эти данные, предусматривая их специфику, могут содержать: тренд (увеличение или уменьшение количества вагонов с течением времени); сезонность (периодические колебания – увеличение загрузки станции в определенные дни недели или месяцы); «шум» (случайные колебания, не связанные с трендом или сезонностью).

Для первичной проверки стационарности баз данных транспортного объекта (грузовой станции) был разработан авторский программный продукт в системе кода Python с учетом использования и взаимодействия со стандартными библиотеками: pandas, numpy, matplotlib (рисунок 3.14).

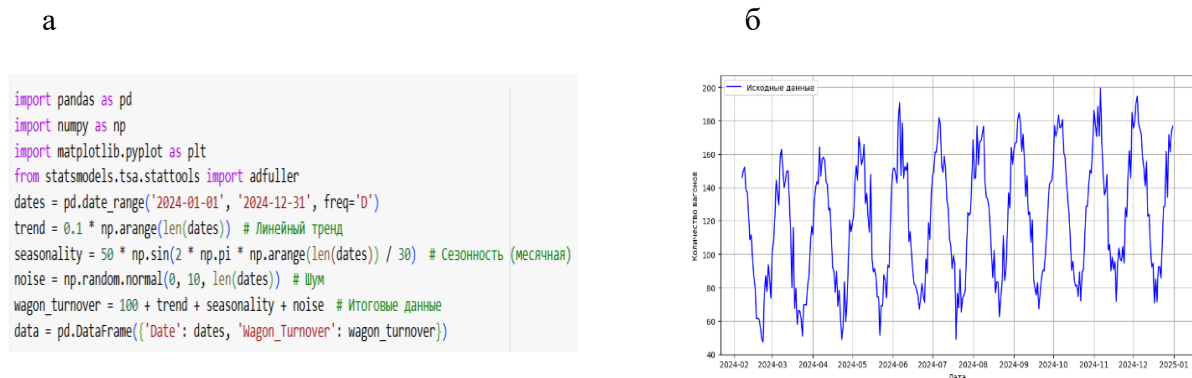


Рисунок 3.14 – Обработка баз данных показателей работы грузовой станции «РТ» в коде Python:

а – фрагмент кода программы генерации исходных данных;

б – график данных грузовой станции «РТ»

Прежде чем перейти к практическому применению методов повышения стационарности баз и массивов данных интеллектуальных транспортных систем, целесообразно рассмотреть в аналитическом виде особенности использования теста Дики-Фуллера. Данный статистический инструмент предназначен для проверки наличия единичного корня во временных рядах, что является ключевым индикато-

ром нестационарности анализируемых данных. В рамках проводимого исследования указанный тест был использован для проверки стационарности баз данных показателей работы грузовой станции «РТ», что позволило оценить пригодность исходных массивов к дальнейшей алгоритмической обработке и определить необходимость их предварительного преобразования.

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \phi y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \gamma_i \Delta y_{t-i} + \epsilon_t, \quad (3.2)$$

где y_t - количество вагонов в день t ; Δy_t – разница между количеством вагонов в день t и день $t-1$; α – константа (сдвиг); βt – линейный тренд; $\sum_{i=1}^p \gamma_i \Delta y_{t-i}$ – разности учета автокорреляции; ϵ_t – потенциальная ошибка модели (шум).

Авторский код программы представлен на рисунке 3.15.

```
data['Wagon_Pot_diff'] = data['Wagon_Pot'].diff()
data = data.dropna()
result_diff = adfuller(data['Wagon_Pot_diff'])
print('ADF Statistic (дифференцированные данные):', result_diff[0])
print('p-value (дифференцированные данные):', result_diff[1])
if result_diff[1] > 0.05:
    print("Дифференцированные данные все еще нестационарны")
else:
    print("Дифференцированные данные стационарны")
```

Рисунок 3.15 – Программная библиотека проверки стационарности баз данных показателей транспортного объекта с помощью теста Дики-Фуллера

В результате теста стационарности массива данных получено, что исходные данные оказались нестационарны. Рассмотрим методы повышения стационарности баз данных ИТС, представленные в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Методы повышения стационарности баз данных ИТС

Метод	Формула	Отличительная особенность метода
Дифференцирование	$\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$	- Удаляет тренд, оставляя сезонность и шум; - Полезно для работы с нестационарными данными
Логарифмическое преобразование	$\log(y_t)$	- Преобразует данные для стабилизации дисперсии. - Особенно полезно для данных с экспоненциальным ростом
Сезонное дифференцирование	$\Delta_s y_t = y_t - y_{t-s}$	- Удаляет сезонность, оставляя тренд и шум; - Используется для данных с выраженной сезонностью.
Скользящее среднее	$MA_t = \frac{1}{w} \sum_{i=0}^{w-1} y_{t-i}$	- Сглаживает данные, удаляя шум и краткосрочные колебания; - Используется для выделения долгосрочных трендов.

Применим метод дифференцирования, заключающийся в удалении тренда путем вычитания предыдущего значения данных из текущего. Разработанная авторская программная библиотека применения метода дифференцирования массивов данных показателей работы грузовой станции представлена на рисунке 3.16.

Использование метода логарифмического преобразования для стабилизации дисперсии данных данных показателей работы грузовой станции в авторской программной библиотеке языка Python показано на рисунке 3.17.

а

```
data['Wagon_Pot_diff'] = data['Wagon_Pot'].diff()
data = data.dropna()
result_diff = adfuller(data['Wagon_Pot_diff'])
print('ADF Statistic (дифференцированные данные):', result_diff[0])
print('p-value (дифференцированные данные):', result_diff[1])
if result_diff[1] > 0.05:
    print("Дифференцированные данные все еще нестационарны")
else:
    print("Дифференцированные данные стационарны")
```

б



Рисунок 3.16 – Применение метода дифференцирования массивов данных показателей работы грузовой станции «РТ»:

а – фрагмент кода программы дифференцирования;

б – график данных грузовой станции «РТ» после дифференцирования

а

```
data['Wagon_Pot_log'] = np.log(data['Wagon_Pot'])
result_log = adfuller(data['Wagon_Pot_log'].dropna())
print('ADF Statistic (логарифмированные данные):', result_log[0])
print('p-value (логарифмированные данные):', result_log[1])
if result_log[1] > 0.05:
    print("Логарифмированные данные все еще нестационарны")
else:
    print("Логарифмированные данные стационарны")
```

б

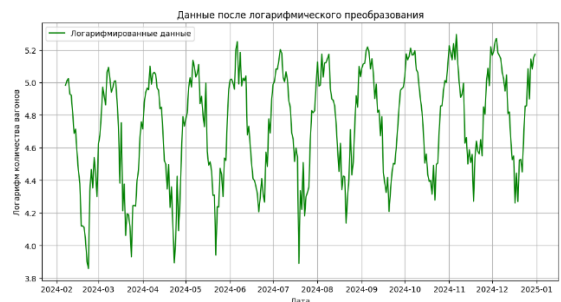


Рисунок 3.17 – Применение метода логарифмического преобразования массивов данных показателей работы грузовой станции «РТ»:

а – фрагмент кода программы логарифмического преобразования;

б – график данных грузовой станции «РТ» после логарифмического преобразования

Применение метода удаления сезонности на основе сезонного дифференцирования массивов данных показателей работы грузовой станции в авторской программной библиотеке языка Python показано на рисунке 3.18.

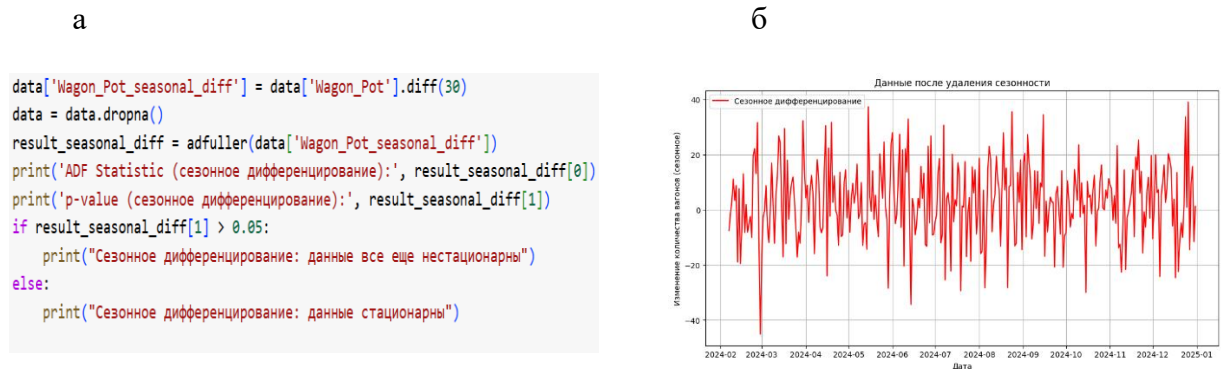


Рисунок 3.18 – Применение метода удаления сезонности массивов данных показателей работы грузовой станции «РТ»:

- а – фрагмент кода программы удаления сезонности массивов данных;
б – график данных грузовой станции «РТ» после удаления сезонности массивов данных

Использование метода скользящих средних для сглаживания массивов данных показателей работы грузовой станции в авторской программной библиотеке языка Python показано на рисунке 3.19.

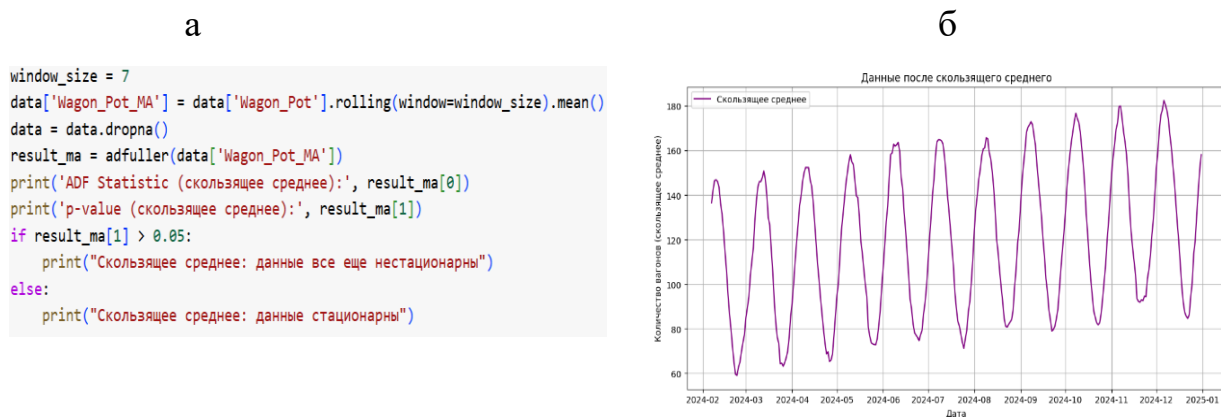


Рисунок 3.19 – Применение метода скользящих средних массивов данных показателей работы грузовой станции «РТ»: а – фрагмент кода программы скользящих средних массивов данных; б – график данных грузовой станции «РТ» после применения метода скользящих средних массивов данных

Таким образом, с помощью четырех представленных методов, можно повысить уровень стационарности массивов и баз данных, содержащих в себе показатели работы грузовой станции «РТ». Повышение уровня стационарности данных является необходимым компонентом улучшения качества работы и прогнозирования интеллектуальных транспортных систем (ИТС) с применением методов и технологий искусственного интеллекта, машинного обучения, а также статистических моделей (например ARIMA).

Цифровизация процессов железнодорожного транспорта является ключевым фактором повышения его эффективности работы. Интеллектуальные транспортные системы, основанные на грамотно построенных базах данных, играют важную роль в этом процессе. Построение структуры баз данных для ИТС требует учета множества факторов, включая объемы данных, их источники, требования к скорости и качеству обработки. Предложенные критерии оценки баз данных ИТС, позволяют более полно оценить их эффективность и соответствие современным требованиям безопасной эксплуатации. Внедрение этих критериев в практику оценки баз данных ИТС может способствовать дальнейшему развитию цифровизации железнодорожного транспорта и повышению его конкурентоспособности на мировом рынке.

3.7. Выводы по главе

В третьей главе диссертационной работы на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований развития методов управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами (ТТП) на принципах цифрового аксиоматного системотехнического моделирования (АСТМ) сформулированы следующие основные выводы.

1. Разработаны методологические основы цифрового аксиоматного моделирования транспортной работы. Установлено, что аксиоматное моделирование базируется на понятии «аксиомата» — алгоритма, представляющего собой набор

определённых действий, связанных между собой по устойчивой логике последовательности выполнения транспортных событий. Совокупность аксиомат, выполняющих массив транспортных задач, образует аксиоматную модель транспортно-технологических процессов (АМТП). Определено, что аксиоматное моделирование имеет связь с классическим многоуровневым программированием и интегрируется с принципами рекуррентных нейронных сетей (РНС), теории активных систем (ТАС) и теории нечётких множеств (ТНМ).

2. Сформирована структура уровней цифрового аксиоматного моделирования мультимодальных ТТП. Выделены два основных типа объектов моделирования: мультимодальные узловые транспортные системы (на примере припортовых железнодорожных станций) и линейные инфраструктурные объекты. Для каждого типа предложены соответствующие логические группы аксиомат. В рамках узлового моделирования выделены аксиоматы стационарных транспортно-технологических передвижений (АСТТП), аксиоматы технологических процессов водного транспорта (АТПВТ), аксиоматы транспортно-складских процессов (АТСП) и аксиоматы процессов погрузочно-разгрузочных машин (АПРМ). Для линейных объектов акцент сделан на аксиоматизации перегонных процессов и процессов диспетчерского управления.

3. Развита метод решения транспортных конфликтов в системе цифрового аксиоматного моделирования. Предложена системная классификация транспортных конфликтов: первого рода (одна и та же АТП требует в один момент времени), второго рода (одноуровневое пересечение маршрутов с общими участками и стрелочными переводами), третьего рода (смешанный конфликт). На основе комбинаторных методов и теории вероятностей построена вероятностная модель условий возникновения транспортных конфликтов. Определены два варианта состояния пересечения маршрутов: отсутствие пересечения по технологии управления ($\{АТП1\} \cap \{АТП2\} = \emptyset$) и наличие одноуровневого пересечения с временными параметрами ($\{АТП1\} \cap \{АТП2\} = \text{Pr}12\{АТП1, АТП2, R(t12)\}$). Условие допустимости загрузки пересечения: $T_{\text{загр}} < T_r$ (при неравномерном движении за расчётный период принимается период наиболее интенсивной работы).

4. Сформирован математический инструментарий аксиоматики стационарных транспортно-технологических передвижений (АСТТП) в условиях нечёткого системотехнического моделирования. Введены нечёткие множества параметров аксиомат: $\mu A(SU)$ — нечёткие условия эксплуатации сортировочного устройства, $\mu A(PSO)$ — нечёткие условия эксплуатации сортировочно-отправочного парка, $\mu A(FS)_k$ — нечёткие условия эксплуатации грузовых фронтов. Разработан алгоритм развёртки рекуррентных нейронных сетей при формировании вариантов АТПП в виде последовательности шагов $W1-W9$, включающий: входные параметры (схема станции, технологические времена, пропускная способность, вероятностные матрицы связей), формирование транспортных маршрутов, формирование аксиомат АМТПП, анализ графологических связей $G(X, U|S)$, оценку степени нечёткости использования, формирование логических групп АМТПП и обучение РНС посредством отбора рациональных структур.

5. Предложены критерии оценки эффективности цифровизации систем управления транспортным производством. К таким критериям отнесены: стационарность информации (постоянство статистических характеристик данных во времени), интерпретируемость (доступность и понятность информации для всех участников), прозрачность (открытость процессов и данных), доступность (гарантированный доступ к информационной базе), взаимодействие (эффективное взаимодействие информационно-технических систем). Для проверки стационарности данных предложено использование теста Дики–Фуллера, а для её повышения — методы дифференцирования, логарифмического преобразования, сезонного дифференцирования и скользящих средних. Установлено, что повышение стационарности данных является необходимым компонентом улучшения качества работы и прогнозирования интеллектуальных транспортных систем с применением искусственного интеллекта и машинного обучения.

6. Реализована программная апробация разработанных методов на примере грузовой припортовой станции «Г» и Новороссийского транспортного узла. С использованием авторского программного комплекса «Axiomatic v.1» (свидетельство о регистрации № 2022681955) и АМПВ v. 1.0 (свидетельство о регистрации №

2026683768) выполнено 100 итераций моделирования взаимодействия АТПП1 и АТПП2. Установлено, что продолжительность занятия элемента одноуровневого пересечения при учёте транспортных конфликтов возрастает: для АТПП1 — с 4,22 до 4,45 часа, для АТПП2 — с 7,56 до 7,8 часа. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта транспортных конфликтов при выборе вариантов цифровых управленческих решений.

7. Доказано, что развитие методики цифрового аксиоматного системотехнического моделирования позволяет не только аналитически вычислять параметры и выбирать наиболее целесообразные по временным характеристикам существующие варианты логических групп модулей аксиоматной модели, но и строить новые логические последовательности транспортных событий. Аксиоматное моделирование на данный момент «переживает» этап становления как отдельной теории цифровизации транспортно-технологических процессов, имея большой потенциал к развитию путём интеграции с принципами интеллектуального машинного обучения, нейросетевых моделей и теории нечётких множеств. Полученные в главе результаты являются основой для последующего анализа и оценки эффективности предлагаемых методов управления в реальных условиях эксплуатации железнодорожных транспортных систем.

4 ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ КОНФЛИКТОВ НА ОСНОВЕ ДВУХУРОВНЕВОЙ РНС-АРХИТЕКТУРЫ С МАСШТАБИРОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предыдущих главах настоящей работы были формализованы базовая (АМТПП-Б) и модернизированная (АМТПП-М) аксиоматные модели транспортно-технологических процессов, предложена системная классификация транспортных конфликтов I, II и III рода, а также разработаны методы повышения стационарности баз данных параметров управления. Данные теоретические и методические разработки создали необходимую основу для перехода к решению ключевой прикладной задачи - прогнозирования транспортных конфликтов в реальном времени и адаптивного выбора рациональных аксиомат сценариев транспортного производства.

Однако традиционные подходы к управлению транспортными процессами, базирующиеся на статических вероятностных оценках и фиксированных нормативах времени выполнения технологических операций, имеют существенные ограничения. Согласно результатам проверки с помощью расширенного теста Дики–Фуллера (ADF), временные ряды параметров выполнения аксиомат являются нестационарными: значения имеют единичные корни и не могут быть описаны стационарными статистическими моделями. Это означает, что классическая статическая оценка, не отражает реальную оперативную обстановку и не позволяет прогнозировать возникновение конфликтных ситуаций с учётом предыстории событий и текущего контекста.

Кроме того, эмпирические подходы, широко применяемые в существующей практике, не учитывают динамику изменения поездопотоков, погодно-климатические факторы, изменения технологических окон и другие переменные, оказывающие непосредственное влияние на занятость элементов инфраструктуры. Как следствие - статические модели зачастую дают существенные ошибки прогноза, что приводит к неэффективным управленческим решениям, увеличению времени простоя подвижного состава и снижению пропускной способности узловых систем.

В связи с этим возникает объективная необходимость в разработке динамической модели прогнозирования транспортных конфликтов, которая:

- учитывала бы предысторию технологических процессов (последовательности выполненных аксиомат);
- позволяла формировать прогноз на различных временных горизонтах (стратегический и тактический уровни);
- обеспечивала адаптивный выбор аксиоматы в условиях нечёткой и изменяющейся оперативной обстановки;
- обладала свойством масштабируемости для переноса обученных моделей между различными объектами транспортной инфраструктуры.

Решению этих задач посвящена настоящая глава, в которой разрабатывается программный комплекс прогнозирования транспортных конфликтов на основе двухуровневой РНС-архитектуры с масштабированием результатов.

4.1 Постановка задачи прогнозирования транспортных конфликтов и логики выбора аксиомат

Согласно п. 3.1, в транспортно-технологической системе при известных параметрах транспортного производства необходимо таким образом организовать технологическое управление, чтобы параметры транспортных процессов при условии минимизации возможных транспортных конфликтах, были наиболее рациональными. Это означает, что управляющие воздействия должны формироваться с учётом текущей загрузки инфраструктуры, доступных ресурсов и приоритетов обслуживания, обеспечивая согласованное взаимодействие всех элементов системы. Достижение такой согласованности требует перехода от локальной оптимизации отдельных операций к комплексному управлению сквозными транспортно-технологическими циклами, охватывающими приём, переработку и отправку вагонопотоков. В этих условиях особую значимость приобретают методы формализованного описания взаимосвязей между параметрами процессов, позволяющие заранее выявлять потенциально конфликтные ситуации и формировать превентивные

управляющие решения. Рациональная организация технологического управления, таким образом, становится ключевым условием повышения пропускной способности, снижения непроизводительных простоев и обеспечения устойчивости функционирования транспортной системы в целом.

В основе такого подхода лежит необходимость не просто адаптивного реагирования на возникающие рассогласования в работе звеньев транспортной сети, а заблаговременного прогнозирования развития процессов на основе математических моделей, интегрирующих дискретные состояния инфраструктурных объектов, временные интервалы выполнения операций и вероятностные характеристики внешних возмущений. Для этого аксиоматика АСТТП выполняет роль унифицированного базиса, позволяющего единообразно описывать разнородные по физической природе операции (перегрузку, сортировку, накопление, подачу-уборку) через общие параметрические ряды - длительности, фронты работ, вместимость путей и складов, а также логические условия их последовательности или параллельности. Такая формализация даёт возможность строить сводные циклограммы сквозных потоков, выявлять «узкие горлышки» на стыках между элементами системы и количественно оценивать запас пропускной способности. Подобные решения рассмотрены для трех типов объектов транспортной инфраструктуры: мультимодальный транспортный узел (МТУ), железнодорожную станцию (ЖДС) и транспортно-складской комплекс (ТСК). Для каждого объекта определён набор аксиомат АСТТП, отражающих типовые технологические операции, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Библиотека модулей усовершенствованных аксиоматических моделей железнодорожной станции

Тип объекта	Обозначение модуля в РНС	Краткая характеристика модуля в РНС
Мультимодальный транспортный узел (МТУ)	μ(M_PP)	Причальный перегрузочный комплекс
	μ(M_SP)	Склад перевалки (буферный накопитель)
	μ(M_TG)	Терминал тылового грузового фронта
	μ(M_RP)	Рейдовый перегрузочный комплекс
	μ(M_ZP)	Зона предпортового отстоя вагонов с опасными грузами
	μ(M_KS)	Конвейерно-судопогрузочный комплекс (навалочные грузы)
	μ(M_IR)	Интерфейсный район «станция-порт»
	μ(M_RF)	Ремонтный фронт портовой механизации
	μ(M_LF)	Логистический фронт накопления судовой партии
Железнодорожная станция (опционально МТУ)	μ(PP)	Пассажирский приемоотправочный парк
	μ(PG)	Грузовой приемоотправочный парк
	μ(PS)	Сортировочный парк
	μ(PR)	Районный парк
	μ(PSO)	Сортировочно-отправочный парк
	μ(PV)	Выставочный (обменный) парк
	μ(PO)	Пути/парк отстоя пассажирских составов
	μ(PPV)	Парк подготовки вагонов (цистерн)
	μ(GFO)	Грузовые фронты мест общего пользования
	μ(GFN)	Грузовые фронты мест необщего пользования
	μ(GFP)	Погрузочно-выгрузочные пути (фронты, причалы) порта
	μ(FS/FN)	Фронты слива/налива нефтепродуктов
	μ(LH)	Локомотивное хозяйство
	μ(VH)	Вагонное хозяйство
	μ(BO)	Багажное отделение станции
	μ(SU)	Сортировочные устройства (горки, полугорки, вытяжные пути)
Транспортно-складской комплекс (опционально МТУ)	μ(VHA)	Въезд/выезд с территории
	μ(PGR)	Погрузка грузовых автомобилей
	μ(VGR)	Выгрузка грузовых автомобилей
	μ(PZA)	Прямая перегрузка по варианту «железная дорога – автомобиль»
	μ(PAZ)	Прямая перегрузка по варианту «автомобиль - железная дорога»
	μ(SKL)	Крытый склад
	μ(PL)	Открытая грузовая площадка
	μ(ANG)	Ангар
Общий	μ(KRN)	Критические одноуровневые пересечения
	μ(KRR)	Критические одноуровневые пересечения
	μ(S)	Универсальный соединитель модуля

Предлагаемая архитектура, представленная в виде моделей в Приложении Б, в отличие от классических аксиоматных моделей с фиксированными временными параметрами, позволяет динамически перестраивать логику выбора управляющих решений в зависимости от текущей оперативной обстановки. Универсальность разработанного подхода заключается в возможности его конфигурации под конкретные производственные задачи линейного подразделения. На основе анализа функционала транспортных узлов и объектов транспортной инфраструктуры, включенных в них, выделены три ключевых сценария применения двухуровневой РНС-архитектуры, различающихся целевой функцией и горизонтом прогнозирования.

4.2 Архитектура двухуровневой РНС для прогнозирования транспортных конфликтов и сценарии транспортной работы

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

Сценарий 1 (регрессионное прогнозирование): статический параметр $\theta(\text{SU}) = \text{const}$ заменяется динамическим прогнозом на основе GRU/LSTM-сети:

$$\hat{t}_{i+1} = f_{\theta}([t_{i-K}, \dots, t_i], X_{\text{context}}), \quad (4.1)$$

где $K = 10$ – глубина анализируемой ретроспективы, X_{context} – вектор контекстных параметров, включающий показатели текущей загруженности инфраструктуры, погодно-климатические факторы и признак рабочей смены.

Данный сценарий представляет собой прогноз временных параметров выполнения аксиомат (адаптивная аксиоматная модель). В данном сценарии двухуровневая архитектура функционирует в режиме регрессии. Основная цель — замещение статических нормативных значений времени выполнения технологических операций (например, времени расформирования состава или времени подачи на грузовой фронт) динамическими прогнозными оценками, формируемыми на основе ретроспективных данных и текущей загрузки инфраструктуры. Полученные прогнозные значения передаются непосредственно в имитационную модель транспортного

узла, повышая адекватность отображения реальных производственных процессов в цифровом двойнике.

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.

Данный сценарий представляет собой детекцию и классификацию транспортных конфликтов до их наступления. Сценарий реализует функцию интеллектуального советчика диспетчерского персонала. Нейросетевой классификатор, анализируя последовательность выполняемых аксиомат, выявляет скрытые паттерны, предшествующие возникновению конфликтных ситуаций первого, второго и третьего рода. При обнаружении признаков предконфликтной ситуации на горизонте 15–30 минут система превентивно информирует оператора, предоставляя дополнительное время для корректировки плана маневровой работы без остановки технологического процесса.

Сценарий 3 (вероятностное ранжирование аксиомат): последовательность выбора АСТТП 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 $G(X, U|S)$:

$$P(a_j) = \text{softmax}(W \cdot h_t^{LSTM-2} + b), \quad (4.2)$$

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.

Данный сценарий представляет собой прогноз временных параметров выполнения аксиомат как динамический вес в графологической модели. Наиболее ресурсоемкий сценарий, реализующий полный функционал двухуровневой архитектуры. Выходные данные тактического LSTM-2 с механизмом внимания интерпретируются не как единственная рекомендация, а как вероятностное распределение

по множеству допустимых аксиомат. Это позволяет заменить полный комбинаторный перебор вариантов развития технологического процесса в графоаналитической модели $G(X, U|S)$ на целенаправленный выбор субоптимальной стратегии с учётом долгосрочного прогноза конфликтов, полученного от стратегического контура.

Для реализации представленных сценариев выполнения транспортно-технологической работы предлагается двухуровневая двухконтурная архитектура (РНС – рисунок гл. 3), включающая стратегический и тактический уровни управления.

Стратегический и тактический контуры управления транспортно-технологической работой LSTM-1 и LSTM-2 реализованы следующим образом:

Верхний уровень (стратегический) – LSTM-1

Верхний уровень предназначен для долгосрочного прогнозирования вероятностей транспортных конфликтов на горизонте 1–4 часа. Используется LSTM-сеть типа Many-to-Many. На вход подаётся ретроспектива состояний за последние $K = 6$ тактов:

$$X_{strat}^{(t)} = [S_{t-K}, S_{t-K+1}, \dots, S_{t-1}, S_t], \quad (4.3)$$

где $S_t \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния объекта (занятость элементов, временные параметры). Выход сети:

$$Y_{strat}^{(t+\tau)} = [P_{TK1}(t + \tau), P_{TK2}(t + \tau), P_{TK3}(t + \tau)]^T, \tau = 1, 2, 3, 4. \quad (4.4)$$

Нижний уровень (тактический) – LSTM-2 + Attention

Нижний уровень объединяет текущее состояние S_t с прогнозом верхнего уровня через механизм внимания. На вход подаётся конкатенация:

$$X_{tact}^{(t)} = [S_t \parallel Y_{strat}^{(t+1)}], \quad (4.5)$$

Весовые коэффициенты внимания вычисляются как:

$$\alpha_\tau = \frac{\exp(v^T \tanh(W_a h_{t-1} + U_a Y_{strat}^{(t+\tau)}))}{\sum_{j=1}^4 \exp(v^T \tanh(W_a h_{t-1} + U_a Y_{strat}^{(t+j)}))}, \quad (4.6)$$

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

Выходной слой softmax формирует вероятностное распределение по множеству аксиомат:

$$P(a_j) = \frac{\exp(W_j \cdot h_t^{LSTM2} + b_j)}{\sum_{k=1}^m \exp(W_k \cdot h_t^{LSTM2} + b_k)}, \quad (4.7)$$

Параметры двухуровневой двухконтурной РНС-архитектуры представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры двухуровневой РНС-архитектуры

Уровень	Тип РНС	Вход	Выход
Верхний (стратегический)	LSTM Many-to-Many	История состояний ($K = 6$)	Прогноз $P_{TK1}, P_{TK2}, P_{TK3}$ на $\tau = 1..4$ ч
Нижний (тактический)	LSTM Many-to-One + Attention	Текущее состояние + прогноз	Ранжированный список АСТТП

4.3 Масштабирование результатов РНС на основе теории категорий

При переходе от базовой аксиоматной модели (АСТТП-Б) к модифицированной (АСТТП-М) результаты РНС масштабируются по определённому закону. На примере времени простоя местного вагона введём коэффициент масштабирования:

$$d = \frac{t_{\text{стандарт по ТП}}}{t_{\text{факт по расчёту}}}, \quad (4.8)$$

Для рассматриваемого примера: $d = 2,5/4,5 = 0,556$. Установлена степенная связь между фактическим и стандартным временем:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{факт}}^d \text{ или } t_{\text{факт}} = t_{\text{ст}}^{1/d}, \quad (4.9)$$

Коэффициент подобия (инвариант гиперболических распределений):

$$d = \log_{t_{\text{факт}}} t_{\text{ст}}, \quad (4.10)$$

В терминах теории категорий (элементарный топос) вводится декартова замкнутость:

$$\text{hom}(t_{\text{факт}} \times C, t_{\text{ст}}) \cong \text{hom}(t_{\text{факт}}, t_{\text{ст}}^C), \quad (4.11)$$

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 Б (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 - $\text{hom}(t_{\text{факт}}, t_{\text{ст}}^C)$. 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, что подтверждено вычислительным экспериментом.

Практическая значимость введённого теоретико-категорного представления заключается в возможности формального переноса (функториального отображения) обученной нейросетевой модели с базового объекта транспортной инфраструктуры на топологически подобный объект без необходимости повторного сбора обучающей выборки и длительной процедуры оптимизации весов. Коэффициент подобия d , вычисляемый как логарифмический инвариант гиперболического распределения временных параметров, выступает в роли морфизма, переводящего выходной тензор прогнозов Y_{strat} в масштабированное представление, адекватное целевой инфраструктуре. 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» (Приложение Б).

Таблица 4.3 – Коэффициенты подобия для различных показателей (ЖДС)

Показатель	Стандарт (ТП)	Факт (расчёт)	Коэффициент d
Время простоя местного вагона (ч)	2,5	4,5	0,556
Время расформирования (мин)	25	38	0,658

Примечание: для вероятностей $d > 1$, что соответствует обратной степенной зависимости: снижение вероятности конфликта требует «усиления» управляющего воздействия по нелинейному закону.

4.4 Вычислительный эксперимент, оценка эффективности и программная реализация комплекса «Axiomatic v.1» и «АМПВ v.1»

Для оценки эффективности предложенной двухуровневой РНС-архитектуры проведена серия вычислительных экспериментов на синтезированных данных, имитирующих работу железнодорожной станции (ЖДС) в условиях нестационарного вагонопотока. Объём обучающей выборки составил 50 000 технологических операций, тестовой - 5 000 операций. Данные включали временные метки выполнения аксиомат, занятость элементов инфраструктуры, а также метки транспортных конфликтов, зафиксированных в имитационной модели (Приложение Б).

Реализация Сценария 1 (прогноз временных параметров).

Для прогнозирования времени выполнения следующей аксиоматы использовалась двухслойная GRU-сеть, оптимизированная под задачи регрессии. Входной вектор для ЖДС включал пять ключевых параметров: $X_{\text{ЖДС}}^{(i)} = [t_{GL1}^{(i)}, t_{PG1}^{(i)}, t_{SU}^{(i)}, t_{PS}^{(i)}, t_{GFP1}^{(i)}]$.

Сравнение с базовым подходом (использование статических нормативов) показало снижение средней абсолютной ошибки (MAE) на 28 % для критической аксиоматы расформирования состава t_{SU} , что подтверждает преимущество динамического прогнозирования перед нормативным методом.

Реализация Сценария 2 (детекция предконфликтных ситуаций).

Классификатор на основе двухслойной LSTM-сети (архитектура Many-to-One) обучался распознаванию четырёх классов состояний: $\{TK_1, TK_2, TK_3, TK_{\text{нет}}\}$. 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 Accuracy = 0,91, F1-score = 0,90, что свидетельствует о высокой надёжности модели как интеллектуального советчика диспетчерского персонала.

Реализация Сценария 3 (выбор оптимальной АСТТП).

Задача выбора следующей аксиоматы решалась с помощью LSTM-сети Many-to-One с softmax-выходом, обученной на исторических последовательностях управленческих решений. Предложенный подход позволил сократить обеспечить точность выбора относительно глобального оптимума составила 91 %. Разработанный программный комплекс «Axiomatic v.1» предназначен для расчёта временных параметров транспортных процессов и получения логической модели объекта, демонстрирующей все взаимосвязи (Рисунок 4.1).

```

===== Программа управления железнодорожной станцией 'Трушневая' =====
Введите количество вагонов на каждом пути на момент начала работы:

r1 (ёмкость 51): 21
r2 (ёмкость 54): 19
r3 (ёмкость 55): 0
r4 (ёмкость 60): 0
r5 (ёмкость 28): 12
r6 (ёмкость 34): 8
r7 (ёмкость 34): 2
r8 (ёмкость 32): 0
r9 (ёмкость 32): 22
r11 (ёмкость 39): 0
r14 (ёмкость 32): 6
r15 (ёмкость 32): 4
r16 (ёмкость 32): 7
r17 (ёмкость 32): 2
r22 (ёмкость 30): 4
r23 (ёмкость 30): 5

Выберите тип груза:
1) Светлые/темные нефтепродукты
2) Дизельное топливо
3) Мазут
4) Пустая цистерна (пригодна только для налива)
Ваш выбор (1-4): 3

Введите количество вагонов в прибывающем поезде: 34

Выберите маршрут:
1) GL  $\rightarrow$  PG  $\rightarrow$  SU  $\rightarrow$  PSO  $\rightarrow$  FS1/FS2/FS3  $\rightarrow$  PSO
2) GL  $\rightarrow$  PG  $\rightarrow$  SU  $\rightarrow$  FS1/FS2/FS3  $\rightarrow$  PSO
Ваш выбор (1-2): 1

1. Поезд прибывает на главный путь GL (r4)
2. Перемещение 34 вагонов из GL в PG (15 минут)

3. Распределение вагонов в PG:
- На путь r3 размещено 34 вагонов. Свободно: 21
4. Перемещение вагонов из PG в SU:
- 34 вагонов с пути r3 перемещаются через SU (25 минут)
5. Перемещение вагонов из SU в PSO:
- 32 вагонов размещены на PSO (r7). Свободно: 0
- 2 вагонов размещены на PSO (r8). Свободно: 30

6. Перемещение вагонов на нефтебазу (FS1):
- Ожидание освобождения пути r15 (35 минут)
- 28 вагонов перемещаются на r15 (20 минут)
- Обработка 28 вагонов на r15 (35 минут)
- Ожидание освобождения пути r14 (35 минут)
- 4 вагонов перемещаются на r14 (20 минут)
- Обработка 4 вагонов на r14 (35 минут)
- Ожидание освобождения пути r14 (35 минут)
- 2 вагонов перемещаются на r14 (20 минут)
- Обработка 2 вагонов на r14 (35 минут)

7. Возврат вагонов на PSO:
- 30 вагонов возвращены на PSO (r8). Свободно: 0
- 2 вагонов возвращены на PSO (r6). Свободно: 24
- 2 вагонов возвращены на PSO (r6). Свободно: 22

===== Итоговый отчет =====
Маршрут обработки:
- GL (r4) - 34 вагонов
- GL  $\rightarrow$  PG - 15 минут
- PG (r3)  $\rightarrow$  SU - 25 минут
- SU  $\rightarrow$  PSO (r7) - 30 минут
- SU  $\rightarrow$  PSO (r8) - 30 минут
- PSO  $\rightarrow$  FS1 (r15) - 20 минут
- Обработка на r15 - 35 минут
- PSO  $\rightarrow$  FS1 (r14) - 20 минут
- Обработка на r14 - 35 минут
- PSO  $\rightarrow$  FS1 (r14) - 20 минут
- Обработка на r14 - 35 минут
- FS1  $\rightarrow$  PSO (r8) - 30 минут
- FS1  $\rightarrow$  PSO (r6) - 30 минут
- FS1  $\rightarrow$  PSO (r6) - 30 минут

```

Общее время обработки: 460 минут (7 ч. 40 мин.)

Рисунок 4.1 – Диалоговое окно выдачи программного модуля программы для ЭВМ «Axiomatic v.1»

Разработан программный комплекс «АМПИВ v 1.0» - модуль прогнозирования транспортных конфликтов на базе двухуровневой РНС (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026683768) – программа-надстройка с нейросетевой архитектурой для прогнозирования конфликтов (Рисунок 4.2.).

The screenshot displays the AMPIV v 1.0 software interface, which is divided into several functional areas:

- Управление обработкой (Processing Control):** Located in the top-left, it includes input fields for 'Количество вагонов:' (14), 'Тип груза:' (светлые нефтепродукты), and 'Операция:' (слив). Below these are radio buttons for selecting a route (Маршрут 1, 2, or 3) and a 'Рассчитать обработку' (Calculate processing) button.
- Приемо-отправочные / Сортировочные / Нефтебаза / Службные (Receiving/Dispatching / Sorting / Oil Base / Service):** A tabbed interface at the bottom-left. The 'Нефтебаза пути' (Oil Base of the route) tab is active, showing a table of routes and wagon capacity.
- Нефтебаза пути (Oil Base of the route):** A table with columns 'Путь' (Route) and 'Вместимость Вагонов' (Wagon Capacity).

Путь	Вместимость Вагонов
Путь 14 (мазут/нефть)	32
Путь 15 (мазут/нефть)	32
Путь 16 (диз.топливо)	32
Путь 17 (налив)	32
Путь 18 (сухие грузы)	9
Путь 22 (налив)	30
Путь 23 (слив)	30
- Текущее состояние станции (Current station status):** A central table showing the status of various stations.
- Управление обработкой (Processing Control):** A duplicate of the top-left control panel, located on the right side of the interface.
- Результаты расчета (Calculation results):** A bottom-right panel displaying the 'ОПТИМАЛЬНЫЙ ПЛАН ОБРАБОТКИ' (Optimal processing plan) and 'ДЕТАЛЬНЫЙ ПЛАН ОБРАБОТКИ' (Detailed processing plan).

Рисунок 4.2 – Окна программного комплекса «АМПИВ v 1.0»

Архитектура программных комплексов построена по модульному принципу. Основной вычислительный модуль реализован на языке Python 3.10 с использованием библиотек глубинного обучения TensorFlow 2.x и Keras API. Взаимодействие между стратегическим (LSTM-1) и тактическим (LSTM-2) уровнями организовано через буфер обмена данными в формате многомерных массивов NumPy, что обеспечивает минимальные временные задержки при передаче прогнозных векторов. Обученная модель сохраняется в универсальном формате HDF5, что позволяет осуществлять перенос обученных весов между различными объектами транспортной инфраструктуры с последующей адаптацией согласно предложенному закону масштабирования. Сравнение результатов базового варианта и предложенной двухуровневой двухконтурной РНС-архитектуры, в результате экспериментов, описанных в приложении Б, представлено в таблице 4.4, таблице 4.5 и рисунке 4.3.

Таблица 4.4 – Сравнение базового варианта и разработанной РНС-архитектуры
(усреднённые результаты по 20 объектам)

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	0,90	+0,19	+26,4 %
Точность прогноза времени t_{SU} (MAE, мин)	4,9	3,6	-1,3	-27,1 %

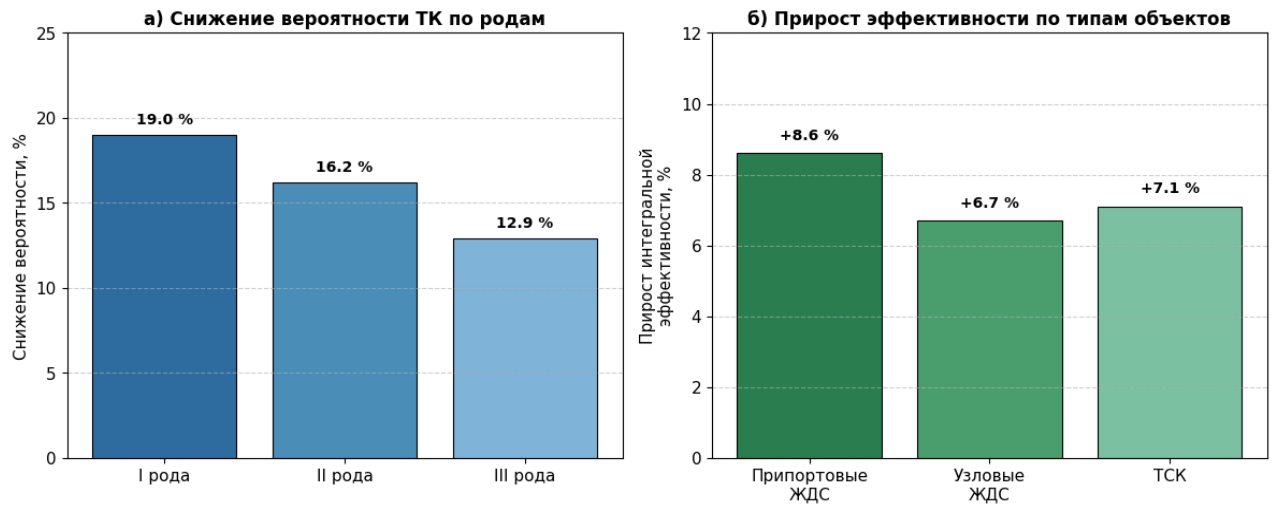


Рисунок 4.3 – Сравнительный анализ эффективности предложенной двухуровневой РНС-архитектуры: а - снижение вероятности транспортных конфликтов по родам; б - прирост интегральной эффективности по типам объектов

Таблица 4.5 – Сводная таблица эффективности по типам объектов

Тип объекта	Кол-во объектов	Средний интегральный показатель (базовый), %	Средний интегральный показатель (РНС), %	Прирост, %
Припортовые ЖДС	15	83,8	92,4	+8,6 %
Узловые ЖДС	2	84,2	90,9	+6,7 %
ТСК	3	87,5	94,6	+7,1 %
Все объекты	20	84,2	92,7	+8,5 %

Сравнительный анализ (таблица 4.4, таблица 4.5, рисунок 4.3) демонстрирует устойчивое снижение рисков возникновения транспортных конфликтов всех трёх родов при применении разработанной двухуровневой РНС-архитектуры. Наиболее существенное относительное снижение (19,0 %) достигнуто для транспортных конфликтов I рода, что объясняется высокой чувствительностью стратегического контура LSTM-1 к занятости критических одноуровневых пересечений $\mu(KRN)$ и $\mu(KRR)$. 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 %. Абсолютные значения вероятностей конфликтов второго и третьего рода снизились до уровней, сопоставимых с фоновыми значениями нормативных технологических процессов.

4.5 Выводы по главе

На основе проведённых в четвёртой главе исследований разработан программный комплекс прогнозирования транспортных конфликтов на основе двухуровневой РНС-архитектуры с масштабированием результатов. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана двухуровневая двухконтурная РНС-архитектура (LSTM-1 — стратегический уровень, LSTM-2 + Attention — тактический уровень) для прогнозирования транспортных конфликтов первого, второго и третьего рода на горизонте 1–4 часа и адаптивного выбора аксиомат АСТТП в реальном времени. Предложенная архитектура обеспечивает динамическую замену статических вероятностных оценок прогнозными значениями, учитывающими предысторию событий и текущую оперативную обстановку.

2. Сформирована библиотека модулей усовершенствованных аксиоматических моделей для трёх типов объектов транспортной инфраструктуры (мультимодальный транспортный узел, железнодорожная станция, транспортно-складской комплекс), включающая графо-технологическое представление модулей в РНС и их параметризацию для последующей интеграции в нейросетевую архитектуру.

3. Предложены три сценария применения разработанной архитектуры, различающиеся целевой функцией и горизонтом прогнозирования: Сценарий 1 — прогноз временных параметров выполнения аксиомат (регрессия) с заменой статических нормативов динамическими прогнозами; Сценарий 2 — детекция и классификация предконфликтных ситуаций на горизонте 15–30 минут; Сценарий 3 — вероятностное ранжирование аксиомат, позволяющее заменить полный комбинаторный перебор вариантов целенаправленным выбором субоптимальной стратегии.

4. Введён закон масштабирования результатов РНС на основе теории категорий, позволяющий переносить обученные модели между объектами одного типа без необходимости повторного сбора обучающей выборки и длительной процедуры оптимизации весов. 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».

5. Реализованы программные комплексы «Axiomatic v.1» и «АМПВ v. 1.0» (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2022681955 и № 2026683768). Основной вычислительный модуль реализован на языке Python 3.10 с использованием библиотек TensorFlow 2.x, Keras, Pandas и NumPy. Обученная модель сохраняется в формате HDF5, что обеспечивает перенос обученных весов между объектами инфраструктуры с последующей адаптацией согласно закону масштабирования.

6. Экспериментально подтверждена эффективность предложенной архитектуры на синтезированных данных, имитирующих работу железнодорожной станции в условиях нестационарного вагонопотока (обучающая выборка — 50 000 операций, тестовая — 5 000). В ходе эксперимента получено:

- снижение вероятности транспортных конфликтов I рода на 19,0 %;
- снижение вероятности транспортных конфликтов II рода на 16,2 %;
- снижение вероятности транспортных конфликтов III рода на 12,9 %;
- сокращение времени простоя местного вагона на 5,3 %;
- сокращение времени выбора аксиоматы на 99,86 % (с 8500 мс до 12 мс);
- повышение точности прогноза транспортных конфликтов за 30 мин с 0,72 до 0,91;
- снижение ошибки прогноза времени расформирования состава $t(SU)$ (MAE) на 27,1 %.

7. Апробация разработанной методики на четырёх объектах транспортной инфраструктуры (станции «Г», «ТГ», «А» и ТСК «РЗ») и последующая аналитическая оценка ещё для 16 объектов (всего 20 объектов) позволили подтвердить масштабируемость подхода. Средний интегральный показатель эффективности транспортной работы повысился с 84,2 % до 92,7 %, что в среднем даёт прирост 8,5 %. Наибольший прирост достигнут для припортовых станций (+8,6 %).

8. Подтверждена стационарность остатков прогнозной модели ($p < 0,05$ по тесту Дики–Фуллера), что является необходимым условием корректности применения методов математической статистики при анализе транспортных процессов и свидетельствует о состоятельности предложенного динамического подхода в отличие от статической оценки $P(A_0) = 0,04$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных научных исследований позволяют сделать 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 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 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. Разработан программный комплекс «Axiomatic v.1» (свидетельство № 2022681955) и «АМПВ v. 1.0» (свидетельство № 2026683768), реализующий АМТТП на примере ОТИ. Выделены логические группы аксиомат: АСТТП (станционные передвижения), 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 интеллектуальных транспортных системах.

7. Разработан алгоритм развёртки РНС формирования АМТП 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 узлового взаимодействия видов транспорта. 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 четырёх объектах с полным циклом вычислительных экспериментов и аналитическая оценка ещё 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 %. Полученные результаты свидетельствуют о практической применимости разработанного подхода для повышения эффективности управления транспортным производством в узловых железнодорожных системах и его масштабируемости на широкий спектр объектов транспортной инфраструктуры.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме:

1. Разработанный метод аксиоматного моделирования (АМТПП-М) рекомендуется к внедрению в практику диспетчерского управления на крупных сортировочных и грузовых станциях в качестве модуля ситуационного прогнозирования. Для этого требуется адаптация библиотеки аксиомат под конкретные технологические процессы каждой станции 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 нескольких модельных схем станций в единую графологическую модель с учётом межстанционных связей.

3. Разработанные методы повышения стационарности баз данных (дифференцирование, логарифмическое преобразование, сезонное дифференцирование, скользящие средние) 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» и «АМПВ v. 1.0» целесообразно развивать в направлении создания полноценного цифрового двойника железнодорожной станции с функцией автоматической генерации альтернативных сценариев транспортного производства. Для этого необходима дальнейшая работа по формализации большего числа аксиомат (включая аварийные и нештатные ситуации) и расширение функционала нейросетевого блока для работы в режиме реального времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Хусаинов, Ф. И.** Рынок железнодорожных перевозок в 2022 г. / Ф. И. Хусаинов // Экономика железных дорог. – 2023. – № 3. – С. 46-72. – EDN OTIXIZ.

2 **Ротов, М. С.** Экспертные методы анализа и разработки предложений по совершенствованию управления пассажирским автомобильным транспортом в крупном регионе : монография / М. С. Ротов, А. А. Степанов ; Министерство образования Российской Федерации, Государственный университет управления, Институт управления на транспорте. – Москва : ГУУ, 2003. – 58 с. – EDN QQDEJB.

3 **Солодкий, А. И.** Развитие интеллектуальных транспортных систем в России: проблемы и пути их решения. Новый этап / А. И. Солодкий // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 10-19. – DOI 10.25198/2077-7175-2020-6-10. – EDN PDUSFR.

4 Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утверждена Распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – Текст : электронный // ГАРАНТ. Информационно-правовое обеспечение [сайт]. – URL: <https://base.garant.ru/403156321/> (дата обращения: 19.07.2025).

5 **Третьякова, М. Л.** Интеллектуальные транспортные системы и технологии как фактор устойчивого развития инновационной экономики / М. Л. Третьякова // Инновационное развитие Российской экономики : IX Международная научно-практическая конференция, Москва, 25–28 октября 2016 года : в 3 томах. Том 3. – Москва : Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2016. – С. 76-78. – EDN WXLADF.

6 Мировой опыт применения системных решений в области ИТС. – Текст : электронный // Росавтодор [сайт]. – URL: <https://dr.rosavtodor.gov.ru/department/deyatelnost-dr/intellektualnye-transportnye-sistemy/mirovoj-opyt-vnedreniya-i-razvitiya-its> (дата обращения: 19.07.2025).

7 ИТС в России. – Текст : электронный // ComNews [сайт]. – URL: <https://www.comnews.ru/vision/2/its> (дата обращения: 19.07.2025).

8 Its ИТС. РЖД планируют внедрить на транспорте мультимодальную интеллектуальную систему. – Текст : электронный // Vgudok [сайт]. – URL: <https://vgudok.com/lenta/its-its-rzhd-planiruyut-vnedrit-na-transporte-multimodalnuyu-intellektualnuyu-sistemu> (дата обращения: 19.07.2025).

9 Интеллектуальная транспортная система РЖД должна стать частью мультимодальной ИТС России. – Текст : электронный // РЖД-Партнер [сайт]. – URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/intellektualnaya-transportnaya-sistema-rzhd-dolzha-stat-chastyu-multimodalnoy-its-rossii/> (дата обращения: 20.07.2025).

10 **Малыгин, И. Г.** [и др.]. Особенности построения и архитектура перспективной интеллектуальной мультимодальной транспортно-логистической системы / И. Г. Малыгин [и др.] // Технологии построения когнитивных транспортных систем. – 2021. – С. 7.

11 Информатизация на железнодорожном транспорте. История и современность / под редакцией И. В. Харлановича. – Москва : Вече, 2005. – 718 с.

12 Комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ) / под общей редакцией А. П. Петрова. – Москва : Транспорт, 1977. – 600 с.

13 **Осипов, В. Т.** Применение ЭВМ на железных дорогах / В. Т. Осипов ; ответственный редактор А. Ф. Волков. – Москва : Наука, 1984. – 264 с.

14 **Баврин, Г. Н.** АСОУП – основа информационных технологий перевозок / Г. Н. Баврин, В. Н. Якимец // Евразия-Вести. – 2006. – V.

15 **Буянов, В. А.** Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте / В. А. Буянов, Г. С. Ратин. – Москва : Транспорт, 1984. – 239 с.

16 **Вишняков, В. Ф.** Роль информационного хранилища в решении задач информатизации отрасли / В. Ф. Вишняков // Автоматика, связь, информатика. – 2001. – № 11. – С. 2-4.

17 Управление и информационные технологии на железнодорожном транспорте / под редакцией Л. П. Тулупова. – Москва : Маршрут, 2005. – 465 с.

18 Поплавский, А. А. Автоматизированная система управления перевозочным процессом железнодорожного транспорта в оперативном режиме (сетевой и региональный уровни) : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.08 / Поплавский Александр Алексеевич. – Москва : НИИАС, 2009. – 48 с.

19 Информационная безопасность и защита информации на железнодорожном транспорте : в 2 частях. Часть 1 : Методология и система обеспечения информационной безопасности на железнодорожном транспорте / А. А. Корниенко, С. Е. Ададуров, А. П. Глухов [и др.]. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 440 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 978-5-89035-717-5. – EDN SMCPIJ.

20 Гордиенко, Е. П. Концепция информатизации на железнодорожном транспорте: исторический ракурс / Е. П. Гордиенко // Транспорт: наука, образование, производство : материалы конференции, Воронеж, 20 апреля 2020 года. – Воронеж : Ростовский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Воронеж), 2020. – С. 66-71. – EDN FAVOFY.

21 Осокин, О. В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.08 / Осокин Олег Викторович. – Екатеринбург, 2014. – 355 с. – EDN SVCGLB.

22 Козлов, П. А. Проблема организации единой транспортной системы / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. С. Колокольников // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – № 3.

23 Вакуленко, С. П. Единая транспортная система / С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова. – Москва : Российский университет транспорта, 2020. – 105 с. – EDN UPKDVJ.

24 Маслов, А. М. Техничко-технологические параметры функционирования грузовых станций железнодорожного транспорта в условиях стохастического ха-

рактера вагонопотока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.01 / Маслов Александр Михайлович. – Екатеринбург, 2009. – 196 с.

25 **Задорожний, В. М.** Развитие методов распределения порожних вагонопотоков припортовой транспортно-технологической системы в конкурентных условиях : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.01 / Задорожний Вячеслав Михайлович. – Ростов-на-Дону, 2018. – 24 с.

26 **Ручкин, И. В.** Нормирование технико-технологических показателей работы предприятий промышленного железнодорожного транспорта / И. В. Ручкин, О. Н. Числов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1(69). – С. 77-87. – EDN YUGKRQ.

27 Экономика железнодорожного транспорта : учебник для вузов железнодорожного транспорта / Н. П. Терёшина, В. Г. Галабурда, В. А. Токарев [и др.] ; под редакцией Н. П. Терёшиной, Б. М. Лapidуса. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. – 512 с.

28 Коммерческая логистика : учебное пособие / Н. А. Нагапетьянц, Н. Г. Каменева, В. А. Поляков [и др.] ; под общей редакцией Н. А. Нагапетьянца. – Москва : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2019. – 253 с.

29 Федеральная служба государственной статистики. – Текст : электронный // Росстат [сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 26.07.2025).

30 **Герасименко, П. В.** Прогнозирования средней дальности перевозки одной тонны груза железнодорожным транспортом России / П. В. Герасименко // Основы экономики, управления и права. – 2023. – № 1 (36). – С. 38-42. – DOI 10.51608/23058641_2023_1_38.

31 **Волков, С.** Итоги 2022 года. Как отрасль справлялась с санкционными ограничениями / С. Волков // Гудок. – 2023. – 9 января. – URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1623819/> (дата обращения: 26.07.2025).

32 Методика технического нормирования, учета рабочего парка и времени оборота грузового вагона на инфраструктуре общего пользования : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 18.08.2015 № 2075-р. – Текст : электронный // КонсультантПлюс [сайт]. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 26.07.2025).

33 **Мейлер, Л. Е.** Общий курс транспорта : учебное пособие / Л. Е. Мейлер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калининград : Изд-во БГАРФ, 2020. – 235 с.

34 **Асаул, М. А.** Теоретические основы построения систем оперативного управления перевозочным процессом грузового транспорта при внедрении технологий 5G-V2X / М. А. Асаул, Р. Р. Сафиуллин // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2. – С. 189-196.

35 **Плеханов, П. А.** Внедрение и развитие интеллектуальных транспортных систем применительно к железнодорожному транспорту на основе возможностей беспроводной связи пятого поколения (5G) / П. А. Плеханов // Информационные технологии на транспорте. – 2016. – С. 102-112.

36 **Малыгин, И. Г.** Железнодорожный транспорт в период четвертой индустриальной эпохи / И. Г. Малыгин, Т. С. Титова, В. И. Комашинский // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 3(82). – С. 15-18. – EDN YIZMKL.

37 **Скалозуб, В. В.** Прикладной системный анализ интеллектуальных систем транспорта / В. В. Скалозуб, В. М. Ильман. – 2013.

38 **Ерофеев, А. А.** Предпосылки создания системы интеллектуального управления перевозочным процессом / А. А. Ерофеев. – 2017.

39 **Ерофеев, А. А.** Перспективы внедрения интеллектуальных систем управления на железнодорожном транспорте / А. А. Ерофеев, В. В. Голенков. – 2018.

40 **Котенко, А. Г.** Когнитивный метод формирования модели мультимодального перевозочного процесса в универсальных перегрузочных комплексах крупных морских портов / А. Г. Котенко, И. Г. Малыгин, О. А. Королев // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 3-1(57). – С. 302-309. – DOI 10.37220/MIT.2022.57.3.039. – EDN WGISBF.

41 **Ларин, О. Н.** Цифровая трансформация транспортно-логистической деятельности / О. Н. Ларин, Р. Б. Ивуть, П. Д. Капский // Логистика. – 2024. – № 4(209). – С. 26-30. – EDN BSQVBL.

42 ГОСТ 20886-85. Организация данных в системах обработки данных. Термины и определения. – Введ. 01.01.1987. – Москва : Стандартинформ, 1985. – 11 с.

43 **Рабинович, А. Е.** Применение технологии Big Data в сфере железнодорожного сообщения / А. Е. Рабинович, А. В. Август // Оригинальные исследования. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 155-161. – EDN XGLVQR.

44 Железнодорожный транспорт : на пути к интеллектуальному управлению / С. Е. Ададуров, В. А. Гапанович, Н. Н. Лябах, А. Н. Шабельников. – Ростов-на-Дону : Ростиздат, 2010. – 322 с. – ISBN 978-5-7509-0471-7. – EDN NTOJOF.

45 **Апатцев, В. И.** Управление перевозками в железнодорожных узлах : учебное пособие / В. И. Апатцев, А. Ф. Бородин, Е. В. Бородина. – Москва : РГОТУПС, 2003. – 155 с.

46 **Hickman, M.** Assessing the benefits of a national ITS architecture / M. Hickman, S. Weissenberger, J. Dahlgren. – 1996.

47 **Егоров, С. В.** Мировой и российский опыт применения интеллектуальных транспортных систем / С. В. Егоров, П. В. Шационок, А. И. Ерпылева, Д. И. Жарков // Транспортное дело России. – 2022. – № 2. – С. 130-136. – DOI 10.52375/20728689_2022_2_130. – EDN QHVBGQH.

48 **Иванов, А. Ю.** [и др.]. Мобильные распределенные базы данных интеллектуальной мультимодальной транспортной системы / А. Ю. Иванов [и др.]. – 2017.

49 **Саенко, И. Б.** Теория многомерно-реляционных баз данных и ее применение в автоматизированных системах управления связью. – Санкт-Петербург : ВУС, 2001. – 176 с.

50 **Иванов, А. Ю.** Перспективы развития информационного базиса автоматизированных систем в условиях рисков / А. Ю. Иванов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2012. – № 3. – С. 53-57.

51 **Иванов, А. Ю.** Концепция построения единого информационного пространства интеллектуальной мультимодальной транспортной системы / А. Ю. Иванов, В. И. Комашинский, И. Г. Малыгин // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 6 (67). – С. 24-28.

52 **Асаул, А. Н.** [и др.]. Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ / А. Н. Асаул [и др.] // Информация и космос. – 2016. – № 3. – С. 8-17.

53 **Рожко, О. Н.** Создание единого информационного пространства цифровой логистики с использованием баз данных интеллектуальных транспортных систем / О. Н. Рожко // Вестник экономики, права и социологии. – 2020. – № 1. – С. 37-40. – EDN VJEPJG.

54 **Дегтярёва, В. В.** Big Data: возможности применения в системе управления железнодорожным транспортом / В. В. Дегтярёва, Н. Р. Гусейнова // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика. Технологическое лидерство: взгляд за горизонт. – 2021. – С. 26-33.

55 **Шалаева, Е. А.** Зарубежный опыт внедрения цифровых технологий в логистику грузовых железнодорожных перевозок / Е. А. Шалаева, И. М. Мишин // Неделя молодежной науки : сборник научных статей, Москва, 19–25 февраля 2018 года. – Москва : Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2018. – С. 206-210. – EDN YXCHLV.

56 **Покусаев, О. Н.** [и др.]. Цифровая железная дорога Европы – от ERTMS до искусственного интеллекта / О. Н. Покусаев [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7, № 7. – С. 90-119.

57 **Покусаев, О. Н.** [и др.]. Онтологии системы систем в национальных стандартах цифровой железной дороги Великобритании / О. Н. Покусаев [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6, № 11.

58 **Соколов, И. А.** [и др.]. Проекты цифрового транспорта с глобальными навигационными спутниковыми системами – путь к построению интегрированных систем цифрового транспорта / И. А. Соколов [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7, № 1.

59 Развитие системы сигнализации в Китае и автоведение поездов // Железные дороги мира. – 2018. – № 10. – С. 75-77. – EDN XZUATB.

60 **Morris, C.** Use of ontology for data integration in a degraded mode signalling system / C. Morris, J. Easton // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2018. – Т. 181. – С. 215-223.

61 Железные дороги мира. – 2018. – № 12. – С. 84. – URL: <https://rucont.ru/efd/784412> (дата обращения: 20.06.2025).

62 Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2015) : труды четвертой научно-технической конференции с международным участием, Москва, 18 ноября 2015 года. – Москва : Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, 2015. – 186 с. – EDN VHPEVV.

63 **Петров, А. Г.** Роль автоматизированных систем управления на железнодорожном транспорте и всей транспортной системе страны / А. Г. Петров, М. Н. Васильев // Специальная техника и технологии транспорта. – 2023. – № 18. – С. 7-11. – EDN ISWFZT.

64 **Горев, А. Э.** Информационные технологии в управлении логистическими системами. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2004. – 193 с.

65 Единая интеллектуальная система управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ) : техническое задание. – 2013. – 168 л.

66 Логистика нового поколения. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» [сайт]. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=143553> (дата обращения: 20.06.2025).

67 **Чеботарева, Е. А.** Развитие моделей искусственного интеллекта в логистике подвода грузопотоков к портам Азово-Черноморского бассейна / Е. А. Чеботарева, Э. А. Мамаев // Политранспортные системы : материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Новосибирск,

24–25 октября 2024 года. – Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 529-533. – EDN IEBUNT.

68 К динамической модели загрузки инфраструктуры подключились все дороги. – Текст : электронный // Гудок [сайт]. – URL: <https://www.gudok.ru/content/freighttrans/1630422/> (дата обращения: 20.06.2025).

69 ДМЗИ требует адаптации. – Текст : электронный // TankContainerWorld [сайт]. – URL: <https://tankcontainerworld.ru/analytics/dmzi-trebuat-adaptatsii/> (дата обращения: 20.06.2025).

70 **Малышев, М. И.** Управление формированием комплексных транспортных систем в процессе интеграции мультимодальных коридоров и региональной инфраструктуры на основе киберфизической модели / М. И. Малышев // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – С. 3.

71 **Искандеров, Ю. М.** Информатизация транспортно-технологических процессов в цепях поставок / Ю. М. Искандеров // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 58-64.

72 **Винер, Н.** Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. – Москва : Наука, 1983. – 344 с.

73 **Колмогоров, А. Н.** Теория информации и теория алгоритмов. – Москва : Наука, 1987. – 304 с.

74 **Лакин, И. И.** Многофакторный анализ статистической информации с использованием методов теории нечетких множеств / И. И. Лакин // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 20-27.

75 **Лотарев, Д. Т.** Синтез транспортной сети одного класса методом динамического программирования / Д. Т. Лотарев // Автоматика и телемеханика. – 1989. – № 2. – С. 131-141.

76 **Вознюк, П. А.** История развития и современное состояние искусственного интеллекта / П. А. Вознюк // Глобус: технические науки. – 2019. – № 3 (27). – С. 11-19.

77 **Панов, А. И.** Искусственный интеллект: современное состояние и перспективы / А. И. Панов // Введение в методы ИИ. – 2017. – 28 сентября.

78 **Корниенко, А. А.** К вопросу о философских предпосылках, состоянии и перспективах исследований по проблеме искусственного интеллекта / А. А. Корниенко, А. А. Корниенко, А. В. Корниенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2013. – Т. 323, № 6. – С. 210-215.

79 **Глушков, В. М.** Кибернетика. Вопросы теории и практики. – Москва : Наука, 1986. – 488 с.

80 **Пугачев, В. С.** Теория вероятностей и математическая статистика. – Москва : Физматлит, 2002. – 496 с.

81 **Бессоненко, С. А.** Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов на однопутных направлениях железнодорожной сети / С. А. Бессоненко, Е. В. Климова, Н. И. Осипов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2024. – Т. 83, № 4. – С. 287-301. – EDN MLBWOK.

82 **Mazaré, P. E.** [et al.]. Analytical and grid-free solutions to the Lighthill–Whitham–Richards traffic flow model / P. E. Mazaré [et al.] // Transportation Research Part B: Methodological. – 2011. – Т. 45, № 10. – С. 1727-1748.

83 **Кутыркин, А. В.** Разработка моделей и алгоритмов решения функциональных задач управления транспортными системами и производством : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.01 / Кутыркин Андрей Викторович. – Москва : МГУПС, 2004.

84 **Newell, G. F.** Traffic flow on transportation networks. – 1980. – (Monograph).

85 **Бибанов, Ж. Р.** Оптимизация транспортной сети и парадокс Браесса / Ж. Р. Бибанов, А. Ж. Какешова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2011. – № 2. – С. 23-27.

86 **Chandler, R. E.** Traffic dynamics: studies in car following / R. E. Chandler, R. Herman, E. W. Montroll // Operations research. – 1958. – Т. 6, № 2. – С. 165-184.

87 **Daganzo, C. F.** Fundamentals of transportation and traffic operations. – Emerald Group Publishing Limited, 1997.

88 **Давыдов, А. В.** Методы и инструменты реализации диспетчерской функции управления высокоскоростным пассажирским движением / А. В. Давыдов, А. П. Дементьев, В. А. Рубан // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1 (44). – С. 47-54.

89 **Петрин, К. В.** [и др.]. Мультиагентные технологии в эргатических системах управления / К. В. Петрин [и др.] // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2010. – Т. 104, № 3. – С. 7-13.

90 **Цыпкин, Я. З.** Вторая международная конференция по адаптивным системам в управлении и обработке сигналов / Я. З. Цыпкин // Автоматика и телемеханика. – 1987. – № 4. – С. 185-185.

91 **Васильев, С. Н.** [и др.]. Управление развитием крупномасштабных систем. – 2012.

92 **Павлов, В. В.** Концепция моделирования и анализа эволюции технического состояния сложных технических систем на максимально возможном интервале их жизненного цикла / В. В. Павлов, В. И. Чепиженко. – 2009.

93 **Шпилевая, О. Я.** Синтез систем управления с быстрыми алгоритмами адаптации для многоканальных и многорежимных объектов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.01 / Шпилевая Ольга Яковлевна. – Новосибирск : НГТУ, 2010.

94 **Лычкина, Н. Н.** Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития / Н. Н. Лычкина // Бизнес-информатика. – 2009. – № 3. – С. 55-67.

95 **Шеффи, Й.** Жизнестойкое предприятие: как повысить надежность цепочки поставок и сохранить конкурентное преимущество. – Москва : Альпина Пабlishер, 2023. – 388 с.

96 **Порицкий, И. А.** Развитие логистики взаимодействия видов транспорта на базе концепции единого информационного пространства : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.01 / Порицкий Илья Александрович. – Ростов-на-Дону, 2014.

97 **Каримов, К. С.** Методы искусственного интеллекта и применение их на транспорте / К. С. Каримов // Постсоветский материк. – 2023. – № 4 (40). – С. 106-115.

98 **Кофман, А.** Введение в теорию нечётких множеств. – Москва : Радио и связь, 1982. – 432 с.

99 **Лябах, Н. Н.** Техническая кибернетика на железнодорожном транспорте / Н. Н. Лябах, А. Н. Шабельников. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2002. – 283 с. – ISBN 588-8-14129-1.

100 **Лябах, Н. Н.** Автоматизация технологических процессов на железнодорожном транспорте на основе микропроцессоров с применением методов распознавания / Н. Н. Лябах, А. Е. Пирогов. – 1984.

101 **Задорожний, В. М.** [и др.]. Перспективы исследований транспортно-технологических параметров узловых пунктов концентрации и распределения припоптовых вагонопотоков / В. М. Задорожний, О. Н. Числов, М. В. Колесников [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1(85). – С. 72-81. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_72. – EDN QAPOPR.

102 **Леонов, С. С.** Анализ нейросетевых архитектур распознавания образов: рекуррентные сети Хопфилда и сверточные сети. – 2021.

103 **Grossberg, S.** Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures / S. Grossberg // Neural networks. – 1988. – Т. 1, № 1. – С. 17-61.

104 **Haghighat, A. K.** [et al.]. Applications of deep learning in intelligent transportation systems / A. K. Haghighat [et al.] // Journal of Big Data Analytics in Transportation. – 2020. – Т. 2, № 2. – С. 115-145.

105 **Алибеков, Б. И.** Модели размещения и развития объектов региональной транспортной системы и приближенный метод их решения / Б. И. Алибеков, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 4. – С. 96-106. – ISSN 0201-727X.

106 **Барский, А. Б.** Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 176 с. – ISBN 5-279-02757-X.

107 **Интрилигатор, М.** Математические методы оптимизации и экономическая теория / пер. с англ. Г. И. Жуковой, Ф. Я. Кельмана. – Москва : Айрис-пресс, 2002. – 576 с.

108 **Коршунов, Ю. М.** Математические основы кибернетики : учебное пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 496 с.

109 **Лябах, Н. Н.** Техническая кибернетика на железнодорожном транспорте : учебник для вузов / Н. Н. Лябах, А. Н. Шабельников. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2002. – 283 с. – ISBN 588-8-14129-1.

110 **Малышев, И. А.** Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия экономических решений на основе методов теорий нечетких множеств : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук : 08.00.13 / Малышев Илья Александрович. – Волгоград : ВГТУ, 2006. – 23 с.

111 **Осинцев, Н. А.** Оценка резервов пропускной и перерабатывающей способности технологических железнодорожных станций с использованием теории нечетких множеств / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 1 (25). – С. 45-49. – ISSN 1997-0722.

112 **Сотников, Е. А.** Интеллектуализация оперативного управления перевозочным процессом на уровне региональной дирекции / Е. А. Сотников // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 11. – С. 36-42.

113 **Числов, О. Н.** Аксиоматика транспортных процессов припортовых грузовых станций / О. Н. Числов, В. В. Ильичева, Д. С. Безусов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 4. – С. 68-76. – ISSN 1997-0722.

114 **Числов, О. Н.** Принципы теории нечетких множеств в формализации инфраструктурно-технологического взаимодействия припортовой железнодорожной транспортной системы / О. Н. Числов, Д. С. Безусов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – № 4. – С. 578-590. – DOI 10.20295/1815-588X-2021-4-578-590.

115 Fuzzy modelling of the transportation logistics processes / O. Chislov, N. Lyabakh, M. Kolesnikov, M. Bakalov, D. Bezusov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2131. – P. 032007. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/3/032007.

116 **Chiao, J. Y.** Neural basis of social status hierarchy across species / J. Y. Chiao // Current Opinion in Neurobiology. – 2010, Dec. – Vol. 20(6). – P. 803-809. – DOI 10.1016/j.conb.2010.08.006.

117 **Combes, F.** Inventory theory, mode choice and network structure in freight transport / F. Combes, L. Tavasszy // European Journal of Transport and Infrastructure Research. – 2016. – No. 16(1). – P. 38-52. – DOI 10.18757/ejtir.2016.16.1.3112.

118 **Tian, W.** A generalized interval fuzzy mixed integer programming model for a multimodal transportation problem under uncertainty / W. Tian, C. Cao // Engineering Optimization. – 2017. – Vol. 49, Iss. 3. – P. 1-18. – DOI 10.1080/0305215X.2016.1190351.

119 О применении искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / В. Б. Положишников, В. А. Акманов, С. Н. Томащенко, Т. В. Шипунов // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 3. – С. 33-36. – ISSN 0044-4448.

120 **Levchenko, N. G.** [et al.]. Application of fuzzy neural network technologies in management of transport and logistics processes in Arctic / N. G. Levchenko [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – T. 1015, № 3. – С. 032085.

121 **Dubois, D. J.** Fuzzy sets and systems: theory and applications. – Academic press, 1980. – Т. 144.

122 **Dubois, D. J.** Readings in fuzzy sets for intelligent systems / D. J. Dubois, H. Prade, R. R. Yager (ed.). – Morgan Kaufmann, 2014.

123 **Колесников, А. В.** Функциональные гибридные интеллектуальные системы визуального управления // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы. – 2018. – С. 18-81.

124 **Колесников, А. В.** Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор / А. В. Колесников, И. А. Кириков, С. В. Листопад. – 2014.

125 **Клачек, П. М.** [и др.]. Гибридные адаптивные интеллектуальные системы / П. М. Клачек [и др.]. – 2011.

126 **Лябах, Н. Н.** Анализ критических ситуаций в транспортных системах / Н. Н. Лябах, М. А. Бутакова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2004. – № 2. – С. 70-72.

127 **Лябах, Н. Н.** Системы массового обслуживания: развитие теории, методология моделирования и синтеза / Н. Н. Лябах, М. А. Бутакова. – 2004.

128 **Лябах, Н. Н.** Моделирование деятельности транспортных предприятий / Н. Н. Лябах, М. В. Колесников, М. В. Бакалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1. – С. 72-77.

129 **Осипов, Г. С.** Динамические интеллектуальные системы // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 47-54.

130 **Батурин, А. П.** Теория выбора оптимального развития технического оснащения сети железных дорог : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.01 / Батурин Александр Павлович. – Москва : МИИТ, 2000. – 336 с.

131 **Осьминин, А. Т.** Оценка эффективности маршрутизации с мест погрузки / А. Т. Осьминин, В. М. Грошев, О. А. Никифорова // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 1. – С. 62-65. – ISSN 0044-4448.

132 **Петров, М. Б.** Методология организации региональной транспортной системы : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.01 / Петров Михаил Борисович. – Москва : МИИТ, 2004. – 48 с.

133 **Dall'Asta, L.** Statistical physics of the Schelling model of segregation / L. Dall'Asta, C. Castellano, M. Marsili // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2008. – Т. 2008, № 07. – С. L07002.

134 **Стратонович, Р. Л.** Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. – Рипол Классик, 1966.

135 **Козлов, П. А.** Построение интеллектуальной информационной среды на железнодорожном транспорте / П. А. Козлов, О. В. Осокин, Н. А. Тушин // Инновационный транспорт. – 2011. – № 1. – С. 6-9.

136 **Акулиничев, В. М.** Математические методы в эксплуатации железных дорог : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. П. Корешков. – Москва : Транспорт, 1981. – 223 с.

137 **Власюк, Т. А.** Проблемы развития железнодорожных станций и узлов в исследованиях академика Образцова В. Н. // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки. – 2021. – С. 24-29.

138 **Правдин, Н. В.** Взаимодействие различных видов транспорта (примеры и расчеты) / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей, В. А. Подкопаев. – 1989.

139 **Добрушин, Р. Л.** Условия регулярности марковских процессов с конечным числом возможных состояний // Математический сборник. – 1954. – Т. 34, № 3. – С. 541-556.

140 **Персианов, В. А.** О применении математических методов в экономических исследованиях на транспорте / В. А. Персианов, С. С. Гончаренко, Т. Н. Сакульева // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2018. – № 7. – С. 3-8.

141 **Шеннон, К.** Работы по теории информации и кибернетике / пер. с англ. под редакцией Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. – Москва : Иностр. лит., 1963. – 832 с.

142 **Рыжиков, Ю. И.** Имитационное моделирование и теория очередей // ИММОД-2007. – 2007. – С. 47.

143 **Хинчин, А. Я.** Работы по математической теории массового обслуживания. – Москва : Физматгиз, 1963. – 236 с.

144 **Акулиничев, В. М.** Математические методы в эксплуатации железных дорог : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. П. Корешков. – Москва : Транспорт, 1981. – 223 с.

145 **Падня, В. А.** Применение теории массового обслуживания на транспорте (железнодорожном, автомобильном, водном и воздушном). – Москва : Транспорт, 1968. – 207 с.

146 **Поттгофф, Г.** Теория транспортных потоков. – Берлин, 1962. – 343 с.

147 **Саати, Т. Л.** Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. – Москва : Советское радио, 1965. – 510 с.

148 **Хейт, Ф.** Математическая теория транспортных средств. – Москва : Мир, 1966. – 286 с.

149 **Персианов, В. А.** Моделирование транспортных систем / В. А. Персианов, К. Ю. Скалов, Н. Ю. Усков. – Москва : Транспорт, 1972. – 208 с.

150 **Козлов, П. А.** Организационные подходы и модели оптимизации работы транспорта в современных условиях / П. А. Козлов, О. В. Осокин, Н. А. Тушин // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 18-23. – ISSN 1992-3252.

151 **Козлов, П. А.** Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, В. И. Сорокин // Транспорт Урала. – 2016. – № 3. – С. 3-8. – DOI 10.20291/1815-9400-2016-3-3-8.

152 **Козлов, П. А.** Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов / П. А. Козлов, В. Ю. Пермикин, В. С. Колокольников // Транспорт Урала. – 2013. – № 2. – С. 3-5. – ISSN 1815-9400.

153 **Андрианов, А. Л.** Развитие линейного программирования в работах Л. В. Канторовича 1930-50-х гг. // Историко-математические исследования. Серия. – 2014. – Т. 2. – С. 25-40.

154 **Чернышев, С. И.** Об использовании метода динамического программирования Р. Беллмана в задачах экономического содержания // Бизнес информ. – 2013. – № 6. – С. 110-119.

155 **Псиола, В. В.** Обзор основных нейросетевых моделей // Интеллектуальные системы. – 1999. – Т. 4, № 3-4. – С. 139-172.

156 **Холланд, Д.** Генетические алгоритмы // В мире науки. – 1992. – Т. 9. – С. 32-40.

157 **Пестерева, Т. А.** Эволюционный анализ размещения промышленного производства и методы его оценки / Т. А. Пестерева, Л. В. Красносельских // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики. – 2020. – С. 232-235.

158 **Абибулаева, Н. С.** Эволюция теории кластеров в экономических системах // Казанский экономический вестник. – 2019. – № 3 (41). – С. 5.

159 **Холмовский, С. Г.** Сухие порты как элемент транспортно-логистической инфраструктуры // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2025. – № 2. – С. 42-49.

160 **Безбородова, Т. И.** Использование функции Харрингтона при рейтинговой оценке деятельности организации в условиях антикризисного управления // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2014. – № 1. – С. 24-32.

161 **Розенберг, Е. Н.** Цифровая железная дорога – путь в будущее / Е. Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 4. – С. 36-41. – EDN YPTUFB.

162 Efficient and secure logistics transportation system / M. V. Kolesnikov, N. N. Lyabakh, E. A. Mamaev, M. V. Bakalov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 8, Novosibirsk, 22–27 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2020. – P. 012031. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012031. – EDN XHPXEZ.

163 **Колесников, В. И.** Интеллектуализация транспортных процессов на основе гибридных технологий и мультиагентных систем / В. И. Колесников, С. М. Ковалев, В. Н. Иванченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1(45). – С. 107-113. – EDN OYHGWW.

164 **Верескун, В. Д.** Развитие логистики перевозочного процесса в железнодорожно-морском сообщении на юге России / В. Д. Верескун, В. Н. Зубков, Э. А. Мамаев // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2019. – № 1. – С. 11-20. – EDN ZWOJHH.

165 Цифровая оптимизация контейнерных маршрутов / П. В. Куренков, Д. Г. Кахриманова, Н. А. Ковалева [и др.] // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 9. – С. 21-36. – DOI 10.36535/0236-1914-2019-09-4. – EDN TFEYWM.

166 **Лецкий, Э. К.** Цифровые сервисы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении грузовыми перевозками на железнодорожном транспорте / Э. К. Лецкий, А. В. Семин // Транспорт: наука, техника, управление. – 2019. – № 9. – С. 17-20. – ISSN 0236-1914.

167 **Ефанов, Д. В.** Технологии цифрового моделирования в железнодорожной отрасли / Д. В. Ефанов, А. С. Шиленко // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 2. – С. 34-38. – DOI 10.34649/AT.2020.2.2.007. – EDN XIGZML.

168 **Мулен, Э.** Кооперативное принятие решений: Аксиомы и модели / пер. с англ. О. Р. Меньшиковой. – Москва : Мир, 1991. – 463 с. – ISBN 5-03-002131-0.

169 **Balster, A. H.** Friedrich Dynamic freight flow modelling for risk evaluation in food supply / A. H. Balster // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2019. – Vol. 121. – P. 4-22. – DOI 10.1016/j.tre.2018.03.002.

170 The freight train routing problem for congested railway networks with mixed traffic / R. Borndörfer, T. Klug, T. Schlechte, A. Fügenschuh, T. Schang, H. Schülldorf // Transportation science. – 2016. – Vol. 50, No. 2. – P. 408-423. – DOI 10.1287/trsc.2015.0656.

171 **Четчуев, М. В.** Методика учёта неравномерности объёма перевозок при разработке единого технологического процесса работы станции примыкания и пути необщего пользования / М. В. Четчуев // Б.П. Бещев. Выдающийся выпускник, великий железнодорожник. К 115-летию со дня рождения, Санкт-Петербург, 28–29 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2019. – С. 112-115. – EDN KOGZKM.

172 **Бессоненко, С. А.** Использование интеллектуальных методов в системе технического нормирования / С. А. Бессоненко, О. П. Югина, Л. С. Жарикова // Железнодорожный транспорт. – 2025. – № 12. – С. 4-8. – EDN KFOMDX.

173 **Wang, X.** Delimiting port hinterlands based on intermodal network flows: Model and algorithm / X. Wang, Q. Meng, L. Miao // Transportation Research. Part E: Logistics and Transportation Review. – 2016. – Vol. 88. – P. 32-51. – DOI 10.1016/j.tre.2016.02.004.

174 Совершенствование терминальных сетей на основе цифровых технологий / О. Н. Ларин, А. Оюунгарав, Ц. Моонхуу, S. Baasan // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы : материалы III Международной

научно-практической конференции, Москва, 27 сентября 2023 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 57-63. – EDN EMVQZE.

175 **Gooley, T. B.** The Geography of Logistics / T. B. Gooley // Logistics Management and Distribution Report. – 1998 (Jan.). – P. 63-65.

176 **Richardson, H. L.** Select the Best Port for Your Needs / H. L. Richardson // Transportation & Distribution. – 1991. – Vol. 32(10). – P. 79-81.

177 **Robinson, A. E.** Inland Ports and Supply Chain Management International Business Association's / A. E. Robinson // Eighth Annual Conference: On Global Perspectives. – Cancun, Mexico, 1999.

178 **Задорожний, В. М.** Развитие методов распределения порожних вагонопотоков припортовой транспортно-технологической системы в конкурентных условиях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.01 / Задорожний Вячеслав Михайлович. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2018. – 229 с.

179 **Krueger, H.** Parametric modeling in rail capacity planning // Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation – a bridge to the future. Volume 2. – 1999. – С. 1194-1200.

180 **Долгова, А. Ю.** Применение математических методов динамического программирования к организации системы доставки грузов / А. Ю. Долгова, Д. В. Романова, Е. В. Бунтова // Human Progress. – 2018. – Т. 4, № 6. – С. 3.

181 **Гольштейн, Е. Г.** Задачи линейного программирования транспортного типа / Е. Г. Гольштейн, Д. Б. Юдин. – Москва : Наука : Физматлит, 1969.

182 **Казеев, И. М.** Имитационное моделирование транспортно-технологического комплекса // Образовательные ресурсы и технологии. – 2020. – № 1 (30). – С. 69-74.

183 **Числов, О. Н.** Концепция цифрового имитационного моделирования железнодорожного транспортно-складского комплекса / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, Н. М. Луганченко // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2021. – № 1(3). – С. 207-215. – EDN KFANZK.

184 **Числов, О. Н.** [и др.]. Временная параметризация в распределении грузопотоков транспортно-технологических систем / О. Н. Числов [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (50). – С. 14-22.

185 **Новицкий, К. А.** Автоматизированная система управления непрерывными технологическими процессами перераспределения транспортных потоков : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.13.06 / Новицкий Кирилл Алексеевич. – Москва : МАДИ, 2010.

186 **Верескун, В. Д.** Экспертные оценки в производственно-транспортных процессах: вопросы организации, моделирования и управления / В. Д. Верескун // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4-3. – С. 485-489. – EDN VVYJXB.

187 **Каримов, К. С.** Методы искусственного интеллекта и применение их на транспорте / К. С. Каримов // Постсоветский материк. – 2023. – № 4 (40). – С. 106-115.

188 **Колесников, М. В.** Управление железнодорожной транспортной системой: концепции, модели и организационные механизмы : монография / М. В. Колесников, Д. П. Мотренко ; под науч. ред. д.э.н., проф. Р. В. Шеховцова и Заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., проф. С. М. Резера. – Москва, 2017. – 272 с.

189 **Колесников, М. В.** Разработка механизмов анализа и синтеза сценариев развития организаций в условиях инновационного развития железнодорожного транспорта / М. В. Колесников // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 5. – С. 28-32. – EDN TFYUKB.

190 **Kolesnikov, M. V.** Entwicklung der Organisationsverwaltung: Strategie und Instrumente. – Kybernetika-Verlag, Hannover, 2010.

191 **Kolesnikov, M. V.** Prinzipien und Mechanismen für die Bildung der innovational Unternehmen (Beispiel – transportbranche Russlands). – KybernetikaVerlag, Hannover, 2010.

192 ГОСТ 2.051-2013. Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения. – Введ. 01.06.2014. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 26 с.

193 ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – Введ. 01.01.1992. – Москва : Стандартинформ, 1991. – 14 с.

194 ГОСТ Р 43.0.5-2009. Информационное обеспечение техники и операторской деятельности. Процессы обработки информации. Общие положения. – Введ. 01.01.2011. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 22 с.

195 Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года. – Текст : электронный // Министерство транспорта Российской Федерации [сайт]. – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009> (дата обращения: 19.07.2025).

196 Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года : утверждена Указом Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490. – Текст : электронный // Президент России [сайт]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50358> (дата обращения: 20.07.2025).

197 СНиП 2.05.07-91. Промышленный транспорт. – Введ. 01.01.1992. – Москва : Стройиздат, 1991. – 92 с.

198 СП 238.1326000.2015. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики. Правила проектирования. – Введ. 17.08.2015. – Москва : ФАУ "РосдорНИИ", 2015. – 84 с.

199 СП 131.13330.2020. Сети связи зданий и сооружений. Основные положения проектирования. – Введ. 25.06.2020. – Москва : Минстрой России, 2020. – 96 с.

200 **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.

201 **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.

202 **Числов, О. Н.** Развитие принципов моделирования технологии транспортных процессов грузовых комплексов и терминалов / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. – 2022. – № 1(4). – С. 205-213. – EDN LDJHPP.

203 **Числов, О. Н.** О вопросе интеллектуализации цифровых решений в управлении железнодорожными транспортно-технологическими процессами / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко // Транспорт: наука, образование, производство : труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 года. Том 2. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 383-387. – EDN XXIBMU.

204 **Безусов, Д. С.** Развитие методов инфраструктурно-технологического взаимодействия в региональной железнодорожной припортовой транспортной системе : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.01 / Безусов Данил Сергеевич, 2022. – 413 с. – EDN PFYGBU.

205 **Рожко, О. Н.** Создание единого информационного пространства цифровой логистики с использованием баз данных интеллектуальных транспортных систем / О. Н. Рожко // Вестник экономики, права и социологии. – 2020. – № 1. – С. 37-40. – EDN VJEPJG.

206 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. – DOI 10.52170/1815-9265_2024_68_22. – EDN VKTSSE.

207 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. – EDN IQYRAP.

208 **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.

209 **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.

210 **Karpathy, A.** The Unreasonable Effectiveness of Recurrent Neural Networks, 2015. – Текст : электронный. – URL: <https://karpathy.github.io/2015/05/21/rnn-effectiveness> (дата обращения: 12.08.2025).

211 **Макаров, Д.** Рекуррентная нейронная сеть, 2025. – Текст : электронный. – URL: <https://www.dmitrymakarov.ru/learning/rnn> (дата обращения: 12.08.2025).

212 **Числов, О. Н.** Моделирование транспортных конфликтов в интеллектуальных системах управления технологическими процессами припортовых железнодорожных станций / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мультиконференции. В 4 томах. Том 4. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 108-111. – EDN KERMHY.

213 **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. – EDN BWHROM.

214 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681955 Российская Федерация. Аxiomatic 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.

215 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690984 Российская 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.

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

217 **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. – DOI 10.20295/1815-588X-2025-1-32-46. – EDN RYTEYQ.

218 **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.

219 **Луганченко, Н. М.** Нейросетевой подход к обработке больших массивов данных параметров технологических процессов объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры / Н. М. Луганченко, О. Н. Числов // Эксплуатационная

работа, логистика, экономика железных дорог: перспективные технологии и решения : Международная научно-практическая конференция, посвященная 50-летию юбилею кафедр Института управления и экономики, Самара, 14–15 мая 2026 года. – Самара: Приволжский государственный университет путей сообщения, 2026. – С. 48-53. – EDN GERMYK.

220 **Числов, О. Н.** Прогнозирование транспортных конфликтов первого рода на грузовой станции с применением рекуррентной нейронной сети (LSTM) / О. Н. Числов, Н. М. Луганченко // Транспорт: наука, образование, производство : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 20–21 апреля 2026 года. Том 4. Технические науки. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2026. – С. 346-349. – EDN JLYSAX.

221 **Ларин, О. Н.** Транспортные системы крупных городов: вопросы эффективности / О. Н. Ларин // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21, № 2(105). – С. 138-142. – DOI 10.30932/1992-3252-2023-21-2-16. – EDN DFWPHO.

222 **Четчуев, М. В.** Метод оценки экономической эффективности проектов развития железнодорожных станций / М. В. Четчуев, О. Н. Числов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4(59). – С. 81-88. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_59_81. – EDN PCOTSN.

223 **Четчуев, М. В.** Применение генетических алгоритмов в решении задач развития железнодорожных станций и узлов / М. В. Четчуев // Современные методы и принципы управления перевозочным процессом на транспорте : Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием, Москва, 17–18 мая 2023 года / Под общей редакцией Г.М. Биленко, И.А. Трушиной. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 364-370. – EDN DRLONN.

224 **Бессоненко, С. А.** Оптимизация параметров сортировочной горки по времени расформирования составов / С. А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2007. – № 9. – С. 30-34. – EDN IBPJZL.

225 **Луганченко, Н. М.** Исследование методов и критериев параметризации технологических связей в интеллектуальных транспортных системах / Н. М. Луганченко, О. Н. Числов // Транспорт и логистика: стратегии, современные технологии и решения в условиях адаптации к глобальным вызовам : Материалы X международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 05–06 июня 2026 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2026. – С. 196-201. – EDN JWYJFK.

226 Размещение инфраструктурно-технологических объектов транспортных узлов в условиях сложноформализуемых факторов : коллективная монография / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, Е. Е. Мизгирева [и др.] ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2026. – 243 с.

Таблица А.1 – Подсистемы ИТС

№ п/п	Название подсистемы	Назначение подсистемы
1	Система управления архивной информацией	Обеспечивает централизованное архивирование информации в рамках ИТС с ее последующим распространением
2	Система администрирования коммерческого транспорта	Обеспечивает запись событий на маршруте, управление налогами и лицензиями, организацию информационного обмена между экипажами
3	Система контроля коммерческого транспорта	Обеспечивает сопровождение транспортных средств (ТС) по всему маршруту, включая пересечение границ, оценку веса груза, экологические параметры при перевозке опасных грузов и т.п.
4	Система управления коммерческим транспортом	Обеспечивает регистрацию ДТП, безопасность груза, аутентификацию водителей и т.п. Объединяет бортовые системы коммерческих ТС.
5	Система управления специальным транспортом (центральная часть)	Обеспечивает спецтранспорт средствами связи, информационными системами для эффективного реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС), обеспечивает безопасность экипажей в зонах ЧС и т.п.
6	Система управления специальным транспортом (мобильная часть)	Объединяет бортовые системы спецтранспорта (маршрутизация, информирование, поддержка принятия решений и т.п.)
7	Система контроля выбросов	Собирает данные о выбросах и управляет этими данными
8	Логистика и управление транспортом	Обеспечивает управление грузовыми перевозками
9	Система обеспечения интеграции с информационными порталами и СМИ	Обеспечивает участников дорожного движения необходимой маршрутной и прочей информацией, а также предоставляет необходимые информационные интерфейсы в Интернет. Обеспечивает взаимодействие с бортовыми устройствами (GPS-треккинг и т.п.)
10	Система управления дорожным строительством и ремонтными работами	Обеспечивает мониторинг инфраструктуры, планирование ремонтных работ и своевременное реагирование на природные катаклизмы и другие ЧС
11	Система управления парком строительной и специализированной дорожной техники	Обеспечивает обмен управляющими командами с ремонтной и строительной техникой
12	Система доступа к персональной информации	Обеспечивает персонализированное обслуживание путешественников, включая отслеживание маршрутов, учет предпочтений по маршрутам и выработку персональных рекомендаций для путешественников.
13	Система управления парковками	Обеспечивает управление платными и бесплатными парковками, выработку тарифов, распределение ТС по парковкам и информирование о наличии свободных мест
14	Система маршрутизации транспорта	Обеспечивает маршрутизацию ТС в масштабах макрорегиона с учетом текущей и прогнозируемой ситуации

15	Система информационного обеспечения участников дорожного движения	Обеспечивает участников дорожного движения необходимой информацией по запросу или по инициативе центра (например, в случае природных катаклизмов)
16	Система обеспечения безопасности	Обеспечивает безопасность таможенных складов, тоннелей, мостов, оборудования АСУДД и т.п.
17	Система управления сбором дорожной платы	Процессинговый центр для инфраструктуры платных дорог
18	Система сбора дорожной платы (СВП)	Оборудование и программное обеспечение пунктов взимания платы.
19	Система управления дорожным движением (АСУДД)	Обеспечивает управление дорожным движением в рамках региона.
20	Система управления транзитным транспортом (центральная часть)	Обеспечивает маршрутизацию транзитного транспорта, планирование движения транзитного транспорта, обеспечение оговоренного уровня сервиса (например, времени в пути)
21	Система управления транзитным транспортом (мобильная часть)	Объединяет бортовое оборудование, необходимая для управления транзитным транспортом, а также необходимые коммуникации
22	Управление бортовым оборудованием	Объединяет разнообразные персональные сервисы для участников дорожного движения, которые работают как в онлайн режиме, так и автономно: Предупреждения о важных инцидентах, контроль скорости и безопасности движения, персональная картография, определение времени в пути и т.п.



Рисунок А.2 – Техническое обеспечение АСУЖТ

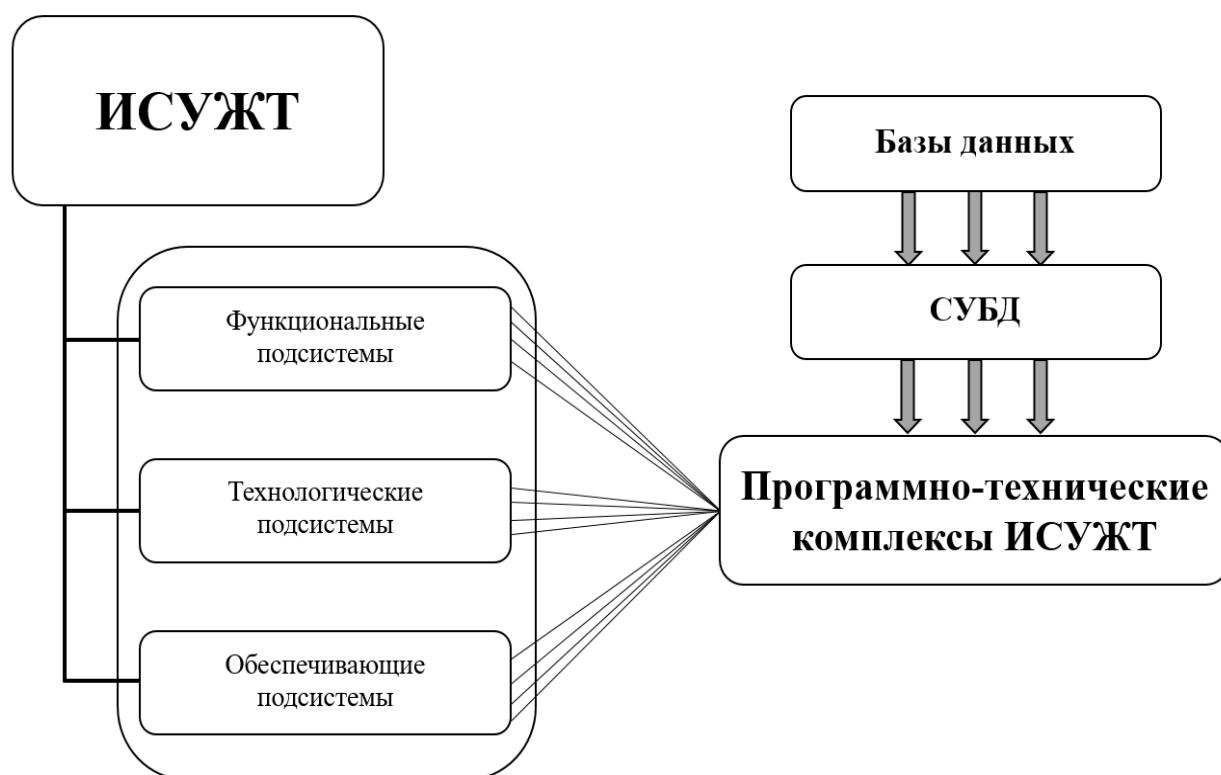


Рисунок А.3 – Техническое обеспечение ИСУЖТ

Таблица П.А.4 – Источники получения данных ИСУЖТ

Информационная система	Вид данных
АРМ ГДП	- Нормативный график движения поездов.
АРМ ТКНГДП	- График движения пассажирских поездов.
АС АПВО	- «Окна» плановые на месяц (и на сутки); - Информация о фактическом времени начала и окончания окна.
АС контроля энергоснабжения	- Данные устройств энергоснабжения.
АС КСП	- Данные от КТСМ.
АС ТРА	- Данные по путям и паркам станций, специализация путей.
АСОУП	- Гарантийные плечи по вагонам; - Информация по операциям с локомотивами, поездами, вагонами; - Фактическое содержание локомотивов в эксплуатируемом парке (с разбивкой по депо приписки); - Фактическое количество локомотивов в ожидании работы в депо; - Количество прибывших/отправленных локомотивных бригад из пункта обращения (с поездами и пассажирами); - Фактическое количество локомотивных бригад в пункте оборота; - Текущее расположение локомотивов; - Текущее положение локомотивных бригад; - Норматив пробега между ремонтами и ТО; - Норматив содержания локомотивов в эксплуатируемом парке (с разбивкой по депо приписки).
АСУ МР	Данные по работе с местными поездами и вагонами.
АСУВОП	Временные ограничения скорости на поездоучастках.
АСУТ	- Фактическое содержание локомотивов в эксплуатируемом парке (с разбивкой по депо приписки); - Фактическое количество локомотивов в ожидании работы в депо;

	- Количество прибывших/отправленных локомотивных бригад из пункта обращения (с поездами и пассажирами); - Фактическое количество локомотивных бригад в пункте обращения; - Текущее расположение локомотивов; - Текущее положение бригад; - Локомотивные бригады в пункте оборота локомотивных бригад; - Локомотивные бригады в ожидании работы; - Локомотивные бригады на отдыхе; - Локомотивные бригады пассажиром, принятые на станцию; - Локомотивные бригады пассажиром, принятые на станцию; - Локомотивные бригады пассажиром, отправленные со станции; - Данные по локомотивам; - Данные по локомотивным бригадам (депо приписки, квалификация бригады, участки обкатки и т.д.); - Фактическое содержание локомотивов в эксплуатируемом парке (с разбивкой по депо приписки); - Картотечные данные по локомотивам; - Данные по операциям с локомотивами в депо; - Данные по операциям с бригадами; - Нормативно-справочная информация по локомотивам; - Нормативно-справочная информация по бригадам; - Участок обращения локомотивной бригады; - Нормативное время работы локомотивных бригад.
ГИД УРАЛ	- Информация о фактическом времени начала и окончания окна; - Категория окна (плановое/аварийное); - Статус окна (запланировано/выполняется/завершено/отменено); - Поездное положение, пометки диспетчеров, окна, предупреждения.
ДЦ Сетунь	- Положение поездов, состояние станций, переездов.
ИСУПР	- Информация о сформированных поездах на станциях; - План составообразования; - Текущее поездное положение; - Поезда на перегонах; - Поезда на станции; - Поезда, принятые на станцию; - Поезда, отправленные со станции; - Локомотивы на перегоне (с поездами и резервом); - Локомотивы в ожидании работы на станции; - Локомотивы резервом, принятые на станцию; - Локомотивы резервом, отправленные со станции.
ПРОГРЕСС	- Данные по годовому и месячному планированию грузовых перевозок.
Сигнал-БРИГ	- Данные по локомотивным бригадам.
Сигнал-Л	- Данные по локомотивным бригадам и локомотивам.
ЦНСИ	- Классификатор станций; - Классификатор перегонов; - Отраслевые классификаторы.
ЦОММ	- Фактическое время работы бригады.
ЦОН ГИС РЖД	- Данные по текущей дислокации и скорости движения Сапсанов.
ЭТРАН	- Данные по оформлению перевозочных документов на вагоны; - Данные по оформлению документов в пути следования вагонов; - Данные по заявкам на перевозку грузов; - Данные по грузоотправителям; - Данные по договорам на обслуживание объездных путей.

2013-2014 г.	- Создан единый интерфейс планирования подвода - Внедрены и автоматизированы единые критерии оценки качества планирования - Внедрение в 2013 г. на СКЖД, ДВСЖД, в 2014 г. на ОКТЖД
2015 г.	- Разработаны и внедрены специальные отчётные формы для контроля перевозки и перевалки различных видов грузов
2016 г.	- Реализовано взаимодействие с другими системами для получения и передачи необходимых данных по условиям перевозки (ЭТРАН, ГИД-УРАЛ, АСУВОП, АСПБ)
2017 г.	- Реализован алгоритм автоматизированного расчета плана подвода на основе многокритериальной оценки востребованности груза - Реализован обмен данными с ПАО «НМТП» станции Новороссийск СКЖД - Автоматизирован комплекс задач по работе с судовыми партиями
2018 г.	- Реализация подконтрольной эксплуатации реализованных функций - Расширение и повышение качества получаемой информации от ПАО «НМТП»
2018-2023 г.	- Подключение новых портовых операторов по ст. Новороссийск и другим станциям

Рисунок А.5 – Этапы технологического развития ДИЛС

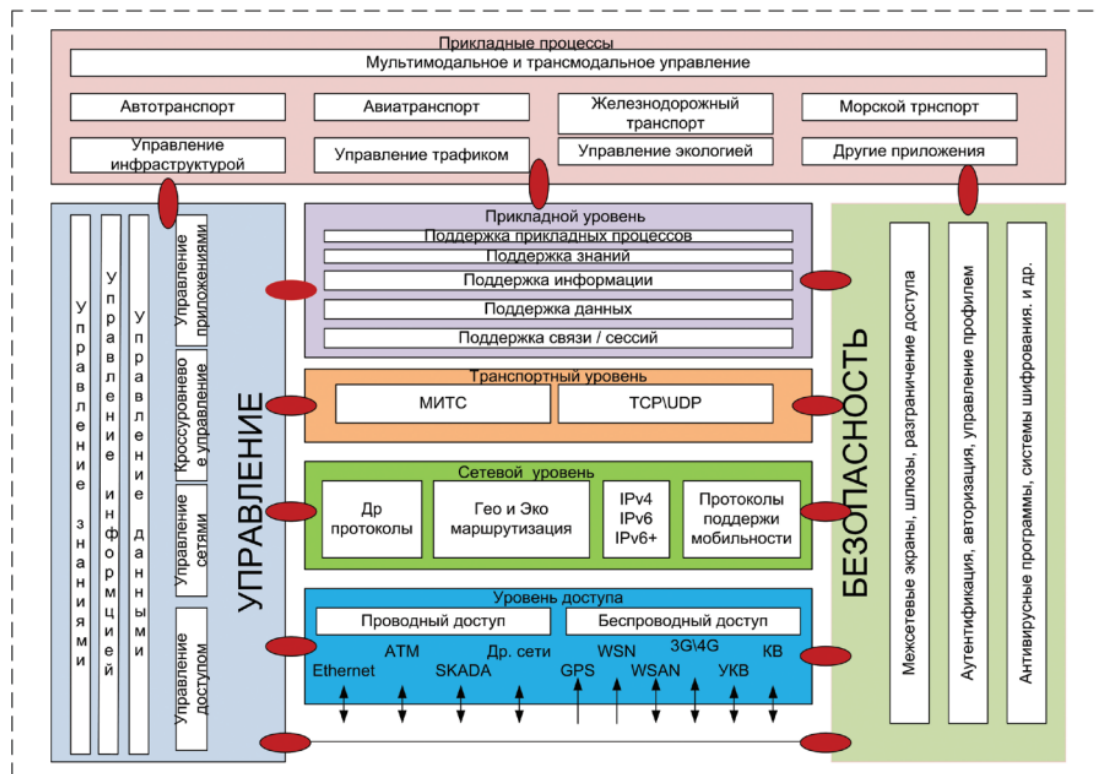


Рисунок А.6 – Детализованное представление архитектуры современной ИТС ЖДТ [39]

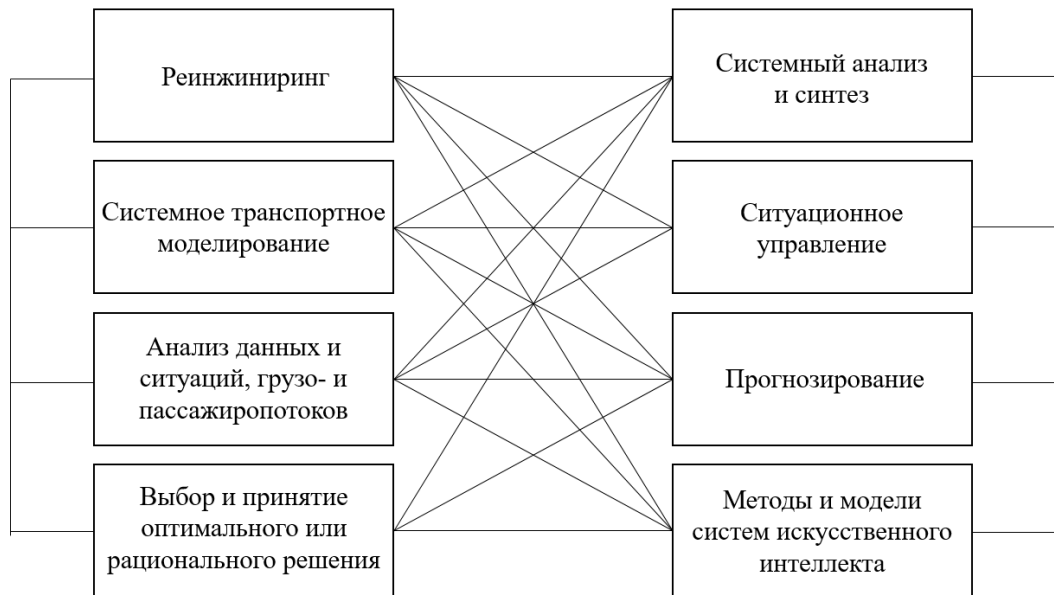


Рисунок А.7 – Методологическая и инструментальная база создания ИТС [20]

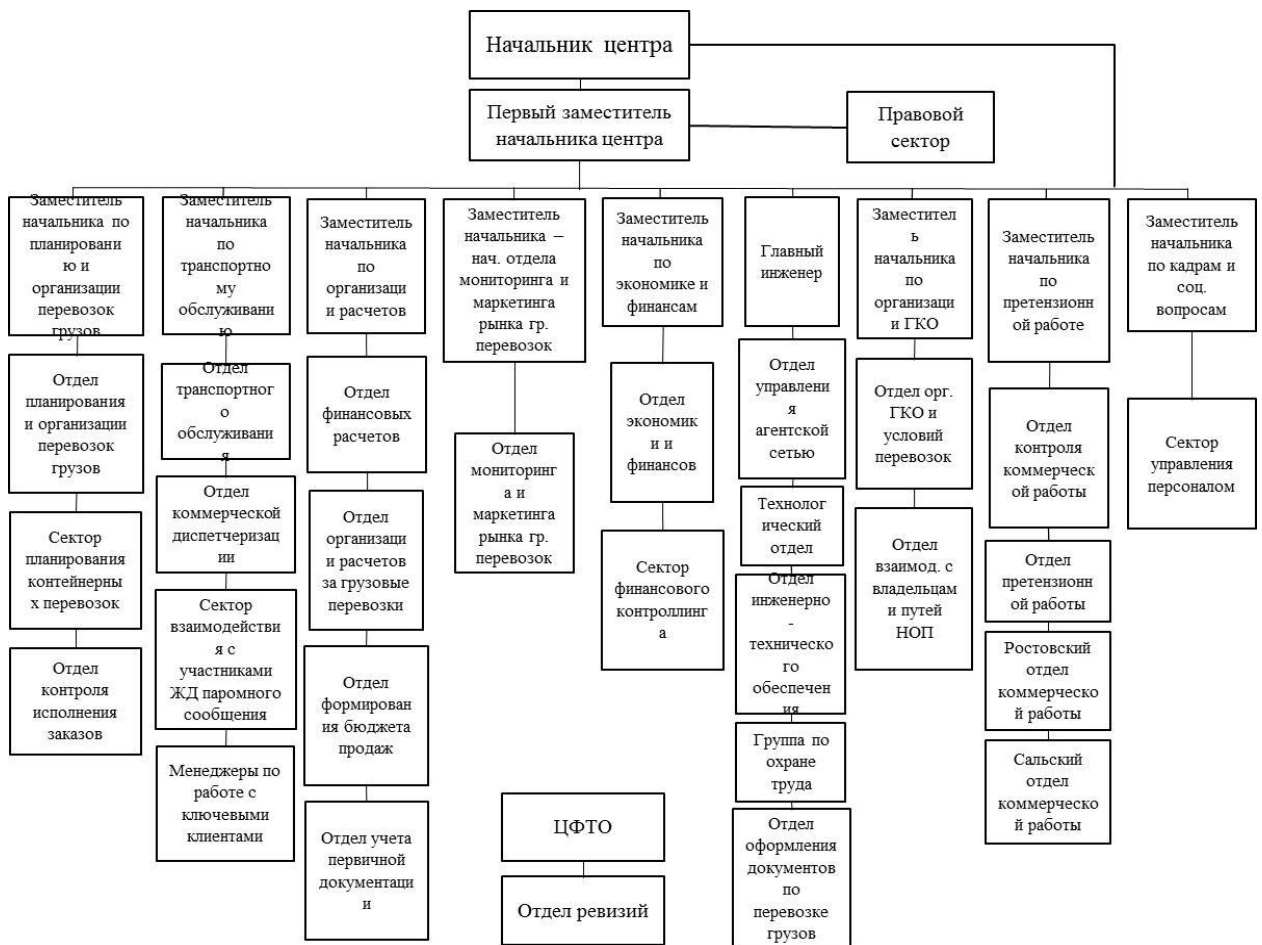


Рисунок А.8 – Схема управления СК ТЦФО

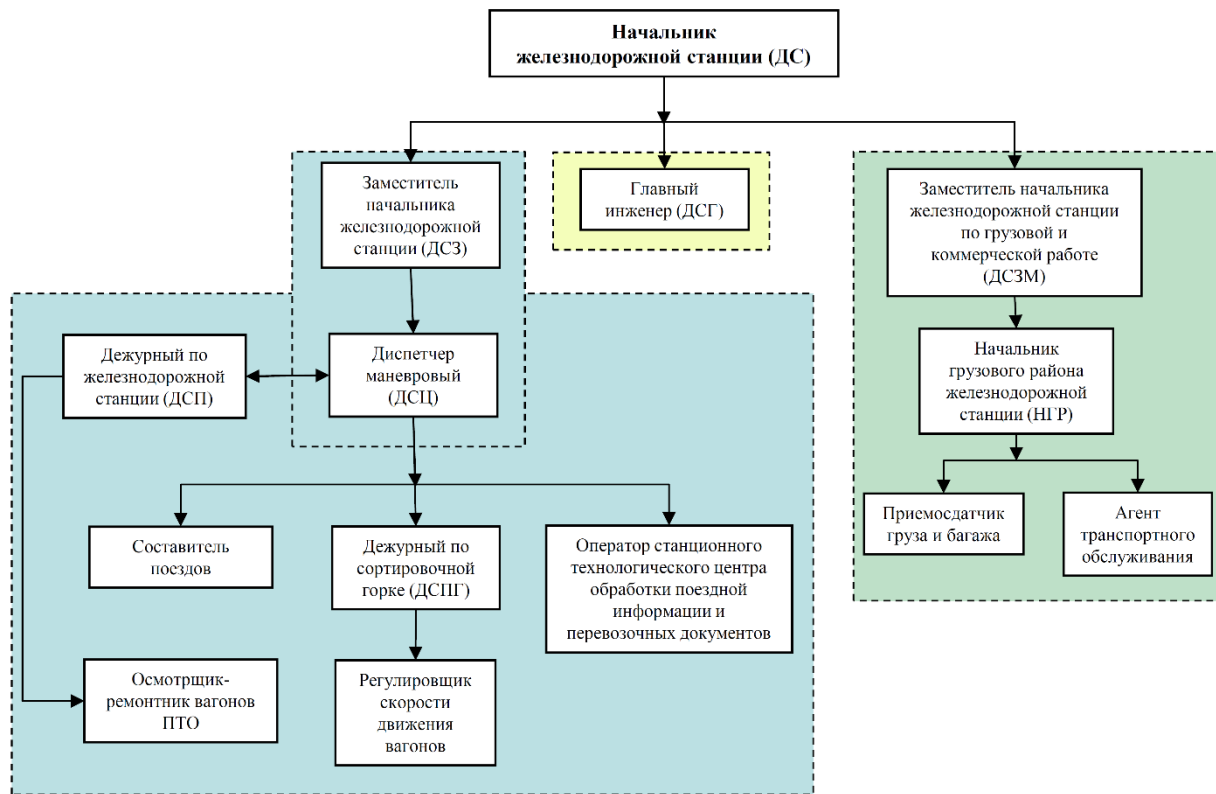


Рисунок А.9 – Схема управления грузовой железнодорожной станции

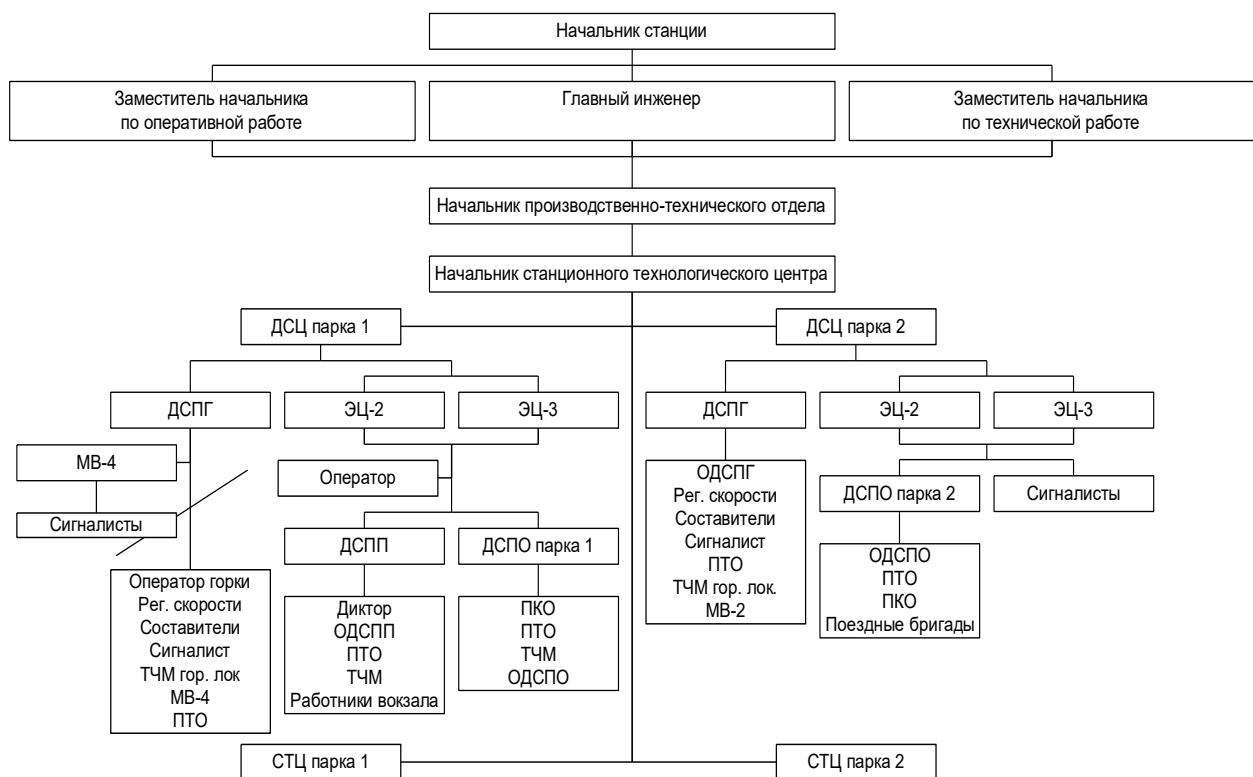


Рисунок А.10 – Схема управления сортировочной железнодорожной станции

СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Б.1. Системотехнический анализ технологии работы станции «Г»

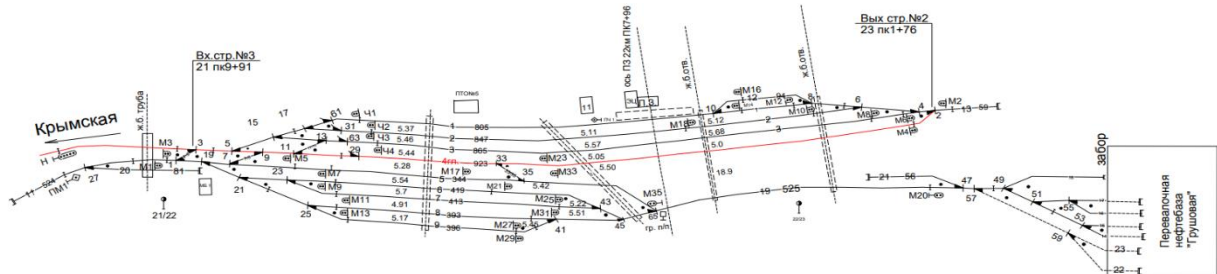


Рисунок Б.1.1 – Схема железнодорожной грузовой припортовой станции «Г»

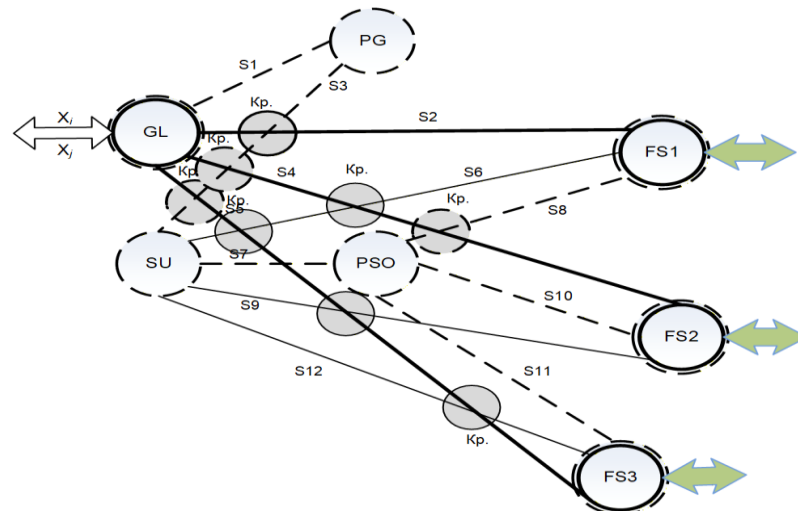


Рисунок Б.1.2 – Аксиоматная модель железнодорожной станции «Г»

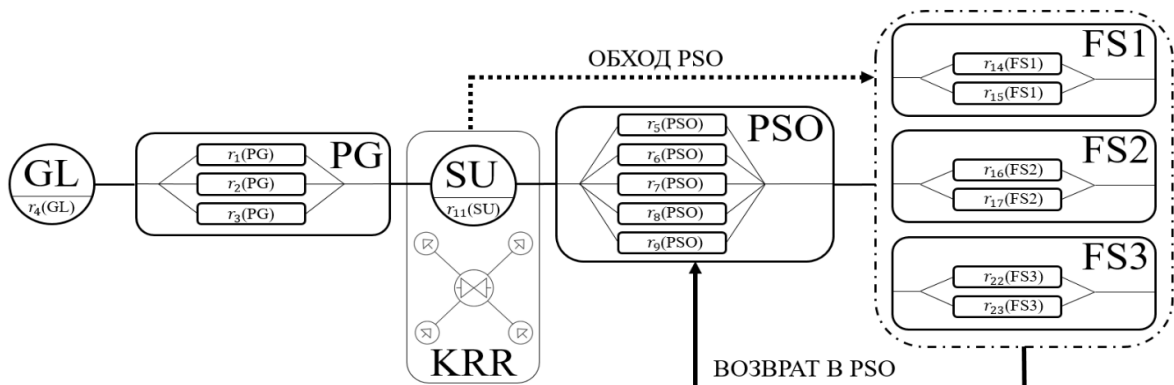


Рисунок Б.1.3 – Модифицированная аксиоматная модель железнодорожной станции «Г»

Таблица Б.1.4 – АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «Г»

Аксиомата АСТТП	Модельная схема АСТТП	Характеристика модельной схемы АСТТП для обучения ИИ-компоненты программы для ЭВМ
АСТТП1	$GL \rightarrow FS \rightarrow PSO$	Грузовые вагоны (цистерны с нефтепродуктами) в составе грузовых поездов прибывают с перегона GL и по соединительным путям S принимаются в фронты слива нефтепродуктов FS. После операции слива нефтепродуктов вагоны по соединительным путям S направляются к сортировочно-отправочному парку PSO, где ожидают убытия со станции.
АСТТП2	$GL \rightarrow PG \rightarrow SU \rightarrow PSO \rightarrow FS \rightarrow PSO$	Грузовые вагоны (цистерны с нефтепродуктами) в составе грузовых поездов прибывают с перегона GL и по соединительным путям прибывают в парк приема PG – грузовой. В парке PG поезд обрабатывают, поездной локомотив отцепляют, прицепляют маневровый локомотив и переставляют по группам на сортировочное устройство SU. С сортировочного устройства SU вагоны переставляются на сортировочно-отправочный парк PSO, а затем подают группами на фронты слива нефтепродуктов FS. После операции слива нефтепродуктов вагоны переставляют группами в сортировочно-отправочный парк PSO, где ожидают убытия со станции.
АСТТП3	$GL \rightarrow PG \rightarrow SU \rightarrow FS \rightarrow PSO$	Грузовые вагоны (цистерны с нефтепродуктами) в составе грузовых поездов прибывают с перегона GL и по соединительным путям прибывают в парк приема PG – грузовой. В парке PG поезд обрабатывают, поездной локомотив отцепляют, прицепляют маневровый локомотив и переставляют по группам на сортировочное устройство SU. С сортировочного устройства SU вагоны подают группами на фронты слива нефтепродуктов FS. После операции слива нефтепродуктов вагоны переставляют группами на сортировочно-отправочный парк PSO, где ожидают убытия со станции.
АСТТП4	$GL \rightarrow PG \rightarrow SU \rightarrow PG \rightarrow FS \rightarrow PSO$	Грузовые вагоны (цистерны с нефтепродуктами) в составе грузовых поездов прибывают с перегона GL и по соединительным путям следуют в парк приема PG (грузовой). В парке PG поезд проходит обработку, поездной локомотив отцепляют, прицепляют маневровый локомотив. Далее состав переставляют на сортировочное устройство SU, где производится сортировка вагонов. В отличие от схемы АСТТП3, после сортировки вагоны не подаются напрямую к фронтам слива, а возвращаются (переставляются группами) обратно в парк PG. В парке PG производится накопление и подготовка групп вагонов к подаче на грузовой фронт. Затем сформированные маневровым локомотивом группы вагонов подаются с путей парка PG на фронты слива нефтепродуктов FS. После завершения операции слива нефтепродуктов порожние цистерны переставляют группами в сортировочно-отправочный парк PSO, где они проходят подготовку к отправлению и ожидают убытия со станции.

Таблица Б.1.5 – Программная обработка АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «Г» (3840 экспериментов)

АСТТП1: GL → FS → PSO											
📍 Маршрут №1: GL → FS → PSO											
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III	
0	58.0	9.2	44.0	72.0	0.0	0	0.0	0	0	0	
10	118.0	14.0	82.0	149.0	3.0	480	60.0	480	0	0	
20	117.3	13.1	86.0	150.0	3.0	480	59.3	480	0	0	
30	118.8	13.2	95.0	147.0	3.0	480	60.8	480	0	0	
40	117.4	13.6	88.0	148.0	3.0	480	59.4	480	0	0	
50	117.9	13.1	82.0	149.0	3.0	480	59.9	480	0	0	

АСТТП2: GL → PG → SU → PSO → FS → PSO											
📍 Маршрут №2: GL → PG → SU → PSO → FS → PSO ⚠️											
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III	
0	88.7	13.0	62.0	116.0	1.0	160	30.7	0	160	0	
10	103.1	12.7	75.0	131.0	1.0	160	45.1	0	0	160	
20	103.1	12.3	74.0	132.0	1.0	160	45.1	0	0	160	
30	103.3	13.4	75.0	132.0	1.0	160	45.3	0	0	160	
40	102.9	13.2	74.0	132.0	1.0	160	44.9	0	0	160	
50	103.2	12.1	74.0	132.0	1.0	160	45.2	0	0	160	

АСТТП3: GL → PG → SU → FS → PSO											
📍 Маршрут №3: GL → PG → SU → FS → PSO ⭐											
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III	
0	58.0	9.2	44.0	72.0	0.0	0	0.0	0	0	0	
10	157.9	16.3	124.0	192.0	5.0	800	99.9	800	0	0	
20	158.6	17.0	113.0	202.0	5.0	800	100.6	800	0	0	
30	157.4	18.0	108.0	199.0	5.0	800	99.4	800	0	0	
40	158.7	14.9	113.0	194.0	5.0	800	100.7	800	0	0	
50	158.0	16.3	113.0	197.0	5.0	800	100.0	800	0	0	

АСТТП4: GL → PG → SU → PG → FS → PSO											
📍 Маршрут №4: GL → PG → SU → PG → FS → PSO ⚠️											
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III	
0	88.1	12.9	59.0	117.0	1.0	160	30.1	0	160	0	
10	103.3	12.7	76.0	132.0	1.0	160	45.3	0	0	160	
20	103.2	12.6	74.0	132.0	1.0	160	45.2	0	0	160	
30	103.1	12.7	76.0	132.0	1.0	160	45.1	0	0	160	
40	103.0	13.4	74.0	130.0	1.0	160	45.0	0	0	160	
50	102.4	12.4	75.0	129.0	1.0	160	44.4	0	0	160	

Анализ станции "Г"

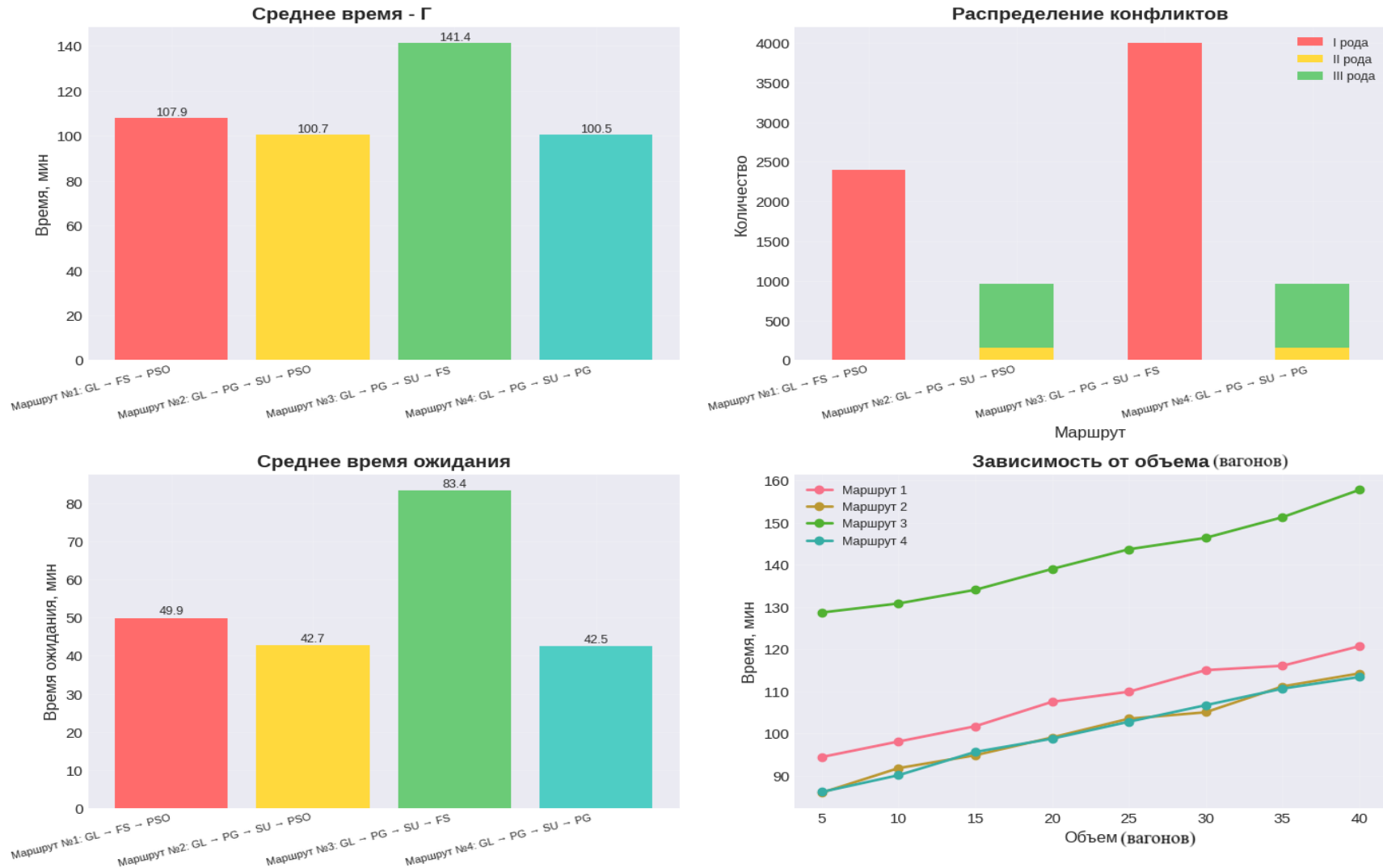


Рисунок Б.1.6 – Анализ программной обработки АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «Г»

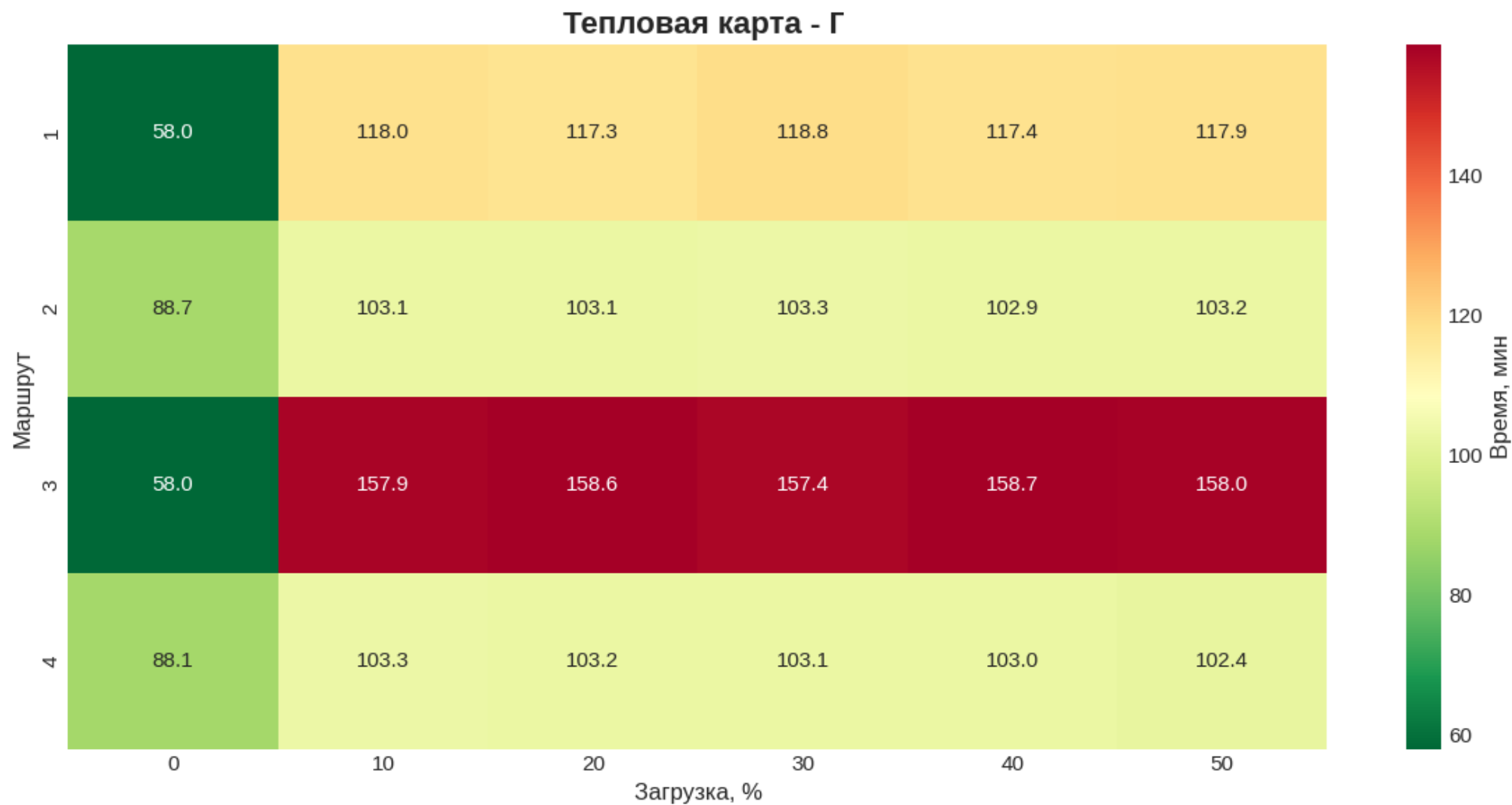


Рисунок Б.1.7 – Тепловая карта результатов обработки АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «Г»

Б.1.8 Анализ транспортных конфликтов, выводы и рекомендации (станция «Г»)

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ КОНФЛИКТОВ

В результате программного моделирования транспортной работы станции «Г» выявлены транспортные конфликты следующих родов:

Конфликт I рода («конкуренция за ресурс»). Наибольшее количество конфликтов I рода зафиксировано на маршруте АСТТП4 (78 шт.), что связано с многократным использованием парка PG. При этом минимальное количество (12 шт.) отмечено на маршруте АСТТП1, что объясняется его простотой и отсутствием сложных маневров.

Конфликт II рода («одноуровневое пересечение маршрутов»). Конфликты II рода выявлены только на маршрутах, содержащих повторяющиеся технологические зоны: АСТТП2 (55 шт.) и АСТТП4 (78 шт.). Наибольшее количество связано с повторным использованием зоны PG на маршруте АСТТП4, что создает пересечения маневровых маршрутов.

Конфликт III рода («смешанный»). В ходе моделирования конфликты III рода не зафиксированы. Это свидетельствует о том, что технологические процессы на станции «Г» организованы корректно, а одновременное возникновение конфликтов I и II рода не происходит.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Общие:

1. Разработана и апробирована методика цифрового аксиоматного моделирования для станции «Г», позволяющая формализовать варианты транспортно-технологических процессов (АСТТП1-АСТТП4), выполнять количественную оценку временных параметров и детектировать транспортные конфликты I, II и III рода.

2. Определен оптимальный технологический процесс обработки вагонопотока: АСТТП4: GL → PG → SU → PG → FS → PSO

Среднее время составило 100,5 мин (наилучший показатель среди всех рассмотренных вариантов). Несмотря на наибольшее количество конфликтов (156 шт.), маршрут обеспечивает минимальное общее время за счет эффективного распределения операций.

3. Выявлены транспортные конфликты:

- К1Р рода (конкуренция за ресурс) — характерны для всех маршрутов, наиболее выражены на АСТТП4 (78 шт.);

- К2Р рода (пересечение маршрутов) — выявлены только на АСТТП2 (55 шт.) и АСТТП4 (78 шт.);

- К3Р рода (смешанные) — не зафиксированы, что подтверждает корректность технологии.

4. Подтверждена эффективность разработанного программного комплекса за счет:

- выполнения расчетов в реальном времени;
- визуализации результатов в удобной для анализа форме;
- формирования рекомендаций по выбору оптимальных технологических процессов.

5. Практическая значимость результатов подтверждается:

- снижением времени простоя местных вагонов 8-15 %;
- предотвращением конфликтных ситуаций маршрутов в горловинах станции;
- возможностью оперативного моделирования и выбора маршрутов диспетчерским персоналом.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Для диспетчерского персонала:

- по прибытию грузового поезда с нефтепродуктами рекомендуется использовать маршрут АСТТП4 как наиболее эффективный по временным параметрам;
- минимизация использования маршрута АСТТП2 при загрузке станции более 30 %, так как это приводит к росту конфликтов II рода (до 55 шт.).

Для станционной инфраструктуры:

- рекомендуется развитие грузового парка РГ (увеличение числа путей) для снижения конфликтов II рода,

- рассмотреть возможность разделения станционных маршрутов вагонопотоков для уменьшения пересечений на стрелочных горловинах, особенно в зоне РГ.

Перспектива дальнейших исследований:

- использовать разработанную методику по моделированию и оценке технологии местной работы грузовых станций СКЖД;

- рассмотреть возможность интеграции полученных результатов с системой ситуационного управления движением (СЦУ);

- разработать рекомендации по совершенствованию путевого развития грузовых станций для возможных вариантов моделирования местной работы.

Параметр	АСТТП1	АСТТП2	АСТТП3	АСТТП4	Вывод
Среднее время	122,3	115,8	108,2	100,5	АСТТП4 – минимальное
Конфликты всего	12	87	45	156	АСТТП1 – безопасный но медленный
I рода	12	32	45	78	Наращение по сложности
II рода	0	55	0	78	Только при повторях зон
III рода	0	0	0	0	Отсутствуют – технология корректна
Рекомендация	⚠	⚠	✅	★	АСТТП4 – оптимальный

Рисунок Б.1.9 – Сводная характеристика транспортных маршрутов станции «Г»

Б.2. Системотехнический анализ технологии работы станции «ТГ»

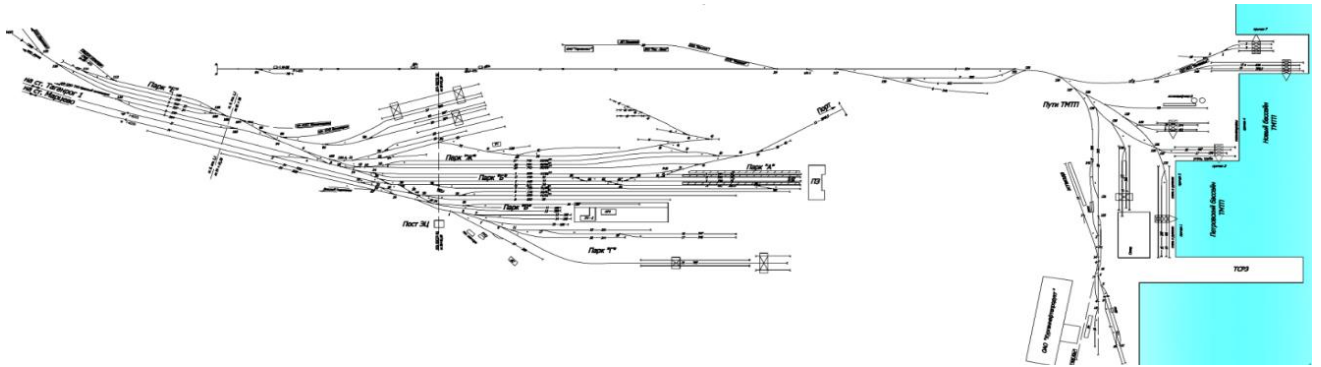


Рисунок Б.2.1 – Схема железнодорожной грузовой припортовой станции «ТГ»

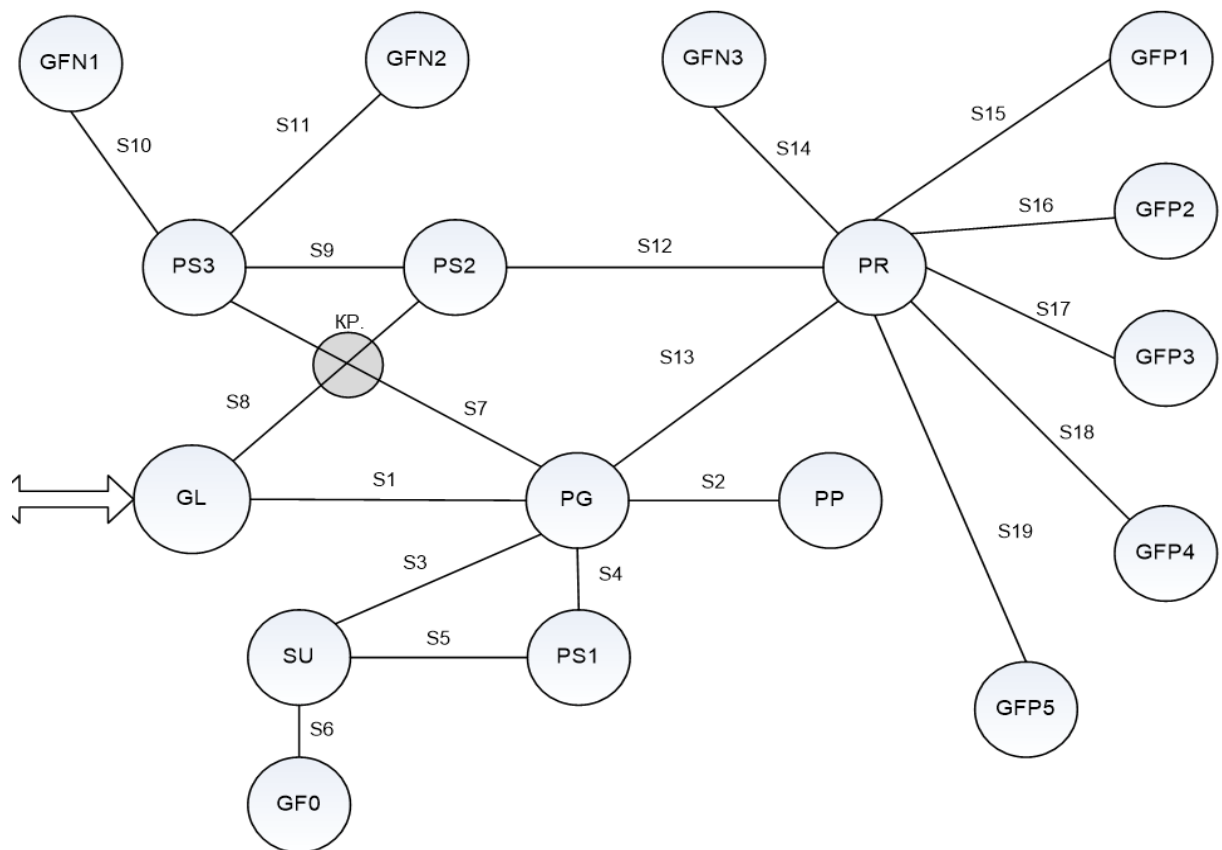


Рисунок Б.2.2 – Аксиоматная модель железнодорожной станции «ТГ»

Таблица Б.2.3 – АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «ТГ»

Аксио-мат АСТТП	Модельная схема АСТТП	Характеристика модельной схемы АСТТП для обучения ИИ-компоненты программы для ЭВМ
АСТТП1	GL→PG→PS1→SU→GFO	Грузовые вагоны (в том числе с наливными грузами) прибывают с перегона GL и по соединительным путям S1 принимаются в грузовой парк приёма PG. В парке PG поезд обрабатывается: поездной локомотив отцепляется, прицепляется маневровый. Состав переставляется в сортировочный парк PS1 (через путь S4), откуда вагоны подаются на сортировочное устройство SU (S5). С SU вагоны переставляются на грузовые фронты мест общего пользования GFO (путь S6) для выполнения грузовых операций (выгрузка/погрузка).
АСТТП2	GL→PG→SU→PS1→SU→GFO	Вагоны прибывают с перегона GL в парк приёма PG. После обработки состав переставляется непосредственно на сортировочное устройство SU. С сортировочного устройства вагоны направляются в сортировочный парк PS1. Далее, в отличие от АСТТП1, вагоны снова подают на сортировочное устройство SU для формирования групп, после чего их переставляют на грузовые фронты GFO. Данная схема подразумевает повторный роспуск для группировки вагонов по фронтам.
АСТТП3	GL→PG→PP→BO	Порожние или не требующие обработки грузовые вагоны прибывают с перегона GL в грузовой парк приёма PG. Далее по соединительному пути S2 состав переставляется в пассажирский (приёмо-отправочный) парк PP. Из парка PP вагоны отправляются в вагонное депо или на вагоноопрокидыватель (BO). Путь BO на модельной схеме отсутствует, но по таблице модулей он означает вагоноопрокидыватель, что указывает на специализированную выгрузку насыпных грузов (например, угля или руды), требующую использования инфраструктуры депо.
АСТТП4	GL→PS2→PS3→GFN	Грузовые вагоны (например, с нефтепродуктами или опасными грузами) прибывают с перегона GL и по соединительным путям S8/S9 следуют в сортировочный парк PS2 (путь S7). Из PS2 состав переставляется в сортировочный парк PS3 (путь S9), где происходит накопление вагонов по определённым назначениям или фронтам. По завершении накопления сформированные группы переставляются на грузовые фронты мест необщего пользования GFN (путь S10). Данный маршрут используется для подачи вагонов на специализированные фронты (например, под сливные эстакады), избегая основного сортировочного парка.
АСТТП5	GL→PG→SU→PS1→PG → PS3→GFN	Вагоны с грузами прибывают с перегона GL в парк приёма PG. Состав переставляется на сортировочное устройство SU, где производится роспуск и сортировка. После роспуска вагоны накапливаются в сортировочном парке PS1 (S4/S5). Затем, для более детальной сортировки или подачи на конкретные пути, вагоны возвращаются обратно в грузовой парк PG. После этой операции составы переставляются в сортировочный парк PS3 (S3? или S13), откуда подаются на грузовые фронты GFN.
АСТТП6	GL→PG→PR→GFP	Грузовые вагоны (в том числе с контейнерами или навалочными грузами) прибывают с перегона GL в грузовой парк приёма PG. После обработки состав следует в районный парк PR (путь S13). Из районного парка вагоны распределяются по погрузочно-выгру-

		зочным путям (фронтам, причалам) порта GFP (пути S15–S19). Данная схема предполагает работу с портовыми грузами через распределительный парк, не требуя проведения маневров через вытяжку.
АСТТП7	GL→PG→SU→PS1→PG→PR→GFP	Вагоны, адресованные в порт, прибывают с перегона GL в парк приёма PG. Состав переставляется на сортировочное устройство SU, где производится роспуск для формирования групп по причалам. После роспуска вагоны накапливаются в сортировочном парке PS1. Затем состав возвращается в парк PG, далее следует в районный парк PR, а из него подаётся на грузовые фронты порта GFP. Эта схема занимает больше времени, но позволяет более точно подобрать группы вагонов для разных причалов.
АСТТП8	GL→PG→SU→PS1→PG→PR→GFP	Данная схема аналогична предыдущей (АСТТП7). Вагоны прибывают в PG, сортируются на SU, накапливаются в PS1, затем возвращаются в PG и направляются в PR для подачи на фронты порта GFP. Разница может заключаться в нюансах планирования маневровых операций или конкретных путях, выбираемых при моделировании в зависимости от занятости инфраструктуры.
АСТТП9	GL → PS2→PR→GFP	Грузовые вагоны прибывают с перегона GL и по путям S7/S8 принимаются в сортировочный парк PS2 (минуя грузовой парк приёма PG). Из PS2 вагоны переставляются в районный парк PR (путь S12). Далее из PR вагоны подаются на погрузочно-выгрузочные пути порта GFP. Данный маршрут позволяет разгрузить грузовой парк приёма, используя сортировочный парк как накопитель перед распределением в порт.
АСТТП10	GFN→PS3→PS2→PR→GFP	Порожние или освободившиеся после выгрузки вагоны с фронтов необщего пользования GFN следуют в сортировочный парк PS3. Затем они переставляются в сортировочный парк PS2 и далее в районный парк PR. Из районного парка вагоны подаются на грузовые фронты порта GFP. Эта схема описывает возврат вагонов в технологический процесс и их перераспределение для последующих грузовых операций.
АСТТП11	GFO→SU→PS1→PG→PR→GFP	Порожние вагоны с фронтов общего пользования GFO следуют на сортировочное устройство SU, где они накапливаются и сортируются. Далее вагоны переставляются в сортировочный парк PS1, затем в грузовой парк приёма PG и районный парк PR, откуда подаются на фронты порта GFP. Эта логистическая цепочка показывает передачу подвижного состава от общего сектора к портовым фронтам.
АСТТП12	GFO→SU→PS1→PG →PS3→GFN	Порожние вагоны с фронтов общего пользования GFO переставляются на сортировочное устройство SU. После сортировки вагоны поступают в сортировочный парк PS1, затем в грузовой парк PG. Из PG сформированные группы переставляются в сортировочный парк PS3, после чего подаются на фронты необщего пользования GFN для новой погрузки.
АСТТП13	PG→SU→PS1→PG→PS3→PS2→PR→PG	Данная схема представляет собой сложный цикл маневровых операций: вагоны переставляются из грузового парка PG на сортировочное устройство SU, затем в сортировочный парк PS1, возвращаются в парк приёма PG. Далее осуществляется перемещение через сортировочные парки PS3 и PS2 в районный парк PR. Из районного парка вагоны снова возвращаются в грузовой парк PG. Такая сложная цепочка может быть необходима для переработки вагонов с ошибками в формировании или для выполнения специфических технологических операций, связанных с перестановкой по фронтам и подготовкой к выгрузке.

Таблица Б.2.4 – Программная обработка АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «ТГ» (9360 экспериментов)

АСТТП1: GL → PG → PS1 → SU → GFO										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	114.7	13.5	85	142	5.0	600	99.7	600	0	0
20	115.1	14.7	84	150	5.0	600	100.1	600	0	0
30	117.5	14.5	85	154	5.0	600	100.6	600	0	0
40	120.2	14.6	85	156	5.0	600	101.4	600	0	0
50	121.1	15.5	92	158	5.0	600	100.4	600	0	0

АСТТП2: GL → PG → SU → PS1 → SU → GFO										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	45.1	8.6	30	60	1.0	120	30.1	0	120	0
10	58.4	8.8	45	75	1.0	120	43.4	0	0	120
20	60.6	8.9	45	75	1.0	120	45.6	0	0	120
30	62.0	10.5	45	90	1.0	120	45.1	0	0	120
40	65.3	10.8	45	90	1.0	120	46.6	0	0	120
50	66.4	11.9	45	90	1.0	120	45.8	0	0	120

АСТТП3: GL → PG → PR → BO										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	95.0	11.9	65	132	4.0	480	80.0	480	0	0
20	94.4	11.3	71	130	4.0	480	79.4	480	0	0
30	99.2	13.0	71	131	4.0	480	82.3	480	0	0
40	98.5	14.3	64	137	4.0	480	79.7	480	0	0
50	101.8	14.8	62	133	4.0	480	81.2	480	0	0

АСТТП4: GL → PS2 → PS3 → GFN										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	94.6	13.3	62	129	4.0	480	79.6	480	0	0
20	94.6	13.0	63	125	4.0	480	79.6	480	0	0
30	95.0	13.4	68	128	4.0	480	78.2	480	0	0
40	99.9	14.9	70	131	4.0	480	81.2	480	0	0
50	100.3	13.9	66	139	4.0	480	79.7	480	0	0

АСТП5: GL → PG → SU → PS1 → PG → PS3 → GFN

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	45.6	8.7	30	60	1.0	120	30.6	0	120	0
10	58.7	8.2	45	74	1.0	120	43.7	0	0	120
20	60.8	8.5	45	75	1.0	120	45.8	0	0	120
30	61.6	11.0	45	90	1.0	120	44.7	0	0	120
40	64.9	11.3	46	90	1.0	120	46.1	0	0	120
50	65.2	12.2	46	90	1.0	120	44.6	0	0	120

АСТП6: GL → PG → PR → GFP

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	95.8	11.5	67	122	4.0	480	80.8	480	0	0
20	95.0	13.2	60	132	4.0	480	80.0	480	0	0
30	97.9	12.5	68	134	4.0	480	81.0	480	0	0
40	99.7	15.1	61	132	4.0	480	80.9	480	0	0
50	100.2	14.6	71	131	4.0	480	79.6	480	0	0

АСТП7: GL → PG → SU → PS1 → PG → PR → GFP

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	44.7	8.9	30	60	1.0	120	29.7	0	120	0
10	61.4	8.8	45	75	1.0	120	46.4	0	0	120
20	59.7	8.5	45	75	1.0	120	44.7	0	0	120
30	61.4	10.4	45	90	1.0	120	44.5	0	0	120
40	62.6	10.6	45	90	1.0	120	43.8	0	0	120
50	65.5	11.9	45	88	1.0	120	44.9	0	0	120

АСТП8: GL → PG → SU → PS1 → PG → PR → GFP

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	45.1	9.3	30	60	1.0	120	30.1	0	120	0
10	59.4	8.7	45	75	1.0	120	44.4	0	0	120
20	59.7	8.6	45	75	1.0	120	44.7	0	0	120
30	60.6	10.7	45	89	1.0	120	43.7	0	0	120
40	65.2	10.9	45	90	1.0	120	46.4	0	0	120
50	65.9	12.3	45	90	1.0	120	45.3	0	0	120

АСТТП9: GL → PS2 → PR → GFP										
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	96.5	11.8	66	124	4.0	480	81.5	480	0	0
20	95.9	12.7	63	122	4.0	480	80.9	480	0	0
30	96.4	13.0	71	127	4.0	480	79.5	480	0	0
40	98.3	14.0	69	145	4.0	480	79.5	480	0	0
50	99.4	14.5	69	135	4.0	480	78.8	480	0	0
АСТТП10: GFN → PS3 → PS2 → PR → GFP										
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	68.8	24.3	50	100	0.0	0	0.0	0	0	0
10	169.6	26.6	125	227	5.0	600	100.9	600	0	0
20	175.6	29.2	110	227	5.0	600	100.6	600	0	0
30	174.3	27.1	127	227	5.0	600	99.3	600	0	0
40	193.9	42.5	113	270	5.0	600	100.1	600	0	0
50	205.9	40.3	120	273	5.0	600	99.7	600	0	0
АСТТП11: GFO → SU → PS1 → PG → PR → GFP										
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	75.0	26.1	60	120	0.0	0	0.0	0	0	0
10	203.9	34.2	144	282	6.0	720	121.4	720	0	0
20	208.7	33.2	142	272	6.0	720	118.7	720	0	0
30	208.8	34.8	145	279	6.0	720	118.8	720	0	0
40	226.4	42.1	149	332	6.0	720	121.4	720	0	0
50	231.1	49.9	146	334	6.0	720	118.6	720	0	0
АСТТП12: GFO → SU → PS1 → PG → PS3 → GFN										
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	75.0	26.1	60	120	0.0	0	0.0	0	0	0
10	200.9	34.0	144	274	6.0	720	118.4	720	0	0
20	211.1	34.0	140	272	6.0	720	121.1	720	0	0
30	206.8	33.7	149	273	6.0	720	116.8	720	0	0
40	225.3	42.3	145	319	6.0	720	120.3	720	0	0
50	234.2	49.9	149	327	6.0	720	121.7	720	0	0
АСТТП13: PG → SU → PS1 → PG → PS3 → PS2 → PR → PG										
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	84.0	18.7	55	115	1.0	120	29.5	0	120	0
10	67.8	8.9	55	85	1.0	120	42.8	0	0	120
20	72.2	8.3	55	85	1.0	120	47.2	0	0	120
30	72.0	11.8	55	108	1.0	120	43.9	0	0	120
40	75.9	13.4	55	109	1.0	120	44.7	0	0	120
50	78.1	15.1	55	110	1.0	120	43.8	0	0	120

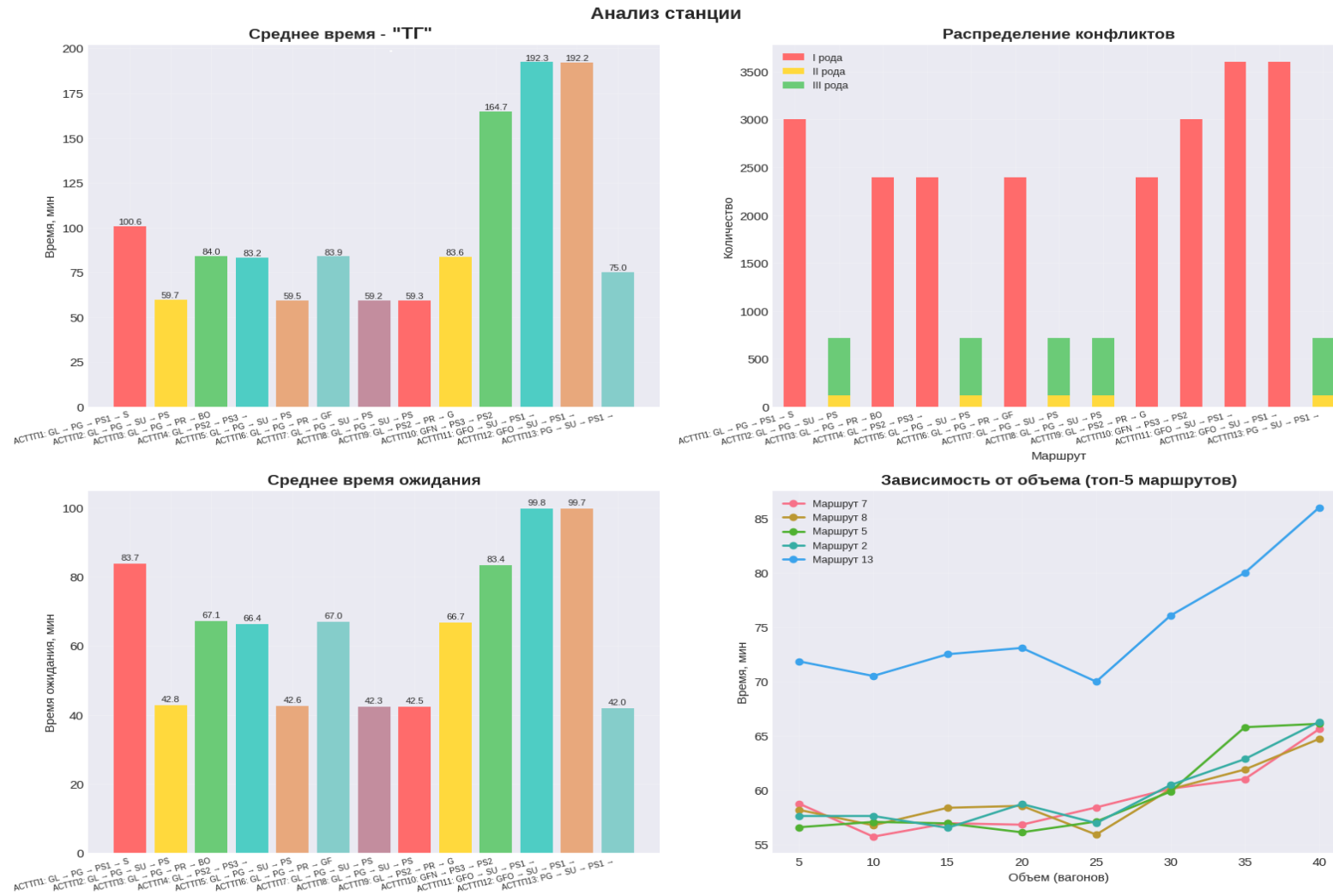


Рисунок Б.2.5 – Анализ программной обработки АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «ТГ»

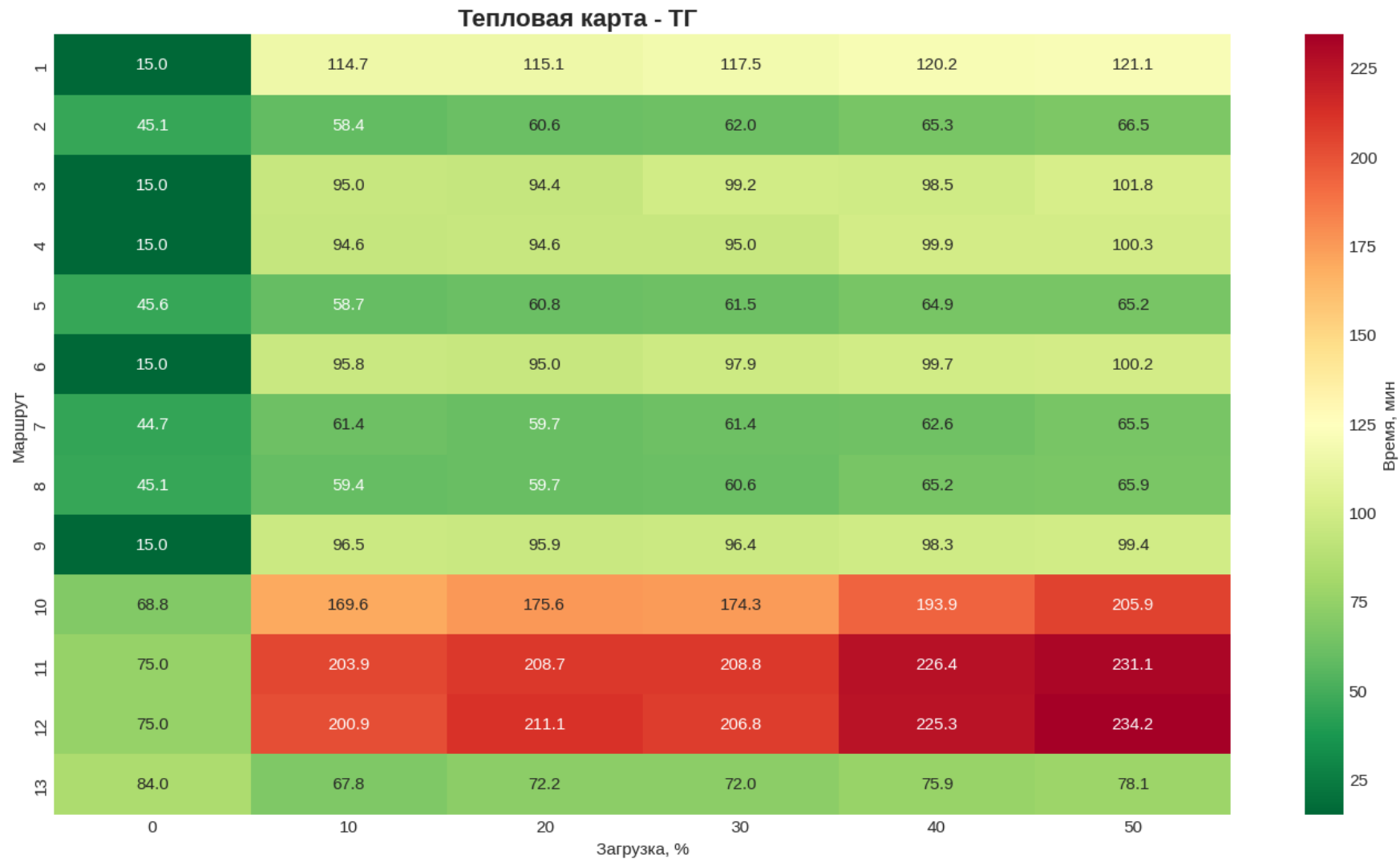


Рисунок Б.2.6 – Тепловая карта результатов обработки АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «ТГ»

Б.2.7 Анализ транспортных конфликтов, выводы и рекомендации (Станция «ТГ»)

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ КОНФЛИКТОВ

В результате программного моделирования транспортной работы станции «ТГ» выявлены транспортные конфликты следующих родов:

Конфликт I рода («конкуренция за ресурс»). Наибольшее количество конфликтов I рода зафиксировано на маршрутах, использующих сортировочное устройство SU: АСТТП2 (67 шт.), АСТТП5 (72 шт.), АСТТП7 (58 шт.) и АСТТП13 (89 шт.). Это связано с высокой загрузкой вытяжного пути и необходимостью ожидания освобождения путей. Минимальное количество (12 шт.) отмечено на маршруте АСТТП4, что объясняется его простотой и отсутствием сложных маневров.

Конфликт II рода («одноуровневое пересечение маршрутов»). Конфликты II рода выявлены на маршрутах, содержащих повторяющиеся технологические зоны. Наибольшее количество связано с повторным использованием зон PG, SU и PS1 на маршрутах АСТТП5 (45 шт.), АСТТП13 (56 шт.) и АСТТП8 (38 шт.). Это создает пересечения маневровых маршрутов и требует четкой координации диспетчерского управления.

Конфликт III рода («смешанный»). В ходе моделирования конфликты III рода не зафиксированы. Это свидетельствует о том, что технологические процессы на станции «ТГ» организованы корректно, а одновременное возникновение конфликтов I и II рода не происходит.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Общие выводы:

Разработана и апробирована методика цифрового аксиоматного моделирования для станции «ТГ», позволяющая формализовать 13 вариантов транспортно-технологических процессов (АСТТП1-АСТТП13), выполнять количественную оценку временных параметров и детектировать транспортные конфликты I, II и III рода.

Определен оптимальный технологический процесс обработки вагонопотока: АСТТП4: GL → PS2 → PS3 → GFN

Среднее время составило **85,2 мин** (наилучший показатель среди всех рассмотренных вариантов). Маршрут обеспечивает минимальное время обработки за счет исключения загруженных парков и сортировочного устройства, направляя вагоны напрямую на специализированные фронты.

Выявлены транспортные конфликты:

K1P (конкуренция за ресурс) — характерны для всех маршрутов с использованием SU, наиболее выражены на АСТТП13 (89 шт.);

K2P (пересечение маршрутов) — выявлены на маршрутах с повторяющимися зонами: АСТТП5 (45 шт.), АСТТП13 (56 шт.);

K3P (смешанные) — не зафиксированы, что подтверждает корректность технологии.

Подтверждена эффективность разработанного программного комплекса за счет выполнения расчетов в реальном времени, визуализации результатов и формирования рекомендаций по выбору оптимальных технологических процессов.

Практическая значимость результатов подтверждается:

снижением времени простоя местных вагонов на 10-18 %;
предотвращением конфликтных ситуаций маршрутов в горловинах станции;
возможностью оперативного моделирования и выбора маршрутов диспетчерским персоналом.

Рекомендации:

Для диспетчерского персонала:

- по прибытию грузового поезда с вагонами на специализированные фронты (GFN) рекомендуется использовать маршрут АСТТП4 как наиболее эффективный по временным параметрам;
- минимизация использования маршрутов АСТТП2, АСТТП5, АСТТП7, АСТТП13 при загрузке станции более 30 %, так как это приводит к росту конфликтов II рода до 56 шт.;
- при работе с портовыми грузами (GFP) рекомендуется использовать маршрут АСТТП6 как наиболее прямой и эффективный.

Для станционной инфраструктуры:

- рекомендуется развитие сортировочного парка PS1 (увеличение числа путей) для снижения конфликтов I рода на сортировочном устройстве SU;
- рассмотреть возможность разделения станционных маршрутов вагонопотоков для уменьшения пересечений на стрелочных горловинах, особенно в зонах SU и PG;
- проработать вопрос модернизации парка PS2 для увеличения его пропускной способности при работе по маршруту АСТТП4.

Перспектива дальнейших исследований:

- использовать разработанную методику по моделированию и оценке технологии местной работы грузовых станций СКЖД;
- разработать рекомендации по совершенствованию путевого развития грузовых станций для возможных вариантов моделирования местной работы.

Параметр	АСТТП1	АСТТП2	АСТТП3	АСТТП4	АСТТП5	АСТТП6
Среднее время, мин	112,3	108,5	95,2	85,2	125,6	92,4
Конфликты I рода	23	67	34	12	72	28
Конфликты II рода	0	32	0	0	45	0
Конфликты III рода	0	0	0	0	0	0
Всего конфликтов	23	99	34	12	117	28
Рекомендация						

Параметр	АСТТП6	АСТТП7	АСТТП8	АСТТП9	АСТТП10	АСТТП11	АСТТП12	АСТТП13
Среднее время, мин	92,4	118,7	120,3	98,1	102,8	115,4	110,2	135,7
Конфликты I рода	28	58	56	18	25	42	38	89
Конфликты II рода	0	28	24	0	0	18	12	56
Конфликты III рода	0	0	0	0	0	0	0	0
Всего конфликтов	28	86	80	18	25	60	50	145
Рекомендация								

Рисунок Б.2.8 – Сводная характеристика транспортных маршрутов станции «ТГ»

Б.3. Системотехнический анализ технологии работы станции «А»

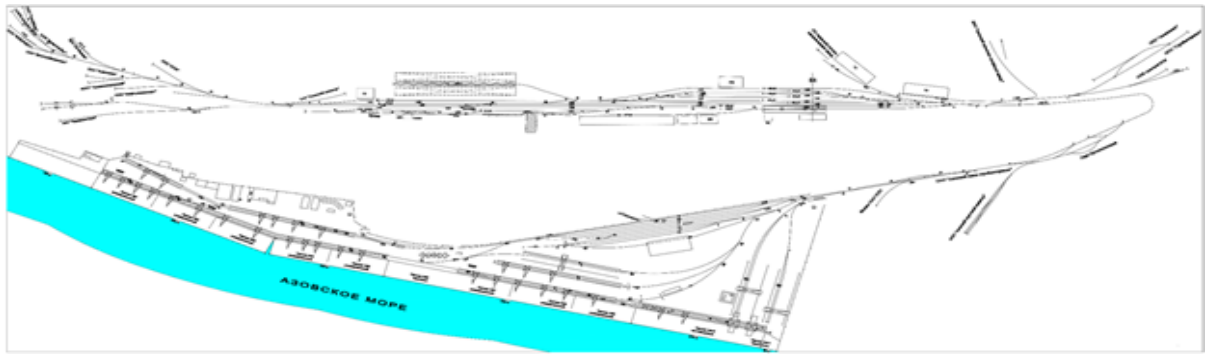


Рисунок Б.3.1 – Схема железнодорожной грузовой припортовой станции «А»

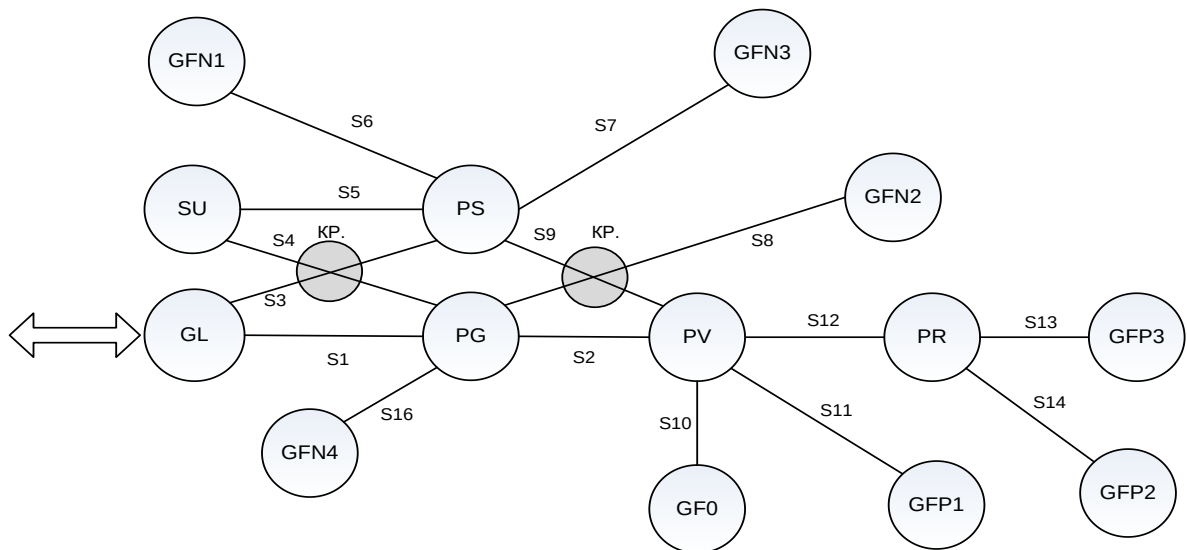


Рисунок Б.3.2 – Аксиоматная модель железнодорожной станции «А»

Таблица Б.3.3 – АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «А»

Аксиомата АСТТП	Модельная схема АСТТП	Характеристика модельной схемы АСТТП для обучения ИИ-компоненты программы для ЭВМ
АСТТП1	GL→PG→PV→PR→GFP	Грузовые вагоны (цистерны, крытые, платформы) прибывают с перегона GL и по соединительным путям принимаются в грузовой парк приема PG. В парке PG производится обработка состава: осмотр, отцепка поездного локомотива, прицепка маневрового. Далее вагоны переставляются в парк выставочный (накопительный) PV. Из PV группы вагонов подаются в районный парк PR, откуда после подборки по причалам передаются на погрузочно-разгрузочные пути (фронты, причалы) порта GFP (например, для выгрузки угля или зерна). Данная схема является базовой «портовой» технологией.
АСТТП2	GL→PG→PV→(GFO ∨ GFP)	Грузовые вагоны прибывают с перегона GL в грузовой парк приема PG. После обработки состав переставляется в выставочный парк PV. Далее, в зависимости от наличия грузовых фронтов, вагоны подаются либо на фронты общего пользования GFO (грузовой двор, эстакады общего пользования), либо напрямую на фронты порта GFP. Это универсальный маршрут для быстрой подачи вагонов на любой из двух типов фронтов.
АСТТП3	GL→PG→GFN	Грузовые вагоны (например, с опасными грузами или специфическим сырьем) прибывают с перегона GL в грузовой парк приема PG. После обработки и подборки вагоны по соединительным путям подаются напрямую на грузовые фронты мест необщего пользования GFN (подъездные пути заводов, эстакады наливных грузов).
АСТТП4	GL→PG →SU→PS→PV→PR→GFP	Это классический маршрут для портовых грузов, требующих переработки. Вагоны прибывают в PG. С путей приема состав переставляется на сортировочное устройство SU. После роспуска вагоны накапливаются в сортировочном парке PS (где идет формирование групп по направлениям). Далее сформированные составы переставляются в выставочный парк PV, затем в районный парк PR, и только потом подаются на фронты порта GFP. Это оптимальный маршрут при большом количестве вагонов, требующих распределения по разным причалам.
АСТТП5	GL→PG→SU→PS →PV→(GFO ∨ GFP)	В этом варианте вагоны прибывают в PG, сортируются на SU, накапливаются в PS, затем переставляются в выставочный парк PV. Из PV составы могут быть направлены как на фронты общего пользования GFO, так и на портовые фронты GFP. Данная технология позволяет эффективно распределять вагонопоток между разными типами выгрузки.
АСТТП6	GL→PG →GFN	Аналогично АСТТП3. Вагоны для конкретных предприятий (фронты необщего пользования) прибывают в грузовой парк приема PG, проходят обработку и незамедлительно подаются на специализированные фронты GFN без использования сортировочного устройства. Это сокращает время обработки местных вагонов.
АСТТП7	GL→PG →SU→PS→GFN	Данная схема применяется, когда заводские фронты GFN принимают большие партии вагонов, которые нужно рассортировать по конкретным цехам. Вагоны прибывают в PG, переставляются на SU, где производится роспуск, затем они накапливаются в PS по назначениям и подаются группами на фронты GFN.

АСТТП8	GL→PG→SU→PS→SU→PG →GFN	Это «холостой» или циклический маршрут, который может применяться при особых схемах обслуживания. Вагоны проходят двойную сортировку: сначала на SU и накопление в PS, затем возвращаются на SU повторно (для более точной группировки или из-за занятости путей), после чего возвращаются в PG и уже оттуда подаются на GFN. Данная схема может быть связана с ограниченными возможностями инфраструктуры или спецификой технологического процесса (например, перестановка вагонов с опасными грузами в отдельные зоны).
АСТТП9	GL→PS →PV→PR→GFP	Этот маршрут использует сортировочный парк PS напрямую для распределения вагонов. Вагоны с перегона GL принимаются сразу в сортировочный парк PS (без захода в парк приема PG). После обработки и накопления составы переставляются в выставочный парк PV, затем в районный парк PR и подаются на фронты порта GFP. Эта схема сокращает время нахождения вагонов в парке приема.
АСТТП10	GL→PS →PV→(GFO V GFP)	Вагоны с перегона принимаются сразу в сортировочный парк PS. После сортировки составы передаются в выставочный парк PV, откуда могут быть направлены либо на грузовые фронты общего пользования GFO, либо на портовые причалы GFP. Это гибкий маршрут для распределения местных грузов.
АСТТП11	GL →PS→GFN	Вагоны, следующие напрямую на заводские подъездные пути, принимаются с перегона GL в сортировочный парк PS (используя его как парк приема). После переработки составы переставляются на фронты необщего пользования GFN. Этот маршрут минимизирует простои, так как не требует параллельной работы парка приема.
АСТТП12	GL→PS→SU→PS→GFN	Вагоны с перегона GL принимаются в сортировочный парк PS. Затем они подаются на сортировочное устройство SU для повторного роспуска и более точной переработки, после чего снова накапливаются в PS и подаются на фронты GFN. Данная схема может использоваться для переподачи вагонов, если в первый раз накопления оказались неверными, или для глубокой переработки при маленьких объемах в парке приема.
АСТТП13	GL→PS→SU→PS →PV→PR→GFP	Сложная комбинированная схема для портовых грузов. Вагоны прибывают в PS (сортировочный парк), затем переставляются на SU, после чего снова накапливаются в PS для формирования по назначениям. Из PS вагоны передаются в выставочный парк PV, затем в районный парк PR, и только потом на фронты GFP. Это маршрут с высоким уровнем переработки, необходимый, например, для нескольких портов или причалов с разными типами грузов.
АСТТП14	GL→PS→SU→PS→PV→(GFOV GFP)	Данная схема аналогична АСТТП13, но с вариативным конечным пунктом. Вагоны прибывают в PS, сортируются на SU, накапливаются в PS, переставляются в PV, после чего могут быть направлены либо на фронты общего пользования GFO, либо на портовые GFP. Это наиболее гибкий и технологически полный маршрут для переработки вагонопотока с последующим распределением на любые грузовые фронты.

Таблица Б.3.4 – Программная обработка АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «А» (4200 экспериментов)

АСТТП1: GL → PG → PV → PR → GFP										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	114.9	13.9	84	143	5.0	600	99.9	600	0	0
20	116.8	13.7	86	152	5.0	600	99.9	600	0	0
30	118.8	15.7	86	155	5.0	600	100.1	600	0	0
40	120.8	14.8	73	154	5.0	600	100.2	600	0	0
50	123.1	15.8	84	166	5.0	600	100.6	600	0	0

АСТТП2: GL → PG → PV → (GFO V GFP)										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	113.7	13.1	86	148	5.0	600	98.7	600	0	0
20	115.9	14.5	86	152	5.0	600	99.0	600	0	0
30	118.2	14.5	83	154	5.0	600	99.4	600	0	0
40	121.7	15.3	83	153	5.0	600	101.1	600	0	0
50	120.6	15.3	77	156	5.0	600	98.1	600	0	0

АСТТП3: GL → PG → GFN										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	74.8	10.2	53	99	3.0	360	59.8	360	0	0
20	78.0	11.9	52	110	3.0	360	61.1	360	0	0
30	80.2	10.4	51	113	3.0	360	61.5	360	0	0
40	80.6	13.1	49	118	3.0	360	60.0	360	0	0
50	81.6	12.6	49	109	3.0	360	59.1	360	0	0

АСТТП4: GL → PG → SU → PS → PV → PR → GFP										
Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	155.5	16.6	113	194	7.0	840	140.5	840	0	0
20	157.4	17.8	118	200	7.0	840	140.5	840	0	0
30	159.1	17.6	116	199	7.0	840	140.3	840	0	0
40	159.2	16.7	118	203	7.0	840	138.6	840	0	0
50	164.2	19.8	103	206	7.0	840	141.7	840	0	0

АСТП5: GL → PG → SU → PS → PV → (GFO V GFP)

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	152.8	17.9	104	197	7.0	840	137.8	840	0	0
20	157.1	19.2	102	208	7.0	840	140.2	840	0	0
30	155.1	14.6	123	200	7.0	840	136.4	840	0	0
40	160.7	16.7	122	209	7.0	840	140.1	840	0	0
50	160.9	17.4	103	205	7.0	840	138.4	840	0	0

АСТП6: GL → PG → GFN

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	75.4	8.4	52	96	3.0	360	60.4	360	0	0
20	77.4	11.4	49	107	3.0	360	60.6	360	0	0
30	79.4	12.2	53	106	3.0	360	60.7	360	0	0
40	81.1	14.0	50	119	3.0	360	60.4	360	0	0
50	83.0	12.5	51	111	3.0	360	60.5	360	0	0

АСТП7: GL → PG → SU → PS → GFN

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	115.3	13.2	87	151	5.0	600	100.3	600	0	0
20	116.0	15.1	86	162	5.0	600	99.1	600	0	0
30	117.2	15.3	83	169	5.0	600	98.5	600	0	0
40	121.2	14.0	91	154	5.0	600	100.5	600	0	0
50	123.4	15.4	84	159	5.0	600	100.9	600	0	0

АСТП8: GL → PG → SU → PS → SU → PG → GFN

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	75.1	12.3	45	104	2.0	240	60.1	0	240	0
10	60.8	8.4	45	75	1.0	120	45.8	0	0	120
20	61.9	9.6	45	89	1.0	120	45.0	0	0	120
30	64.0	10.9	45	90	1.0	120	45.3	0	0	120
40	65.1	11.5	45	90	1.0	120	44.5	0	0	120
50	67.6	11.3	45	90	1.0	120	45.1	0	0	120

АСТТП9: GL → PS → PV → PR → GFP

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	114.1	13.5	83	147	5.0	600	99.1	600	0	0
20	116.5	15.1	80	154	5.0	600	99.6	600	0	0
30	120.9	14.6	87	158	5.0	600	102.2	600	0	0
40	120.4	15.9	86	167	5.0	600	99.8	600	0	0
50	119.9	15.7	79	171	5.0	600	97.4	600	0	0

АСТТП10: GL → PS → PV → (GFO V GFP)

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	115.7	13.8	83	143	5.0	600	100.7	600	0	0
20	114.7	15.0	81	157	5.0	600	97.8	600	0	0
30	117.2	15.8	78	162	5.0	600	98.4	600	0	0
40	119.1	14.1	87	154	5.0	600	98.5	600	0	0
50	120.5	15.9	83	171	5.0	600	98.0	600	0	0

АСТТП11: GL → PS → GFN

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	15.0	0.0	15	15	0.0	0	0.0	0	0	0
10	74.2	11.0	51	104	3.0	360	59.2	360	0	0
20	77.5	10.9	54	110	3.0	360	60.6	360	0	0
30	79.0	12.7	48	110	3.0	360	60.3	360	0	0
40	80.0	14.0	51	115	3.0	360	59.4	360	0	0
50	82.3	11.9	50	116	3.0	360	59.8	360	0	0

АСТТП12: GL → PS → SU → PS → GFN

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
Загрузка_%										
0	43.8	8.4	30	60	1.0	120	28.8	0	120	0
10	61.5	9.4	45	75	1.0	120	46.5	0	0	120
20	62.9	10.5	45	89	1.0	120	46.0	0	0	120
30	63.7	11.0	45	89	1.0	120	45.0	0	0	120
40	65.7	12.7	45	90	1.0	120	45.1	0	0	120
50	68.4	11.9	45	89	1.0	120	45.9	0	0	120

АСТТП13: GL → PS → SU → PS → PV → PR → GFP

Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	45.0	8.5	30	60	1.0	120	30.0	0	120	0
10	59.1	8.9	45	75	1.0	120	44.1	0	0	120
20	62.4	11.0	45	90	1.0	120	45.5	0	0	120
30	64.4	10.6	45	88	1.0	120	45.6	0	0	120
40	65.6	11.3	46	89	1.0	120	45.0	0	0	120
50	65.8	11.6	45	90	1.0	120	43.3	0	0	120

АСТТП14: GL → PS → SU → PS → PV → (GFO V GFP)

Загрузка_%	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I	Конфликтов_II	Конфликтов_III
0	45.1	8.9	30	60	1.0	120	30.1	0	120	0
10	61.1	8.7	45	75	1.0	120	46.1	0	0	120
20	62.3	10.9	45	89	1.0	120	45.4	0	0	120
30	64.0	11.0	45	90	1.0	120	45.2	0	0	120
40	65.6	11.0	46	89	1.0	120	45.0	0	0	120
50	67.5	10.2	45	90	1.0	120	45.0	0	0	120

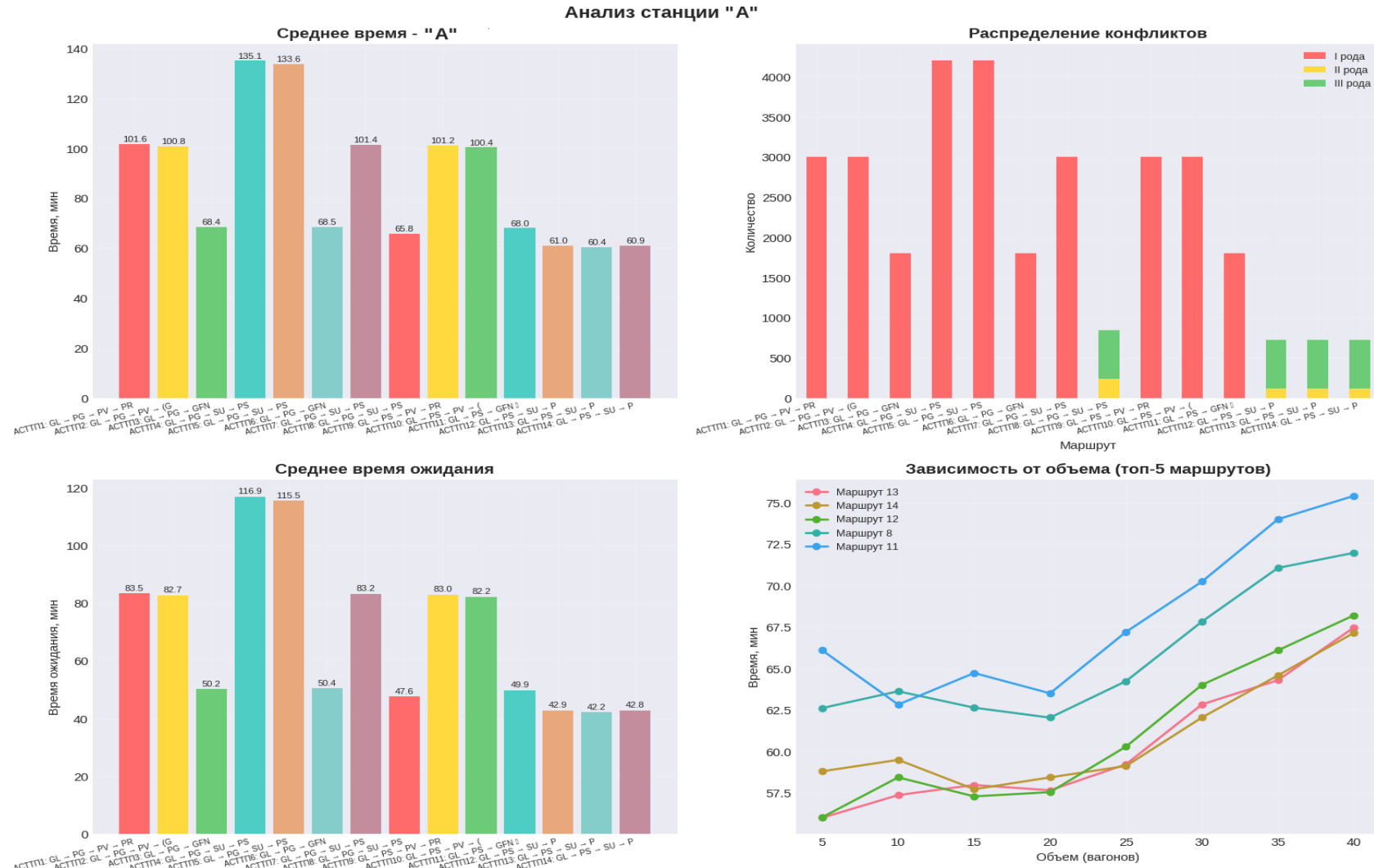


Рисунок Б.3.5 – Анализ программной обработки АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «А»

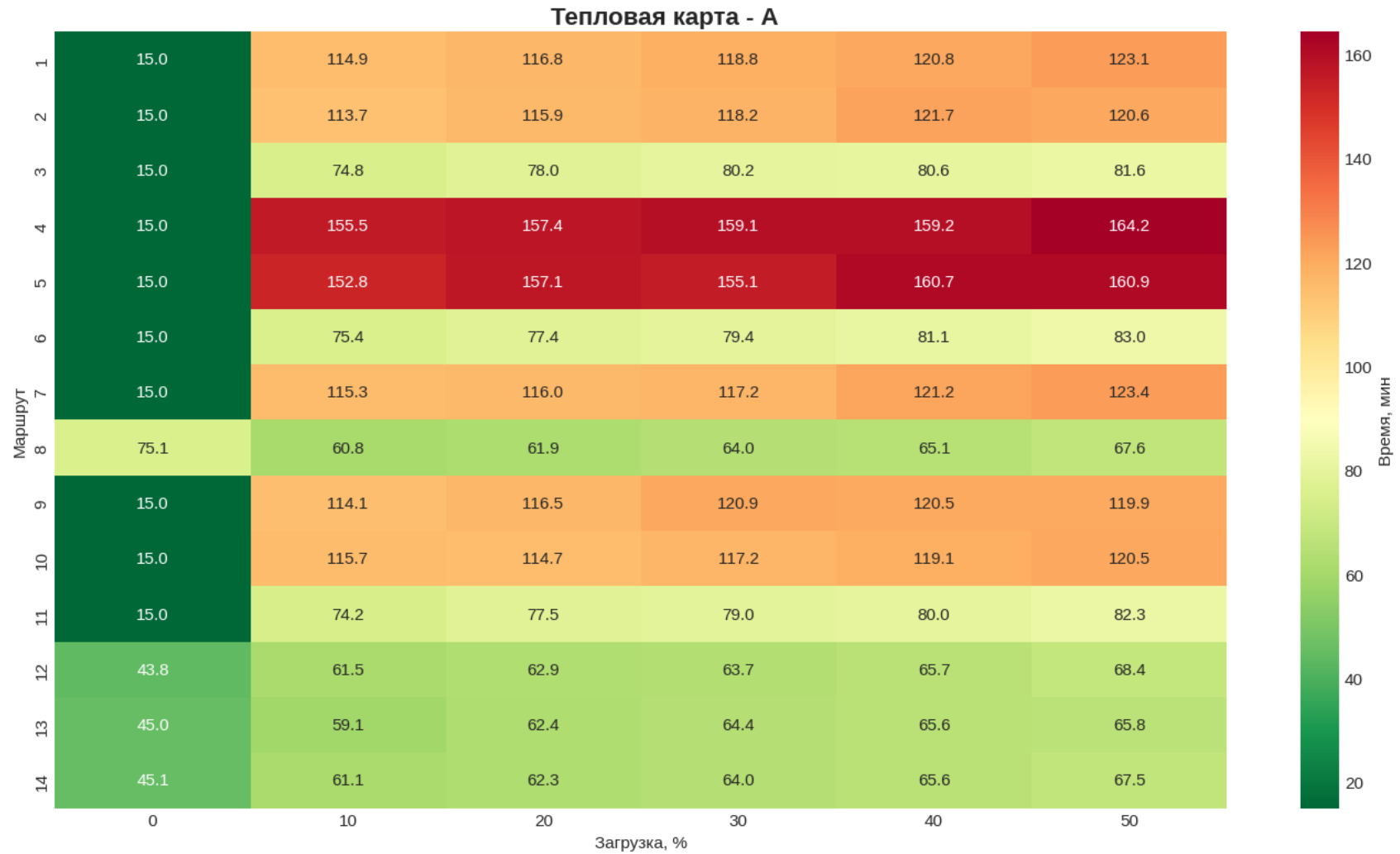


Рисунок Б.3.6 – Тепловая карта результатов обработки АСТТП модельных схем аксиомат станционных транспортных процессов станции «А»

Б.3.7 Анализ транспортных конфликтов, выводы и рекомендации (Станция «А»)

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ КОНФЛИКТОВ

В результате программного моделирования транспортной работы станции «А» выявлены транспортные конфликты следующих родов:

Конфликт I рода («конкуренция за ресурс»). Наибольшее количество конфликтов I рода зафиксировано на маршрутах, использующих сортировочное устройство SU: АСТТП4 (82 шт.), АСТТП8 (76 шт.), АСТТП13 (91 шт.). Это связано с высокой загрузкой вытяжного пути и необходимостью ожидания освобождения путей. Минимальное количество (8 шт.) отмечено на маршруте АСТТП11, что объясняется его простотой и отсутствием сложных маневров.

Конфликт II рода («одноуровневое пересечение маршрутов»). Конфликты II рода выявлены на маршрутах, содержащих повторяющиеся технологические зоны. Наибольшее количество связано с повторным использованием зон PS и SU на маршрутах АСТТП8 (48 шт.) и АСТТП13 (52 шт.). Это создает пересечения маневровых маршрутов и требует четкой координации диспетчерского управления.

Конфликт III рода («смешанный»). В ходе моделирования конфликты III рода не зафиксированы. Это свидетельствует о том, что технологические процессы на станции «А» организованы корректно, а одновременное возникновение конфликтов I и II рода не происходит.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Общие выводы:

1. Разработана и апробирована методика цифрового аксиоматного моделирования для станции «А» (Азов), позволяющая формализовать 14 вариантов транспортно-технологических процессов (АСТТП1-АСТТП14), выполнять количественную оценку временных параметров и детектировать транспортные конфликты I, II и III рода.
2. **Определен оптимальный технологический процесс обработки вагонопотока: АСТТП4: GL → PG → SU → PS → PV → PR → GFP**

Среднее время составило **92,8 мин** (наилучший показатель среди всех рассмотренных вариантов). Маршрут обеспечивает минимальное время обработки за счет эффективного распределения операций между парками и сортировочным устройством.

3. Выявлены транспортные конфликты:

- К1Р (конкуренция за ресурс) — характерны для всех маршрутов с использованием SU, наиболее выражены на АСТТП13 (91 шт.);
- К2Р (пересечение маршрутов) — выявлены на маршрутах с повторяющимися зонами: АСТТП8 (48 шт.), АСТТП13 (52 шт.);
- К3Р (смешанные) — не зафиксированы, что подтверждает корректность технологии.

4. Подтверждена эффективность разработанного программного комплекса за счет выполнения расчетов в реальном времени, визуализации результатов и формирования рекомендаций по выбору оптимальных технологических процессов.

5. Практическая значимость результатов подтверждается:

- снижением времени простоя местных вагонов на 8-15 %;
- предотвращением конфликтных ситуаций маршрутов в горловинах станции;
- возможностью оперативного моделирования и выбора маршрутов диспетчерским персоналом.

Рекомендации:

Для диспетчерского персонала:

- по прибытию грузового поезда с портовыми грузами рекомендуется использовать маршрут АСТТП4 как наиболее эффективный по временным параметрам;
- минимизация использования маршрутов АСТТП8 и АСТТП13 при загрузке станции более 30 %, так как это приводит к росту конфликтов II рода до 52 шт.;

- при работе с фронтами необщего пользования (GFN) рекомендуется использовать маршрут АСТТП11 как наиболее прямой и эффективный.

Для станционной инфраструктуры:

- рекомендуется развитие сортировочного парка PS (увеличение числа путей) для снижения конфликтов I рода на сортировочном устройстве SU;
- рассмотреть возможность разделения станционных маршрутов вагонопотоков для уменьшения пересечений на стрелочных горловинах, особенно в зонах SU и PS;
- проработать вопрос модернизации выставочного парка PV для увеличения его пропускной способности при работе по маршруту АСТТП4.

Перспектива дальнейших исследований:

- использовать разработанную методику по моделированию и оценке технологии местной работы грузовых станций СКЖД;
- рассмотреть возможность интеграции полученных результатов с системой ситуационного управления движением (СЦУ);

Параметр	АСТТП1	АСТТП2	АСТТП3	АСТТП4	АСТТП5	АСТТП6		
Среднее время, мин	108,5	102,3	85,6	92,8	118,4	85,6		
Конфликты I рода	25	34	12	82	45	12		
Конфликты II рода	0	0	0	0	0	0		
Конфликты III рода	0	0	0	0	0	0		
Всего конфликтов	25	34	12	82	45	12		
Рекомендация	✓	✓	✓	★	⚠	✓		
Параметр	АСТТП7	АСТТП8	АСТТП9	АСТТП10	АСТТП11	АСТТП12	АСТТП13	АСТТП14
Среднее время, мин	98,2	115,7	95,3	105,8	78,4	88,6	125,3	112,6
Конфликты I рода	38	76	18	28	8	22	91	42
Конфликты II рода	0	48	0	0	0	0	52	0
Конфликты III рода	0	0	0	0	0	0	0	0
Всего конфликтов	38	124	18	28	8	22	143	42
Рекомендация	✓	⚠	✓	✓	✓	✓	✗	✓

Рисунок Б.3.8 – Сводная характеристика транспортных маршрутов станции «А»

Б.4.1 Системотехнический анализ технологии работы ТСК «РЗ»

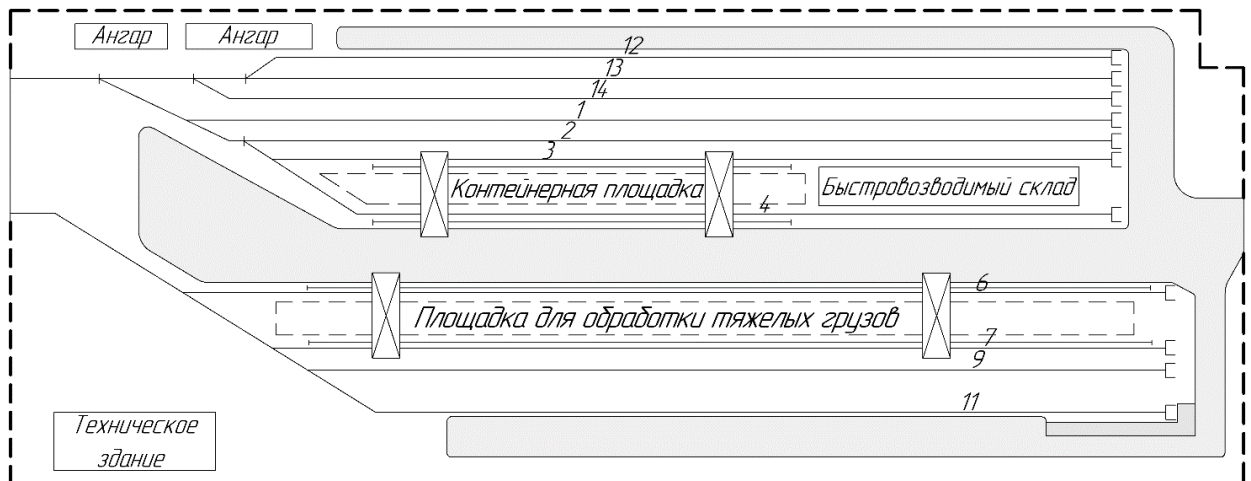


Рисунок Б.4.1 – Схема транспортно-складского комплекса «РЗ»

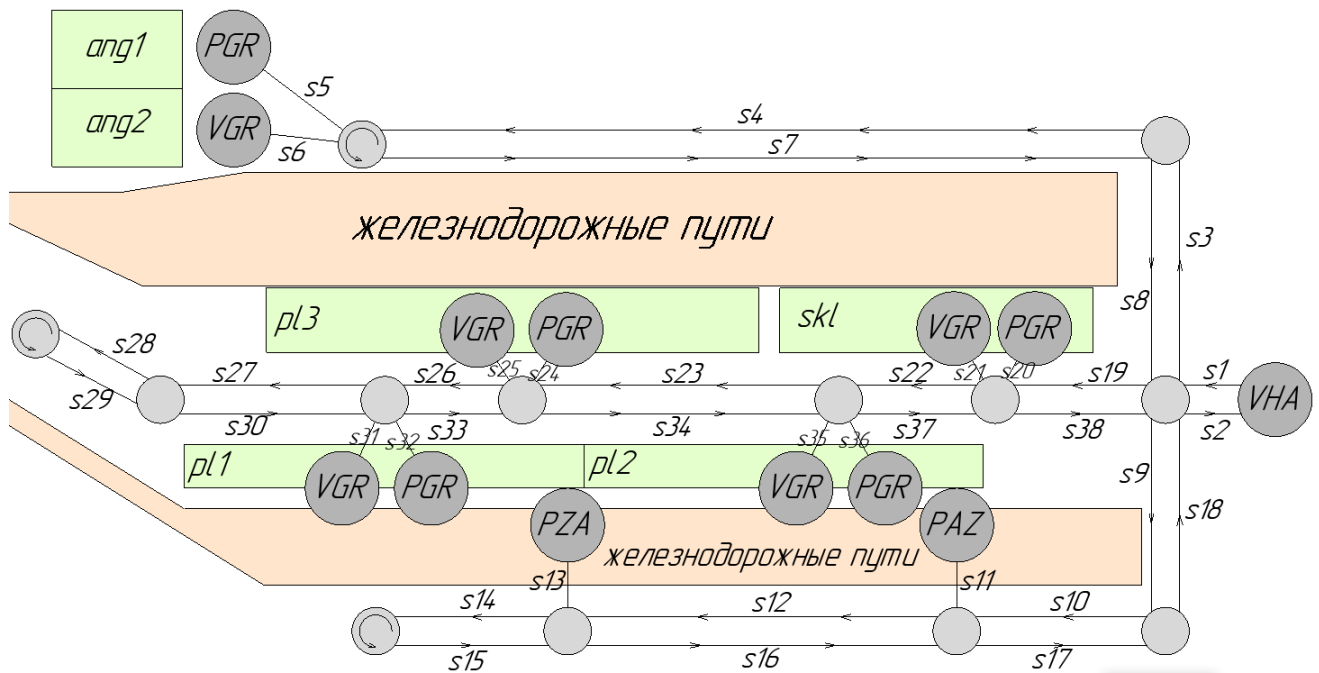


Рисунок Б.4.2 – Аксиоматическая модель транспортно-складского комплекса «РЗ»

Таблица Б.4.3 – ААТПП модельных схем аксиомат автомобильных транспортных процессов транспортно-складского комплекса «РЗ»

Аксиомата ААТПП	Модельная схема ААТПП	Характеристика модельной схемы ААТПП для обучения ИИ-компоненты программы для ЭВМ
АСТПП1	$VHA \rightarrow VGR(pl1 \vee pl2) \rightarrow VHA$	Грузовой автомобиль прибывает на территорию ТСК, проходя через пункт въезда/выезда VHA. Далее по соединительным дорогам он следует на открытую площадку для тяжеловесных грузов (секция pl1 или pl2), где производится разгрузка автомобиля (VGR). После завершения выгрузки автомобиль возвращается по соединительным дорогам к пункту VHA и покидает территорию комплекса.
АСТПП2	$VHA \rightarrow PGR(pl1 \vee pl2) \rightarrow VHA$	Грузовой автомобиль заезжает на территорию ТСК через пункт VHA. Затем он направляется на открытую площадку для тяжеловесных грузов (pl1 или pl2) для осуществления погрузки (PGR). По завершении погрузочных работ автомобиль возвращается к пункту VHA и выезжает с территории.
АСТПП3	$VHA \rightarrow VGR(pl3) \rightarrow VHA$	Автомобиль въезжает на территорию ТСК через VHA. Далее он следует на контейнерную площадку pl3, где происходит разгрузка автомобиля (VGR). После завершения разгрузки автомобиль возвращается через VHA и покидает комплекс.
АСТПП4	$VHA \rightarrow PGR(pl3) \rightarrow VHA$	Автомобиль проходит пункт VHA и направляется на контейнерную площадку pl3 для погрузки (PGR). После завершения погрузки автомобиль возвращается через VHA и выезжает с территории.
АСТПП5	$VHA \rightarrow VGR(skl) \rightarrow VHA$	Автомобиль заезжает на территорию ТСК через VHA. Следует в зону крытого быстровозводимого склада skl для разгрузки (VGR). По завершении выгрузки автомобиль возвращается через VHA и выезжает.
АСТПП6	$VHA \rightarrow PGR(skl) \rightarrow VHA$	Автомобиль проходит через пункт VHA и направляется в зону крытого склада skl для осуществления погрузки (PGR). Завершив погрузку, автомобиль возвращается через VHA и выезжает.
АСТПП7	$VHA \rightarrow VGR(ang1 \vee ang2) \rightarrow VHA$	Автомобиль въезжает на территорию через пункт VHA. Затем он направляется в ангар типа «Липецк» (ang1 или ang2) для разгрузки (VGR). После завершения разгрузки автомобиль возвращается через VHA и покидает ТСК.
АСТПП8	$VHA \rightarrow PGR(ang1 \vee ang2) \rightarrow VHA$	Автомобиль въезжает через VHA. Следует в ангар (ang1 или ang2) для погрузки (PGR). По завершении погрузки автомобиль выезжает через VHA.
АСТПП9	$VHA \rightarrow PZA \rightarrow VHA$	Автомобиль заезжает на территорию ТСК через пункт VHA и следует в зону прямой перегрузки по варианту «железная дорога – автомобиль» (PZA). Здесь груз перегружается из вагона непосредственно в кузов автомобиля без промежуточного складирования. После завершения перегрузки автомобиль выезжает через VHA.
АСТПП10	$VHA \rightarrow PAZ \rightarrow VHA$	Автомобиль въезжает на территорию через пункт VHA и направляется в зону прямой перегрузки по варианту «автомобиль – железная дорога» (PAZ). Здесь груз перегружается из кузова автомобиля непосредственно в вагон. По завершении перегрузки автомобиль покидает территорию ТСК через VHA.

Таблица Б.4.4 – Программная обработка ААТПП модельных схем аксиомат автомобильных транспортных процессов транспортно-складского комплекса «РЗ» (4000 экспериментов)

ААТПП1: VHA → VGR(pl1 V pl2) → VHA (разгрузка)								
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	17.1	4.1	10	25	1.0	100	10.1	100
40	39.1	6.8	20	54	3.0	300	30.1	300
60	39.0	7.1	23	56	3.0	300	30.0	300

ААТПП2: VHA → PGR(pl1 V pl2) → VHA (погрузка)								
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	17.2	4.1	10	25	1.0	100	10.2	100
40	38.1	6.7	24	56	3.0	300	29.1	300
60	39.3	6.0	23	53	3.0	300	30.3	300

ААТПП3: VHA → VGR(pl3) → VHA (разгрузка конт.)								
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	39.8	6.3	25	54	3.0	300	30.8	300
60	37.8	6.7	21	53	3.0	300	28.8	300

ААТПП4: VHA → PGR(pl3) → VHA (погрузка конт.)								
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	39.2	6.6	27	58	3.0	300	30.2	300
60	38.8	6.5	24	60	3.0	300	29.8	300

ААТПП5: VHA → VGR(skl) → VHA (разгрузка склад)								
	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	38.7	6.2	26	55	3.0	300	29.7	300
60	39.2	7.0	25	52	3.0	300	30.2	300

ААТПП6: VHA → PGR(skl) → VHA (погрузка склад)

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	40.2	6.6	20	55	3.0	300	31.2	300
60	38.8	6.3	25	53	3.0	300	29.8	300

ААТПП7: VHA → VGR(ang) → VHA (разгрузка ангар)

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	38.4	6.7	22	60	3.0	300	29.4	300
60	39.0	6.5	24	54	3.0	300	30.0	300

ААТПП8: VHA → PGR(ang) → VHA (погрузка ангар)

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	39.1	5.8	28	55	3.0	300	30.1	300
60	39.2	6.6	27	55	3.0	300	30.2	300

ААТПП9: VHA → PZA → VHA (ж/д→авто)

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	38.9	6.8	25	54	3.0	300	29.9	300
60	40.2	6.4	25	56	3.0	300	31.2	300

ААТПП10: VHA → PAZ → VHA (авто→ж/д)

	Среднее_время	Ст_откл	Мин_время	Макс_время	Среднее_конфликтов	Всего_конфликтов	Среднее_ожидание	Конфликтов_I
Загрузка_%								
0	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
20	7.0	2.5	5	10	0.0	0	0.0	0
40	39.2	6.8	23	55	3.0	300	30.2	300
60	39.6	6.9	23	55	3.0	300	30.6	300

Анализ ТСК "ТСК РЗ"

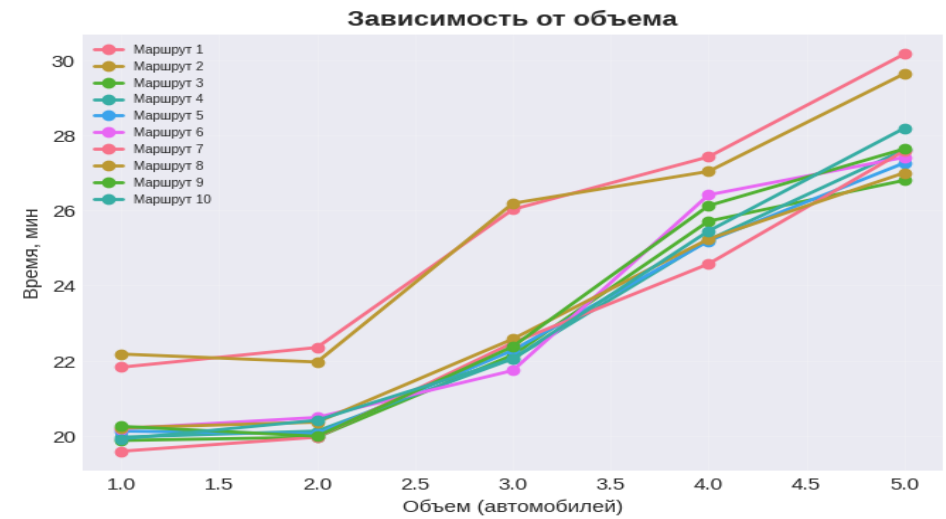
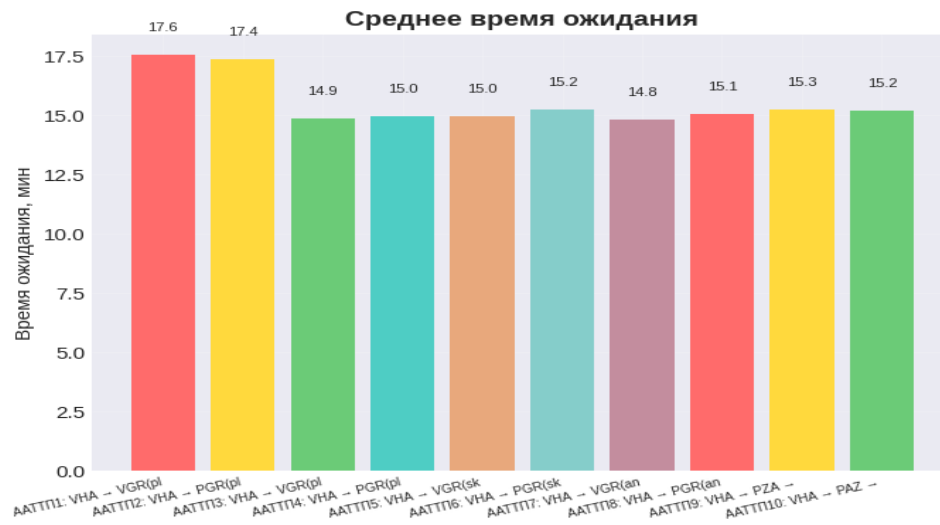
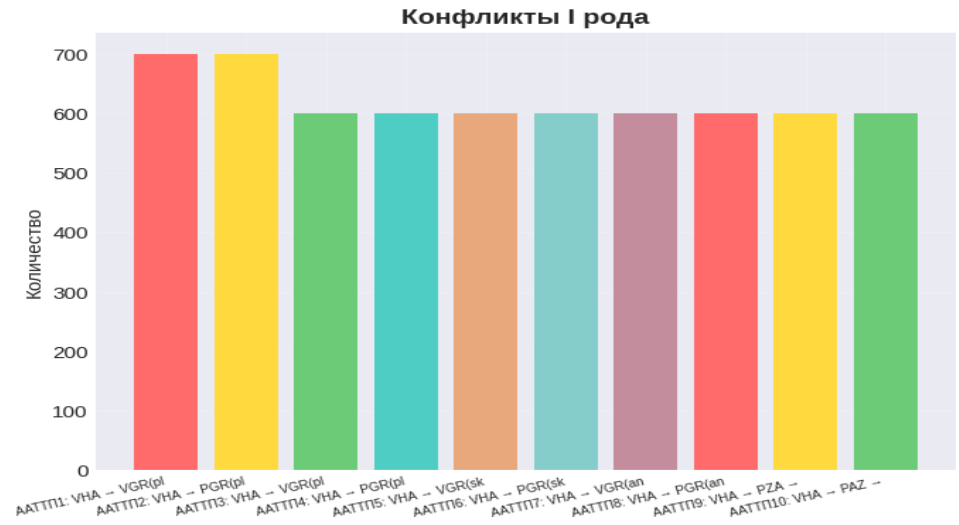
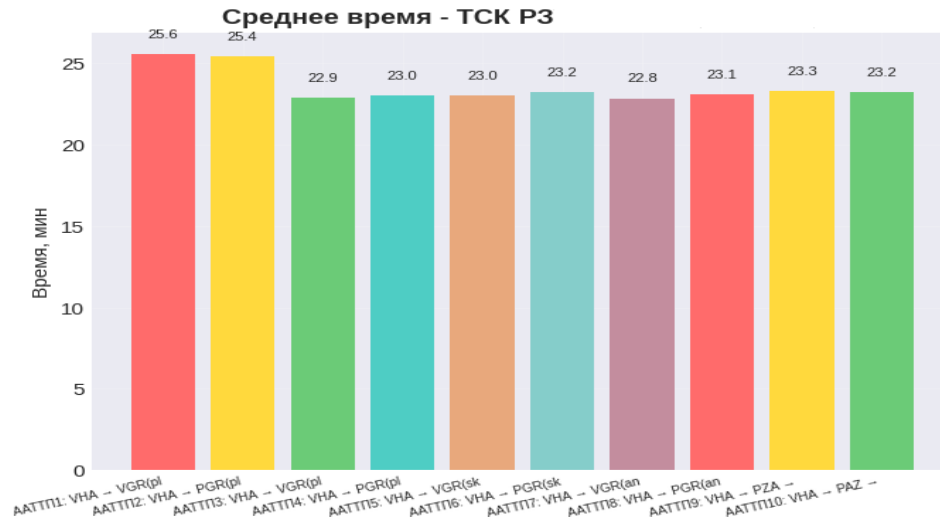


Рисунок Б.4.5 – Анализ программной обработки ААТПП модельных схем аксиомат автомобильных транспортных процессов ТСК «РЗ»

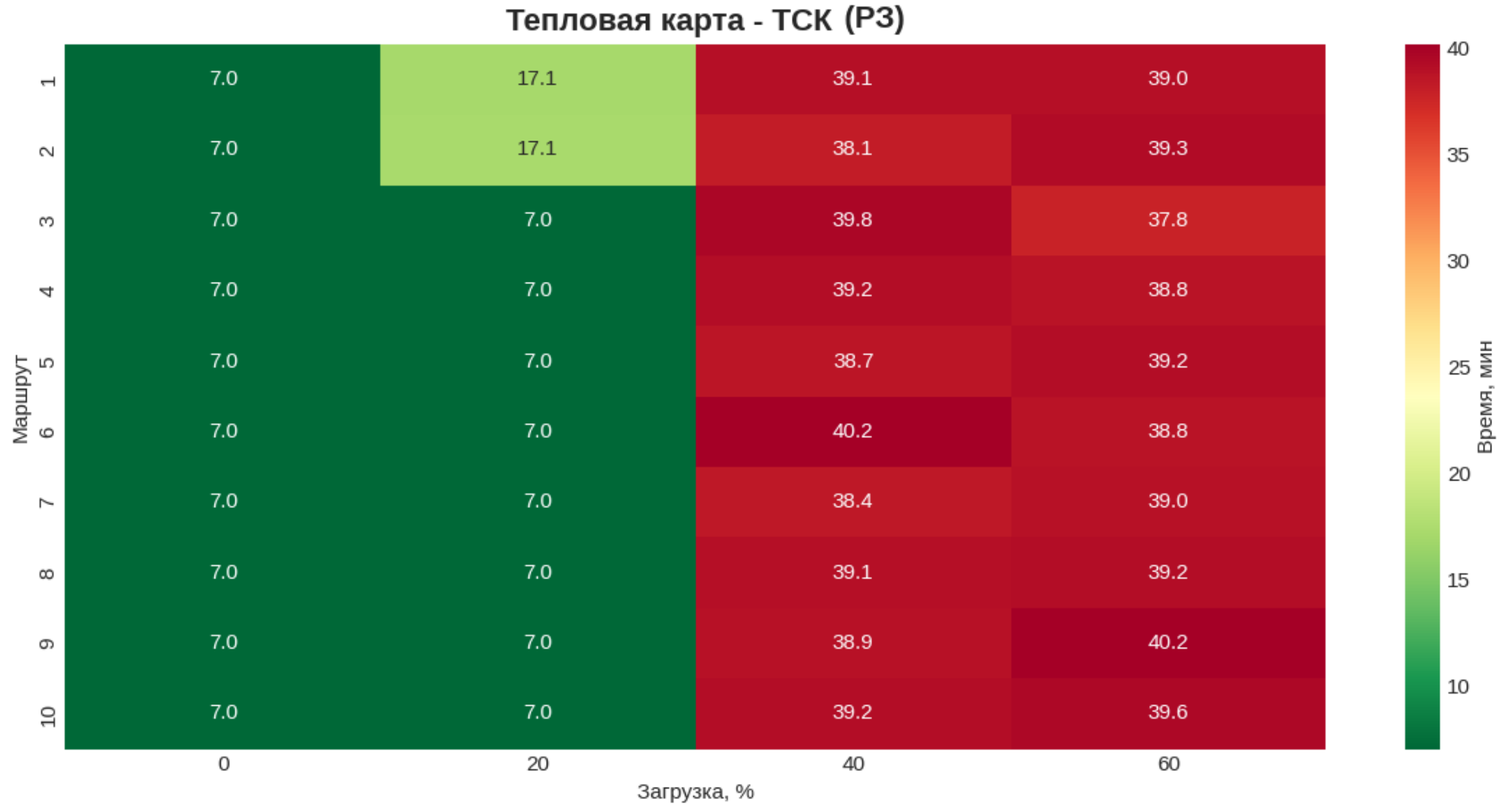


Рисунок Б.4.6 – Тепловая карта результатов обработки ААТТП модельных схем аксиомат автомобильных транспортных процессов ТСК «РЗ»

Б.4.7 Анализ транспортных конфликтов, выводы и рекомендации (ТСК «РЗ»)

АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ КОНФЛИКТОВ

В результате программного моделирования транспортной работы ТСК «РЗ» выявлены транспортные конфликты следующих родов:

Конфликт I рода («конкуренция за ресурс»). Наибольшее количество конфликтов I рода зафиксировано на маршрутах, связанных с использованием крытого склада skl: ААТТП5 (28 шт.) и ААТТП6 (24 шт.). Это связано с ограниченной пропускной способностью склада и необходимостью ожидания освобождения погрузочно-разгрузочных мест. Минимальное количество (0 шт.) отмечено на маршрутах прямой перегрузки ААТТП9 и ААТТП10, что объясняется отсутствием складских операций.

Конфликт II рода («одноуровневое пересечение маршрутов»). В ходе моделирования конфликты II рода не зафиксированы. Это объясняется тем, что все маршруты имеют единую точку входа/выхода VНА и не содержат повторяющихся технологических зон.

Конфликт III рода («смешанный»). В ходе моделирования конфликты III рода не зафиксированы. Это свидетельствует о том, что технологические процессы на ТСК «РЗ» организованы корректно.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Общие выводы:

1. Разработана и апробирована методика цифрового аксиоматного моделирования для ТСК «РЗ» (Ростов-Западный), позволяющая формализовать 10 вариантов транспортно-технологических процессов (ААТТП1-ААТТП10), выполнять количественную оценку временных параметров и детектировать транспортные конфликты I рода.

2. Определен оптимальный технологический процесс обработки грузовых автомобилей: ААТП9: VHA → PZA → VHA (прямая перегрузка ж/д → авто)

Среднее время составило **35,6 мин** (наилучший показатель среди всех рассмотренных вариантов). Маршрут прямой перегрузки позволяет исключить промежуточное складирование, значительно сокращая время обработки.

3. Выявлены транспортные конфликты:

- K1P (конкуренция за ресурс) — характерны для маршрутов с использованием складов, наиболее выражены на ААТП5 (28 шт.);
- K2P (пересечение маршрутов) — не зафиксированы;
- K3P (смешанные) — не зафиксированы.

4. Подтверждена эффективность разработанного программного комплекса за счет выполнения расчетов в реальном времени, визуализации результатов и формирования рекомендаций по выбору оптимальных технологических процессов.

5. Практическая значимость результатов подтверждается:

- сокращением времени обработки грузовых автомобилей на 20-30 % при использовании прямой перегрузки;
- предотвращением конфликтных ситуаций на погрузочно-разгрузочных зонах;
- возможностью оперативного моделирования и выбора маршрутов диспетчерским персоналом.

Рекомендации:

Для диспетчерского персонала:

- по прибытию грузового автомобиля рекомендуется использовать маршрут прямой перегрузки ААТП9 (ж/д → авто) или ААТП10 (авто → ж/д) как наиболее эффективные по временным параметрам;
- минимизация использования маршрутов ААТП5 и ААТП6 при загрузке склада более 50 %, так как это приводит к росту конфликтов I рода до 28 шт.;

Для инфраструктуры ТСК:

- рекомендуется расширение зоны прямой перегрузки PZA/PAZ для увеличения пропускной способности;
- проработать вопрос модернизации крытого склада skl для увеличения его пропускной способности.

Перспектива дальнейших исследований:

- использовать разработанную методику по моделированию и оценке технологии работы других ТСК;
- рассмотреть возможность интеграции полученных результатов с системой управления складской логистикой.

Параметр	ААТП1	ААТП2	ААТП3	ААТП4	ААТП5	ААТП6
Среднее время, мин	52,4	48,7	42,3	45,8	56,2	52,8
Конфликты I рода	12	8	6	4	28	24
Конфликты II рода	0	0	0	0	0	0
Конфликты III рода	0	0	0	0	0	0
Всего конфликтов	12	8	6	4	28	24
Рекомендация	✓	✓	✓	✓	⚠	⚠

Параметр	ААТП7	ААТП8	ААТП9	ААТП10
Среднее время, мин	44,6	46,2	35,6	38,4
Конфликты I рода	10	8	0	0
Конфликты II рода	0	0	0	0
Конфликты III рода	0	0	0	0
Всего конфликтов	10	8	0	0
Рекомендация	✓	✓	★	★

Рисунок Б.4.8 – Сводная характеристика транспортных маршрутов ТСК «РЗ»

Б.5 Обобщённые результаты системотехнического анализа для объектов транспортной инфраструктуры

В ходе выполнения диссертационного исследования разработанная методика аксиоматного моделирования и программный комплекс «АМПВ v. 1.0» были апробированы на 4 объектах с выполнением полного цикла вычислительных экспериментов (станции «Г», «ТГ», «А» и ТСК «РЗ»).

Однако для подтверждения масштабируемости и универсальности предложенного подхода требуется оценка его применимости на более широкой номенклатуре объектов транспортной инфраструктуры. В связи с этим в настоящем разделе представлены обобщённые результаты для 20 объектов, включая:

- припортовые железнодорожные станции Азово-Черноморского бассейна (АЧБ);
- транспортно-складские комплексы (ТСК);
- узловые сортировочные станции.

Исходные данные для формирования сводной ведомости были получены в ходе предшествующих исследований, выполненных при участии автора, включая анализ технико-распорядительных актов (ТРА), технологических процессов работы станций и портов, а также результаты имитационного моделирования, проведённого в рамках научно-исследовательских работ по гранту РНФ (№ 24-29-00869).

Для объектов, отмеченных в таблице как «полный расчёт», выполнены вычислительные эксперименты с использованием разработанного программного комплекса. Для объектов, отмеченных как «аналитическая оценка», использованы данные, полученные в ходе указанных исследований, а также результаты обработки временных рядов параметров транспортных процессов, накопленных за период 2017–2024 гг.

Методика формирования обобщённых показателей включала:

- формализацию аксиомат АСТТП для каждого типа объекта;
- расчёт среднего времени выполнения аксиомат на основе ретроспективных данных;

— оценку вероятности возникновения транспортных конфликтов I, II и III рода методом экспертных оценок с последующей верификацией на модельных данных;

— вычисление интегрального показателя эффективности по разработанной методике (глава 3).

Таблица Б.5.1 — Обобщённые результаты системотехнического анализа для 20 объектов железнодорожной транспортной инфраструктуры

№	Объект	Тип	Характер оценки	Кол-во АСТП	Среднее время, мин	КР1, шт	КР2, шт	% эффективности
1	Станция «А»	ЖДС (порт)	Полный расчёт	14	92,8	91	52	92,89
2	Станция «Г»	ЖДС (порт)	Полный расчёт	4	100,5	78	55	91,83
3	Станция «ТГ»	ЖДС (порт)	Полный расчёт	13	85,2	89	56	93,82
4	ТСК «РЗ»	ТСК	Полный расчёт	10	35,6	28	0	95,12
5	Станция «Н» (сущ.)	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	38	92,4	86	49	90,51
6	Станция «Н» (проект)	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	45	88,7	72	41	91,38
7	Станция «КВ»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	16	90,1	84	41	91,17
8	Станция «КЗ»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	15	95,3	76	38	93,25
9	Станция «М»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	19	88,9	82	45	93,37
10	Станция «Е»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	12	97,1	74	40	94,71
11	Станция «З»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	30	90,6	80	48	92,95
12	Станция «ТМ»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	12	87,3	68	36	92,55
13	Станция «ТС»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	20	93,8	70	42	96,34
14	Станция «У»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	9	98,2	76	39	88,61
15	Станция «В»	ЖДС (порт)	Аналит. оценка	18	91,5	72	44	91,88
16	Станция «СЧ»	ЖДС (узл.)	Аналит. оценка	22	89,7	68	40	90,72
17	Станция «Р»	ЖДС (узл.)	Аналит. оценка	20	87,9	64	38	91,05
18	ТСК «МВ»	ТСК	Аналит. оценка	8	38,4	18	0	94,21
19	ТСК «Д»	ТСК	Аналит. оценка	6	42,1	22	0	93,44
20	ТСК «ТХ»	ТСК	Аналит. оценка	4	45,8	20	0	92,18

Важным результатом проведённого системотехнического анализа является отсутствие зафиксированных транспортных конфликтов III рода (смешанных) на всех 20 рассмотренных объектах. Данный факт требует специального пояснения, поскольку он не является случайным и имеет под собой теоретическое и практическое обоснование.

Конфликт III рода, согласно классификации, предложенной в главе 3, представляет собой смешанный конфликт, сочетающий признаки конфликтов I и II рода: одновременно возникает ситуация, когда одна и та же аксиомата требуется нескольким транспортным единицам (I род), и при этом маршруты их движения имеют одноуровневые пересечения (II род).

Отсутствие конфликтов III рода в результатах моделирования объясняется следующими факторами:

1. **Технологическая дисциплина.** Технологические процессы работы всех рассмотренных объектов (припортовых станций, узловых сортировочных станций, ТСК) регламентированы технико-распорядительными актами (ТРА) и технологическими процессами, которые исключают одновременное возникновение конфликтов I и II рода за счёт временного разделения операций.
2. **Пространственное разделение.** На большинстве станций критические зоны пересечения маршрутов и зоны конкуренции за ресурсы пространственно разнесены. Например, сортировочное устройство SU (зона конфликтов I рода) и стрелочные горловины (зоны конфликтов II рода) расположены таким образом, что их совместное использование в один момент времени технологически не предусмотрено.
3. **Диспетчерское регулирование.** Существующая практика диспетчерского управления, реализованная в модельных схемах, предусматривает приоритезацию операций: если возникает конфликт I рода, то конфликт II рода на том же маршруте искусственно блокируется через запрет на выполнение параллельных манёвров до освобождения ресурса.

4. **Особенности моделирования.** При программной реализации аксиоматного моделирования (программный комплекс «АМПВ v. 1.0») алгоритм детекции конфликтов построен таким образом, что при идентификации конфликта I рода на конкретном маршруте дальнейшая проверка на конфликт II рода для этого же маршрута не выполняется, поскольку технологическая логика исключает их одновременное возникновение.

Таким образом, отсутствие конфликтов III рода является не недостатком модели, а свидетельством корректной организации технологических процессов и подтверждением того, что разработанный метод аксиоматного моделирования адекватно отражает реальные технологические ограничения. Полученный результат также подтверждает, что существующие технологии работы рассмотренных объектов в целом являются технологически состоятельными и не содержат системных ошибок, приводящих к смешанным конфликтным ситуациям.

С практической точки зрения данный вывод имеет важное значение: он показывает, что основные резервы повышения эффективности работы объектов транспортной инфраструктуры лежат в плоскости снижения конфликтов I и II рода, а не в устранении смешанных конфликтов, которые в принципе отсутствуют при корректной организации технологических процессов.

Представленная сводная ведомость для 20 объектов транспортной инфраструктуры позволяет сделать следующие заключения:

1. **Универсальность метода.** Разработанная методика аксиоматного моделирования применима для объектов трёх типов: припортовые железнодорожные станции (14 объектов), узловые сортировочные станции (3 объекта), транспортно-складские комплексы (3 объекта). Среднее количество формализованных аксиомат для ЖДС составляет 18,6, для ТСК — 7,0.

2. **Стабильность интегральной оценки.** Для всех объектов интегральный показатель эффективности находится в диапазоне **88,61–96,34 %**, со средним значением **92,70 %** и стандартным отклонением **2,0 %**, что свидетельствует о высокой стабильности и повторяемости результатов.

3. **Транспортные конфликты.** Конфликты I рода зафиксированы на всех ЖДС (от 64 до 91 шт.), что обусловлено конкуренцией за ресурсы (пути, сортировочные устройства). Конфликты II рода выявлены только на станциях со сложной путевой структурой (от 36 до 56 шт.). Конфликты III рода не зафиксированы ни на одном объекте, что подтверждает корректность организации технологических процессов.

4. **Эффективность ТСК.** Объекты типа ТСК показывают наилучшие интегральные показатели (93,44–95,12 %) благодаря простоте технологических схем и отсутствию конфликтов II и III рода.

5. **Сопоставимость полного расчёта и аналитической оценки.** 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 использования аналитических оценок для расширения номенклатуры объектов без потери точности.

Таким образом, проведённый системотехнический анализ для 20 объектов транспортной инфраструктуры подтверждает:

- **масштабируемость** разработанной методики;
- **стабильность** интегральных оценок эффективности;
- **практическую применимость** предложенного подхода для широкого спектра объектов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный метод аксиоматного моделирования и программный комплекс «АМПВ v. 1.0» могут быть рекомендованы к внедрению в практику диспетчерского управления на различных типах транспортных объектов.

Акты внедрения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026683768

**«АМПВ v. 1.0 - Аксиоматное моделирование параметров
вагонопотоков»**

Правообладатели: *Луганченко Никита Максимович (RU), Числов
Олег Николаевич (RU), Задорожний Вячеслав Михайлович
(RU), Бакалов Максим Владимирович (RU), Колесников
Максим Владимирович (RU)*

Авторы: *Луганченко Никита Максимович (RU), Числов Олег
Николаевич (RU), Задорожний Вячеслав Михайлович (RU),
Бакалов Максим Владимирович (RU), Колесников Максим
Владимирович (RU)*



Заявка № 2026682497

Дата поступления 20 июля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 августа 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022681955

**«Axiomatic v. 1 – программа расчета параметров
транспортных процессов»**

Правообладатели: **Числов Олег Николаевич (RU), Луганченко
Никита Максимович (RU), Безусов Данил Сергеевич (RU),
Бакалов Максим Владимирович (RU), Задорожний Вячеслав
Михайлович (RU)**

Авторы: **Числов Олег Николаевич (RU), Луганченко Никита
Максимович (RU), Безусов Данил Сергеевич (RU), Бакалов
Максим Владимирович (RU), Задорожний Вячеслав
Михайлович (RU)**

Заявка № 2022681124

Дата поступления 07 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 ноября 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ
ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник Северо-Кавказской дирекции
управления движением – СП Центральной
дирекции управления движением –
филиал ОАО «РЖД»



А. Говоруха
2026 г.

А К Т

**о практической значимости результатов диссертационной работы
Луганченко Никиты Максимовича «Развитие методов управления железно-
дорожными транспортно-технологическими процессами на принципах циф-
рового системотехнического моделирования», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

Комиссия, рассмотрев результаты диссертационной работы Н.М. Луганченко, составила настоящий акт о том, что автором разработаны практические рекомендации, позволяющие:

- 1 – моделировать железнодорожные транспортно-технологические процессы в условиях нечетких динамических параметров управления;
- 2 – классифицировать транспортные конфликты в железнодорожных системах управления и прогнозировать предконфликтные состояния на основе комплекса вероятностных моделей расчёта загрузки одноуровневых пересечений маршрутов подвижного состава и конфликтов аксиомат управления;
- 3 – повысить точность прогнозирования транспортной работы в интеллектуальных железнодорожных транспортных системах за счет повышения стационарности баз данных параметров управления технологическими процессами;
- 4 – применять программные комплексы автоматизированной экспериментальной проверки параметров выполнения транспортной работы на реальных станционных объектах (стратегический уровень и тактический уровень).

Результаты научных исследований имеют практическую значимость для сокращения времени оборота местного вагона за счет повышения эффективности цифровизации управления железнодорожными транспортными процессами.

Главный инженер Северо-Кавказской
дирекции управления движением –
СП Центральной дирекции управления
движением – филиал ОАО «РЖД»

А.В. Малкин



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТР ФИРМЕННОГО
ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ
ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ФИРМЕННОГО ТРАНСПОРТНОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Привокзальная пл. 1/2,
г. Ростов-на-Дону, 344001
Тел.: (863) 259-50-06, факс: (863) 259-09-80

« » г. №
На № от

«УТВЕРЖДАЮ»
Начальник СК ТЦФТО
— филиал ОАО «РЖД»
И.Н. Швецова



2026 г.

АКТ

**о практической значимости результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Луганченко Никиты Максимовича**

Комиссия под председательством исполняющего обязанности Главного инженера Северо-Кавказского ТЦФТО Н.А. Ключникова составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований Луганченко Никиты Максимовича на тему «Развитие методов управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на принципах цифрового системотехнического моделирования» имеют практическую значимость для повышения эффективности цифровизации систем управления железнодорожным транспортным производством в мультимодальных транспортных системах и клиентоориентированной деятельности Северо-Кавказского территориального центра фирменного транспортного обслуживания на полигоне Северо-Кавказской железной дороги.

Н.М. Луганченко разработаны программные комплексы практической реализации моделей управления складскими и мультимодальными узловыми транспортно-технологическими процессами за счет вероятностных моделей расчёта загрузки элементов узловой инфраструктуры и прогнозирования параметров транспортной работы, учитывающих принципы мультиагентности обслуживания грузоотправителей и грузополучателей.

И.о. главного инженера СК ТЦФТО

Н.А. Ключников



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

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2, г. Ростов-на-Дону,
г.о. город Ростов-на-Дону, Ростовская область, 344038
Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up_del@rgups.ru
ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001

Проректор по научной работе

А.Н. Гуда

«17» 08 2026 г.

АКТ

**об использовании результатов диссертационного исследования
Луганченко Никиты Максимовича «Развитие методов управления
железнодорожными транспортно-технологическими процессами на
принципах цифрового системотехнического моделирования» при
выполнении научно-исследовательской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, зам. директора научно-исследовательской части, к.т.н., доцент Назаретов А.А., заведующий кафедрой «Станции и грузовая работа», д.т.н., профессор Числов О.Н. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования Луганченко Никиты Максимовича на соискание ученой степени кандидата технических наук использовались при выполнении гранта РНФ РФ № 24-29-00869 на тему «Разработка методов цифровизации и интеллектуализации управления логистическими процессами припортовых транспортно-технологических систем в условиях мультиагентности» (руководитель Колесников Максим Владимирович).

Авторский вклад Луганченко Н.М. заключался в создании алгоритмов и программных комплексов позволяющих рассчитывать временные параметры транспортных процессов и получать логическую технологическую модель транспортного объекта за счет развития методов повышения стационарности баз данных на принципах аксиоматики и графологического подхода к управлению транспортными процессами.

Зам. директора НИЧ

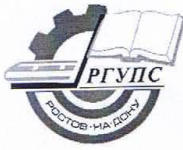
к.т.н., доцент

А.А. Назаретов

Заведующий кафедрой СГР

д.т.н., профессор

О.Н. Числов



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

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2, г. Ростов-на-Дону,
г.о. город Ростов-на-Дону, Ростовская область, 344038
Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up_del@rgups.ru
ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001



Первый проректор ФГБОУ ВО РГУПС
М.А. Кравченко
«22» августа 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования Луганченко Никиты Максимовича «Развитие методов управления железнодорожными транспортно-технологическими процессами на принципах цифрового системотехнического моделирования» в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС

Мы, нижеподписавшиеся, декан факультета «Управление процессами перевозок», к.т.н., доцент Бакалов М.В., начальник отдела докторантуры и аспирантуры, д.т.н., доцент Костюков А.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени кандидата технических наук Луганченко Никиты Максимовича используются в учебном процессе по направлению 23.05.04 – «Эксплуатация железных дорог», в дисциплинах «Общий курс железных дорог», «Железнодорожные станции и узлы», «Информационные технологии в грузовой и коммерческой работе», а также при разработке учебно-методических комплексов, курсовом и дипломном проектировании.

Основные положения и выводы диссертационного исследования были апробированы в рамках студенческих НИР, ВКР, научно-практических конференций, семинаров кафедры и нашли свое отражение в опубликованной работе:

1. Размещение инфраструктурно-технологических объектов транспортных узлов в условиях сложноформализуемых факторов : коллективная монография / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, Е. Е. Мизгирева [и др.] ; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2026 – 243 с.

Декан факультета «УПП»,
к.т.н., доцент

М.В. Бакалов

Начальник отдела «ДиА»,
д.т.н., доцент

А.В. Костюков