

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет транспорта»

Объект авторского права
УДК 656.222.3

**ЕРОФЕЕВ
АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ТЕОРИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности 05.22.08 – Управление процессами перевозок

Гомель, 2023

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Научный консультант – **Бородин Андрей Федорович**, доктор технических наук, профессор, начальник отдела технологического обеспечения автоматизированных систем и имитационного моделирования Центра эксплуатации железных дорог и взаимодействия транспортных систем, Акционерное общество «Институт экономики и развития транспорта»

Официальные оппоненты: **Осьминин Александр Трофимович**, доктор технических наук, профессор, заместитель председателя Объединенного ученого совета ОАО «Российские железные дороги» по вопросам научного развития и взаимодействия;

Лобашов Алексей Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные системы и технологии» учреждения образования «Белорусский национальный технический университет»;

Шимановский Александр Олегович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Оппонирующая организация – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Защита состоится «23» января 2024 г в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 08.01.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет транспорта» по адресу: 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34, ауд. 248, тел. (80232) 95-21-91, факс (80232) 20-22-35, e-mail: natalia.kekish@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта».

Автореферат разослан «20» декабря 2023 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Н.А. Кекиш

ВВЕДЕНИЕ

Ведущая роль в транспортных системах многих государств отводится железнодорожному транспорту. В Республике Беларусь в последние 10 лет на его долю приходится 35–40 % общего грузооборота и 20–25 % общего пассажирооборота. В связи с этим проблематика эффективного управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте является важной общегосударственной задачей.

Теоретические основы построения системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте (СУПП) были заложены в XIX–XX веках и ориентированы на перемещение устойчивых массовых потоков грузов, как правило, на значительные расстояния с минимальными эксплуатационными затратами. Исходя из этих предпосылок развивались и автоматизированные системы управления (АСУ), которые стали массово внедряться на железных дорогах в 1980–1990 годы и которые по своей сути являлись информационно-справочными.

Однако в последние годы наметилась общемировая тенденция, когда в относительно короткие периоды существенно варьируются объемы и структура транспортных потоков, изменяются логистические схемы доставки грузов, перераспределяется транспортная работа между объектами инфраструктуры. При этом технологии адаптации долгосрочных планов к складывающейся эксплуатационной обстановке слабо формализованы и не реализованы в АСУ; остается нерешенной научная проблема перехода от плановых к диспетчерским методам управления.

В таких условиях традиционные технологии СУПП, базирующиеся на долгосрочном планировании на основе ретроспективных данных и «ручной» системе диспетчерского управления перевозками, становятся неэффективными и ресурсозатратными. Аспектам развития СУПП в различных странах посвящен ряд стратегических документов, при этом в качестве ключевого фактора повышения эффективности выделено внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Однако при большом внимании к вопросам внедрения ИТС на данный момент имеется положительный опыт интеллектуализации только отдельных технологических решений, а единая интеллектуальная система управления перевозочным процессом (ИСУПП) не создана ни в одной стране мира.

В диссертационном исследовании разработана теория построения ИСУПП, использование которой при разработке и эксплуатации интеллектуальных систем управления позволит повысить адаптивность технологий перевозочного процесса к изменяющейся эксплуатационной обстановке, решать новые эксплуатационные задачи и разрабатывать единую технологию перевозочного процесса (ЕТПП) с учетом интересов всех ее участников.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Исследования и научно-технические разработки по теме диссертации выполнялись в соответствии с Государственной программой развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016–2020 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28.04.2016 г. № 345), Государственной программой «Транспортный комплекс» на 2021–2025 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23.03.2021 г. № 165), Стратегией инновационного развития транспортного комплекса Республики Беларусь до 2030 года (Приказ Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 25.02.2015 г. № 57-Ц).

Под руководством и при непосредственном участии автора и с использованием положений диссертации выполнены следующие научно-исследовательские темы: факторный анализ эффективности функционирования железнодорожного транспорта Республики Беларусь, определение направлений устойчивого развития отрасли, оценка рисков принятия предлагаемых преобразований (№ 13166 от 19.08.2019) (ГР 20192639); разработка Концепции развития логистической системы Республики Беларусь на период до 2030 г. (№ 11385 от 03.08.2017) (ГР 20171704); исследование и анализ нормативной правовой базы и анализ условий работы железнодорожного транспорта и выработка предложений по ее совершенствованию (№ 11290 от 06.07.2017) (ГР 20171543); анализ основных направлений применения цифровых технологий в деятельности железнодорожного транспорта, таможенных и иных контрольных органов, биржевой и дистрибьюторской практики, основных экспортно ориентированных субъектов предпринимательства (концернов, холдингов) Беларуси (№ 12986 от 22.05.2019) (ГР 20191873) и свыше 50 НИР по тематике исследования.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка теории построения ИСУПП, использование которой при проектировании, внедрении и эксплуатации позволит повысить адаптивность технологий перевозочного процесса к изменяющейся эксплуатационной обстановке, решать новые эксплуатационные задачи, обеспечить координацию и преемственность управляющих решений (УР) в СУПП, повысить управляемость системы, что в совокупности позволит обеспечить эффективное функционирование всех участников ЕТПП в условиях изменения объемов и структуры транспортных потоков.

Основные задачи исследования:

1) выполнить анализ СУПП и обосновать перспективные направления ее совершенствования, в том числе за счет использования технологий искусственного интеллекта;

2) разработать методологию построения ИСУПП, обеспечивающую повышение эффективности перевозочной деятельности железной дороги за счет использования интеллектуальных и информационно-коммуникационных технологий в СУПП;

3) сформировать принципы онтологического описания объектов и процессов предметной области «перевозочный процесс», обеспечивающие онтологическое единообразие всех подсистем ИСУПП.

4) разработать априорные модели, методы и технологии решения существующих и новых задач интеллектуального планирования в СУПП, в том числе построения многослойного адаптивного графика движения поездов (МАГ), детализированного пооперационного сменно-суточного планирования поездной и грузовой работы, планирования поездообразования для дорожных полигонов;

5) разработать апостериорные модели, методы и технологии решения существующих и новых задач интеллектуального диспетчерского управления перевозочным процессом, в том числе оперативной диспетчерской корректировки графика движения поездов (ГДП) с адаптивным набором критериев управления процессами составаобразования в их увязке с ГДП;

6) разработать концепцию ИСУПП и внедрить на железнодорожном транспорте системы интеллектуального управления отдельными технологическими процессами перевозочной деятельности;

7) обосновать этапность создания и направления развития ИСУПП, дать технологическую и экономическую оценку эффективности ее внедрения.

Объектом исследования является перевозочный процесс на железнодорожном транспорте.

Предметом исследования является система управления и технологии перевозочного процесса на железнодорожном транспорте.

Научная новизна.

1 Разработана методология построения ИСУПП, включая правила формирования объектно-процессной онтологии перевозочного процесса, принципы формирования априорных и апостериорных моделей описания технологических процессов, принципы координации функционирования элементов в ИСУПП и построения гибридных решателей эксплуатационных задач (ГБРЭЗ), что в совокупности позволяет формализовать описание ЕТПП в рамках одной интеллектуальной системы, и за счет этого разрабатывать новые методы, методики и технологии решения эксплуатационных задач (ЭЗ), повысить адекватность формируемых в УР складывавшейся эксплуатационной обстановке.

2 Впервые предложена процессно-объектная онтология перевозочного процесса, включающая классификаторы, единые принципы описания

объектов и процессов, структуру и закономерности взаимодействия между ними, процедуры актуализации параметров и свойств, что позволяет рассматривать перевозочный процесс как единую предметную область, обеспечить онтологическое единообразие всех входящих в ИСУПП подсистем и вести скоординированную разработку и последующую эксплуатацию интеллектуальных подсистем и элементов в последовательно-параллельном режиме и силами различных разработчиков.

3 Разработаны априорная модель, метод и методика решения новой эксплуатационной задачи «Формирование и актуализация МАГ», что дополняет существующую теорию разработки ГДП процедурами определения количества слоев (групп расписаний) и распределения поездных заявок между слоями с использованием улучшенного алгоритма CLOPE. Полученные результаты позволяют в автоматическом режиме разрабатывать ГДП, использовать нормативный ГДП в разных эксплуатационных ситуациях, а также повысить маршрутную (участковую) скорость движения поездов ядра не менее чем на 8 %.

4 Разработана новая методология интеллектуального планирования поездной работы, включающая методы, модели и технологии планирования. В дополнение к разработке годового плана формирования поездов (ПФП) предложены алгоритмы его актуализации в зависимости от складывающейся эксплуатационной обстановки, алгоритмы планирования поездообразования (ППО) с повышением его уровня со станционного до дорожного и устанавливающие в планах не только количественные, но и временные параметры процессов. При реализации предложенной методологии в ИСУПП периодичность оперативной корректировки ПФП должна составлять 5–15 суток, период ППО на дорожном уровне увеличится с одних до 3–5 суток, текущего планирования – с 3–6 до 12–24 часов, а также появится возможность формирования гармонизированного плана поездной работы для полигона железной дороги, включающего до 30 технических станций.

5 Предложен новый метод планирования поездной и грузовой работы, который предусматривает использование априорных моделей планирования, алгоритмов машинного обучения, основанных на регрессионном анализе данных о выполнении планов, сценарного описания бизнес-процессов планирования. Разработанный метод предусматривает перенос процедуры разработки конечного УР со станционного на дорожный уровень, впервые позволяет сформировать единый пономерной пооперационный план грузовой работы для всего полигона железной дороги (не менее 200 станций, открытых для грузовых операций) на период не менее одних суток с обеспечением высокой точности планирования (до 91–94 % по сравнению с 65–75 % при традиционных технологиях) и повысить эффективность использования перевозочных ресурсов.

6 Разработаны оригинальные апостериорные модели и семейство алгоритмов интеллектуальной диспетчерской корректировки ГДП которые за счет использования деревьев классификации эксплуатационных обстановок и решения задач ситуационного моделирования позволяют в режиме реального времени компенсировать отклонения в ГДП на однопутных участках до 11 %, а на двухпутных – до 7 % при обеспечении своевременного отправления и прибытия поездов ядра ГДП по начальным-конечным станциям участка.

7 Разработана методология решения новой эксплуатационной задачи «Увязка составообразования с графиком движения поездов» (УСОГДП) которая позволила исключить технологические разрывы при информационном обмене между центром управления перевозками (ЦУП) и техническими станциями и разработать вместо разрозненных локальных планов совместные планы поездной и станционной работы для полигонов, включающих до 100 поездо-участков и до 30 технических станций.

8 Разработана концепция формирования ЕТПП в ИСУПП, которая предусматривает использование информационно-коммуникационных и интеллектуальных технологий в системе управления эксплуатационной работой, обеспечивает формирование с учетом накопленного массива опыта комплексных УР, что позволяет увеличить централизацию СУПП с 0,47 до 0,75; снизить структурную избыточность с 5,26 до 3,50, а также снизить неравномерность распределения информационных связей с 7,19 до 4,17.

Положения, выносимые на защиту

1 Методологии построения ИСУПП, включая правила формирования объектно-процессной онтологии перевозочного процесса, принципы формирования априорных и апостериорных моделей описания технологических процессов, принципы координации функционирования элементов в ИСУПП и построения ГБРЭЗ, что в совокупности впервые позволяет формализовать описание ЕТПП в рамках одной интеллектуальной системы.

2 Процессно-объектная онтология перевозочного процесса, включающая классификаторы, единые принципы описания объектов и процессов, структуру и закономерности взаимодействия между ними, процедуры актуализации параметров и свойств, что позволяет рассматривать перевозочный процесс как единую предметную область, обеспечить онтологическое единообразие всех входящих в ИСУПП подсистем и вести скоординированную разработку и последующую эксплуатацию интеллектуальных подсистем и элементов в последовательно-параллельном режиме и ресурсами различных разработчиков.

3 Постановка и метод решения новой эксплуатационной задачи «Формирование и актуализация МАГ», что дополняет существующую

теорию разработки ГДП процедурами определения количества слоев (групп расписаний) МАГ, распределения поездных заявок между слоями, актуализации ГДП в зависимости от эксплуатационной обстановки на полигоне, и позволяет в автоматическом режиме разрабатывать адаптивные ГДП и в последующем использовать их без пересоставления при различных уровнях эксплуатационной нагрузки.

4 Новая методология интеллектуального планирования поездной работы, включающая регламентацию продолжительности периодов планирования, методы, модели и технологии разработки ПФП и его актуализацию в зависимости от складывающейся эксплуатационной обстановки и позволяющая за счет использования ГБРЭЗ формировать гармонизированные планы поездной работы для полигона железной дороги, включающего до 30 технических станций, а также устанавливать в планах не только количественные, но и временные параметры процессов.

5 Новый метод планирования поездной и грузовой работы, который за счет использования априорных моделей планирования, алгоритмов машинного обучения, основанных на регрессионном анализе данных о выполнении планов, сценарного описания бизнес-процессов планирования, впервые позволяет сформировать единый пономерной пооперационный план грузовой работы для всего полигона железной дороги (не менее 200 станций, открытых для грузовых операций) с детализацией по клиентам на период не менее одних суток с обеспечением точности планирования не менее 91 %.

6 Оригинальные апостериорные модели и семейство алгоритмов интеллектуальной диспетчерской корректировки ГДП, которые за счет использования деревьев классификации эксплуатационных обстановок и решения задач ситуационного моделирования позволяют в режиме реального времени компенсировать отклонения в ГДП на однопутных участках до 11 %, а на двухпутных – до 7 %, а также увеличить период текущего планирования поездной работы до 24 часов и более.

7 Постановка и методология решения новой эксплуатационной задачи УСОГДП, которая за счет использования математического аппарата ситуационного моделирования и искусственных нейронных сетей позволяет разрабатывать адаптивные планы составообразования для полигонов, включающих до 100 поездо-участков и до 30 технических станций, обеспечить повышение точности планирования до 25 % по сравнению с существующими методами.

8 Концепция формирования ЕТПП в ИСУПП, которая регламентирует структуру и функциональный состав системы, принципы информационного взаимодействия между элементами и подсистемами, этапность реализации, правила формирования УР и методики оценки их эффективности, что в

совокупности позволяет повысить эффективность и адаптивность СУПП, улучшить показатели скорости продвижения транспортных потоков, надежности и экономичности перевозочного процесса.

Личный вклад соискателя. Соискателю принадлежит постановка цели и задач, разработка теоретических основ, моделей, методов и технологий решения существующих и новых задач интеллектуального управления перевозочным процессом, оценка их эффективности. Автор являлся научным руководителем и ответственным исполнителем научно-исследовательских работ по данному направлению. Совместно с научным консультантом д-ром тех. наук, профессором А.Ф. Бородиным выполнена концептуальная проработка исследований. В разработке отдельных положений диссертации принимали участие соавторы публикаций, что полностью отражено в совместно опубликованных работах.

Апробация результатов диссертации

Научные результаты диссертации отражены в опубликованных печатных работах соискателя, докладывались и обсуждались на научных мероприятиях: открытых научных семинарах кафедры «Управление эксплуатационной работой и охрана труда» УО «БелГУТ»; конференциях «Проблемы и перспективы развития транспортных систем: техника, технология, экономика и управление» (Киев, 2003, 2008, 2011, 2013), «Современные проблемы управления перевозочным процессом. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований» (Москва, 2006); «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, 2007); «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании» (Днепропетровск, 2012, 2016); «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ)» (Москва, 2013, 2014, 2016, 2017, 2019); «Проблемы транспортного обеспечения развития национальной экономики» (Нижний Новгород, 2013); «Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения» (Воронеж, 2015); «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, 2019); «Тихомировские чтения: Инновационные технологии перевозочного процесса» (Гомель, 2018, 2020, 2022); «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 2000, 2002, 2010, 2012, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022); «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (Гомель, 2003, 2013, 2018); «Информационные технологии и системы» (Минск, 2015, 2016); «Современные проблемы развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом» (Москва, 2015); «Транспортные системы: тенденции развития» (Москва, 2016); «Инновационные решения проблем экономики знаний

Беларуси и Казахстана» (Минск, 2016); «Наука и образование транспорту» (Самара, 2016); «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» (Минск, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2023); «Контейнеризация и управление цепями поставок» (Минск, 2017, 2018, 2019); Международном форуме по информационно-коммуникационным технологиям «ТИБО» (Минск, 2018, 2019, 2021); «Интеллектуальные транспортные системы» (Москва, 2023).

Результаты исследований использованы при разработке стратегических документов Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, технических нормативных правовых актов и проектной документации на создание информационно-управляющих систем ГО «Белорусская железная дорога», в учебном процессе учреждений образования и системы подготовки кадров.

Опубликование результатов диссертации. По результатам исследований опубликовано 98 научных работ, из них одна монография, 32 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации диссертационных исследований, 65 публикаций в материалах научных конференций, зарубежных сборниках научных работ и научных сборниках Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем диссертации составляет 480 страниц из них: 199 страниц – основной текст; 55 страниц – таблицы и рисунки; 31 страница – библиографический список (366 наименований, в том числе 98 авторских публикаций); 195 страницы – приложения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснованы актуальность и перспективность исследования.

В первой главе «Системный анализ проблемы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте» установлено, что автоматизация отдельных задач управления перевозочным процессом была одной из первых областей информатизации деятельности железнодорожного транспорта. Однако в современных условиях эффективность ранее разработанных АСУ снизилась ввиду существенных колебаний мощности и структуры транспортных потоков и изменений технологий перевозочного процесса. Дальнейшее развитие существующих ИС имеет существенные ограничения: точная математическая модель объекта может оказаться слишком сложной или непостроимой; изменения внешней объектной среды приводят к действию на объект ряда возмущений, представляющих собой дополнительный источник неопределенности

информации о состоянии объекта; требования к функционированию могут быть слабо формализованными и противоречивыми. Преодолеть указанные недостатки предлагается путем перехода от информационно-справочных и расчетных систем к интеллектуальным.

Значимые результаты в области развития ИТС на железнодорожном транспорте представлены в работах ученых научных школ УО «БелГУТ» (г. Гомель), РУТ-МИИТ (г. Москва), ВНИИЖТ (г. Москва), ВНИИАС (г. Москва), ПГУПС (г. Санкт-Петербург), РГОТУПС (г. Ростов), СибГУПС (г. Новосибирск), УрГУПС (г. Екатеринбург), ДНУЖТ (г. Днепр) и др.

В результате анализа установлено, что управление перевозочным процессом (ПП) распределено в пространстве и времени и включает решение уникальных по постановке, но взаимосвязанных ЭЗ. Решение каждой из них предполагает использование своего математического аппарата, критериев оптимальности, методов. При решении ЭЗ долгосрочного планирования используется преимущественно системный подход, для среднесрочного – процессный подход, а при оперативном управлении – объектный подход. Кроме того, различные авторы даже в работах одной научной школы зачастую используют различные онтологии описания процессов и объектов. Всё это приводит к информационной несогласованности в циклах формирования и реализации УР; невозможности решения комплексных ЭЗ.

Дальнейшее изучение ПП как объекта управления требует формализованного подхода к описанию всех его компонентов. Проблематика формирования ИСУПП должна базироваться на формировании ЕТПП и совершенствовании СУПП. Проблематика управления рассмотрена в рамках теорий систем, менеджмента, кибернетики и автоматического регулирования. Определены специфические свойства СУПП, которые не позволяют использовать в полном объеме накопленный в других отраслях и в других железнодорожных транспортных системах опыт интеллектуализации управления при построении ИСУПП. Предложено в качестве основы цифровой трансформации железнодорожного транспорта рассматривать ИСУПП.

В главе 2 «Теоретические основы интеллектуального управления перевозочным процессом» предложена теория построения ИСУПП (далее – теория) (рисунок 1). В рамках теории определены, цели, функции, задачи, приоритеты, ограничения, принципы интеллектуального управления. Предложено множество видов управления в СУПП в зависимости от полноты и достоверности информации о ходе перевозочного процесса и состоянии внешней объектной среды разделить на две группы: плановые и диспетчерские.

Закономерности перехода от планового к диспетчерскому управлению графически представлены на рисунке 2. Изменение контролируемого параметра во времени можно описать функцией $X = f(t)$. При этом следует различать планируемое изменение параметра $X = f_{\text{п}}(t)$ и фактическое $X = f_{\text{ф}}(t)$.

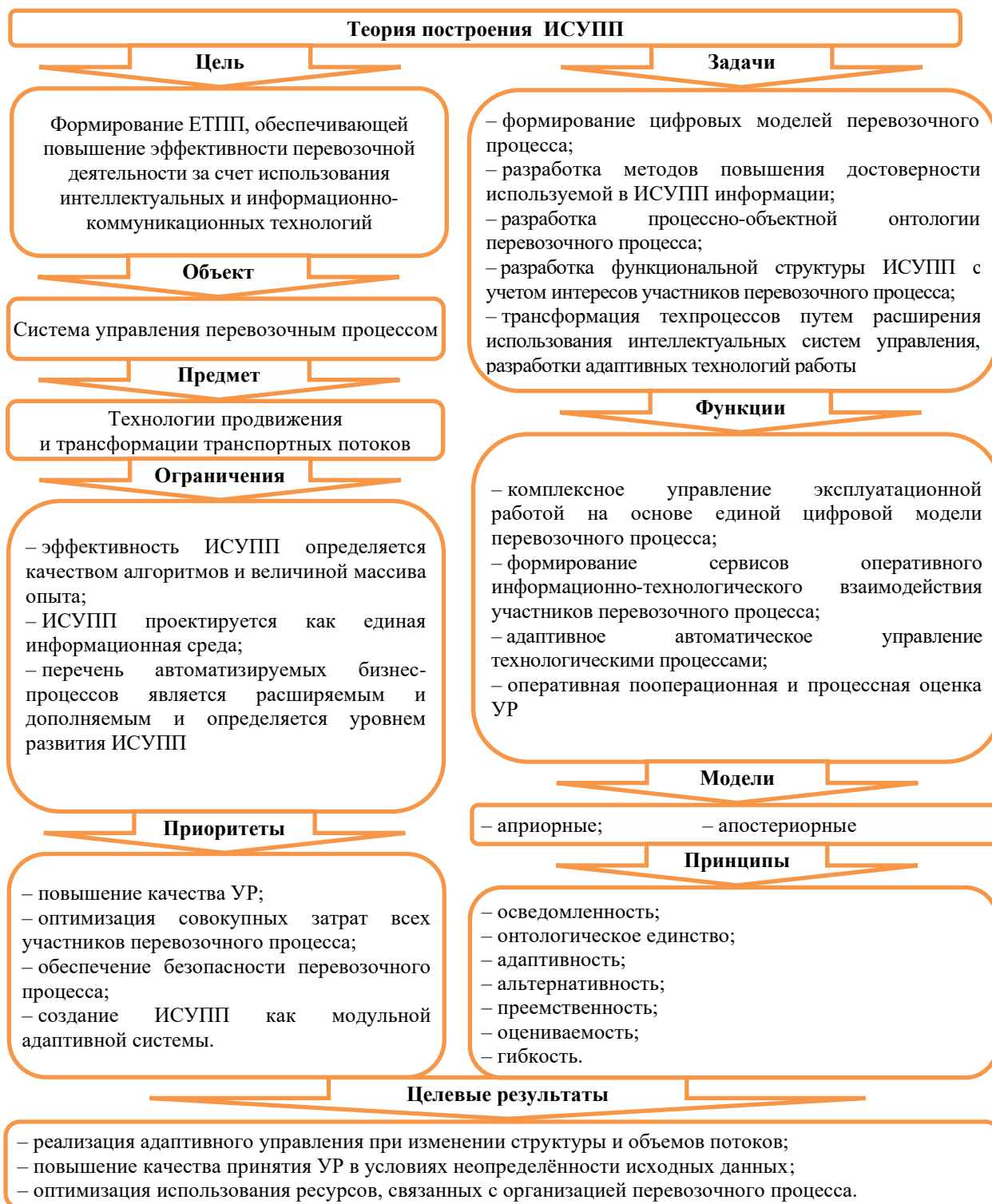


Рисунок 1 – Структура теории построения ИСУПП

Заблаговременно до начала планового периода определяется значение параметра X_0 . Так как момент начала разработки плана и момент начала периода планирования разнесены во времени на величину $T_{р.п.}$, необходимо определить значение параметра $X_n(t_0)$ на момент t_0 . Исходя из этого значения определяется функция изменения параметра во времени $X = f_n(t)$ на период от t_0 до $t_{план}$ и диапазон допустимого изменения показателя относительно планового значения.

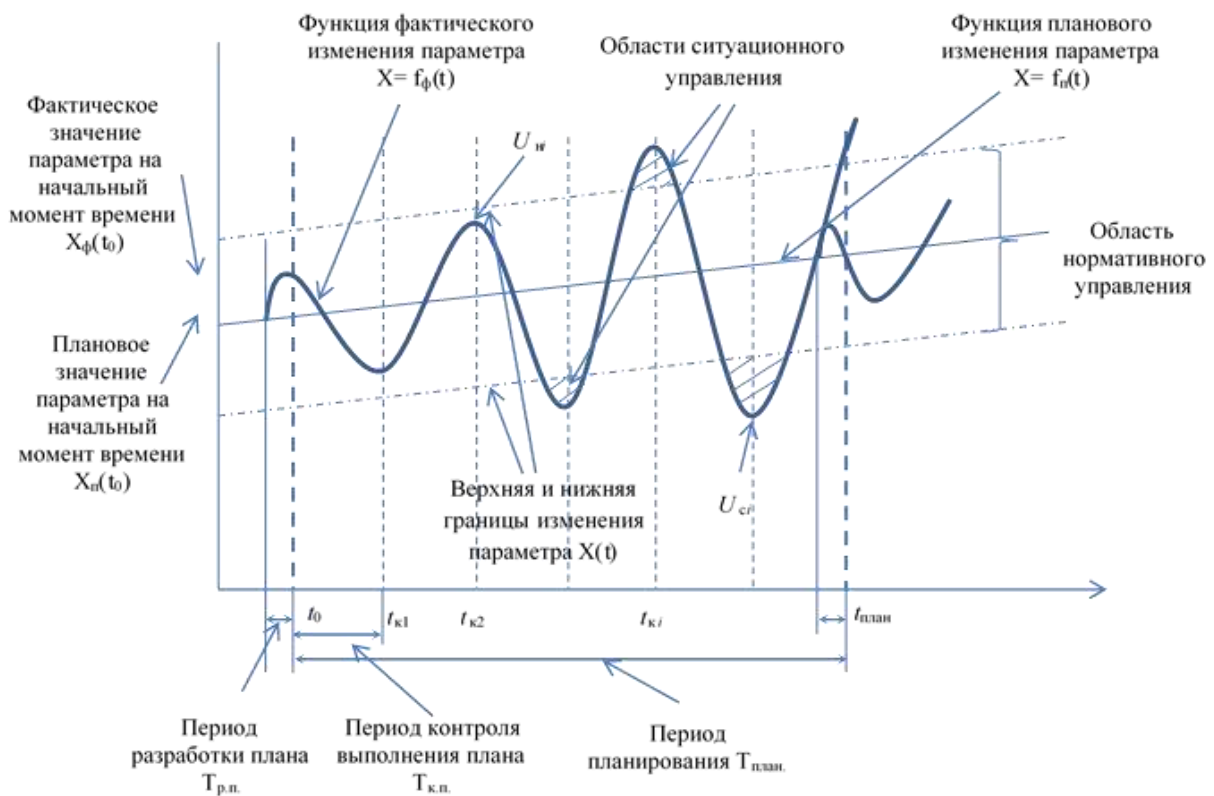


Рисунок 2 – Закономерности перехода между видами управления в ИСУПП

Однако фактическое поведение системы может не соответствовать плановым значениям. Для приведения их в соответствие необходимо разрабатывать и реализовывать диспетчерские УР U_i в зависимости от отклонения фактического значения показателя, т. е. переходить от планового к диспетчерскому управлению. После приведения контролируемого показателя к допустимому диапазону осуществляется обратный переход.

ИСУПП должна эффективно сочетать преимущества плановых и диспетчерских видов управления и обеспечивать своевременный переход от одних к другим в зависимости от информационной осведомленности и эксплуатационной обстановки.

В зависимости от вида управления и типа используемой информации поиск эффективных УР в ИСУПП предложено выполнять с использованием *априорных и апостериорных моделей*. *Априорные модели* – математические модели, используемые в формировании УР, в которых структура и вид обобщенного критерия постулируются в начале, т. е. вся информация, позволяющая сформировать УР, содержится в формальной модели задачи. В ИСУПП априорные модели характерны для решения ЭЗ *планирования (годового, среднесрочного и оперативного)*, в которых формирование УР происходит до начала реализации технологического процесса.

Апостериорные модели управления ПП оперируют информацией, которая становится известной при реализации технологического процесса. Преимущественной областью использования апостериорных моделей следует считать процессы *регулирования и диспетчерского управления*.

Эффективное сочетание априорных и апостериорных моделей при описании технологических процессов в ИСУПП позволяет сформировать завершённый цикл управления и обеспечить адаптивность СУПП к изменениям эксплуатационной обстановки. Выполнена постановка задачи поиска эффективного УР в зависимости от типа решаемых ЭЗ. В качестве инструмента формирования эффективного УР в ИСУПП предложено использовать ГБРЭЗ – *гибридный решатель эксплуатационных задач*, который обеспечивает согласованное использование различных моделей при решении комплексной задачи, а также может быть сам интегрирован в другие ГБРЭЗ. В априорных моделях ГБРЭЗ включает блоки: аппроксимации исходных данных, разработки базового УР и оптимизации. В апостериорных моделях – анализатор, классификатор, коррелятор, экстраполятор, блок выбора (рисунок 3).

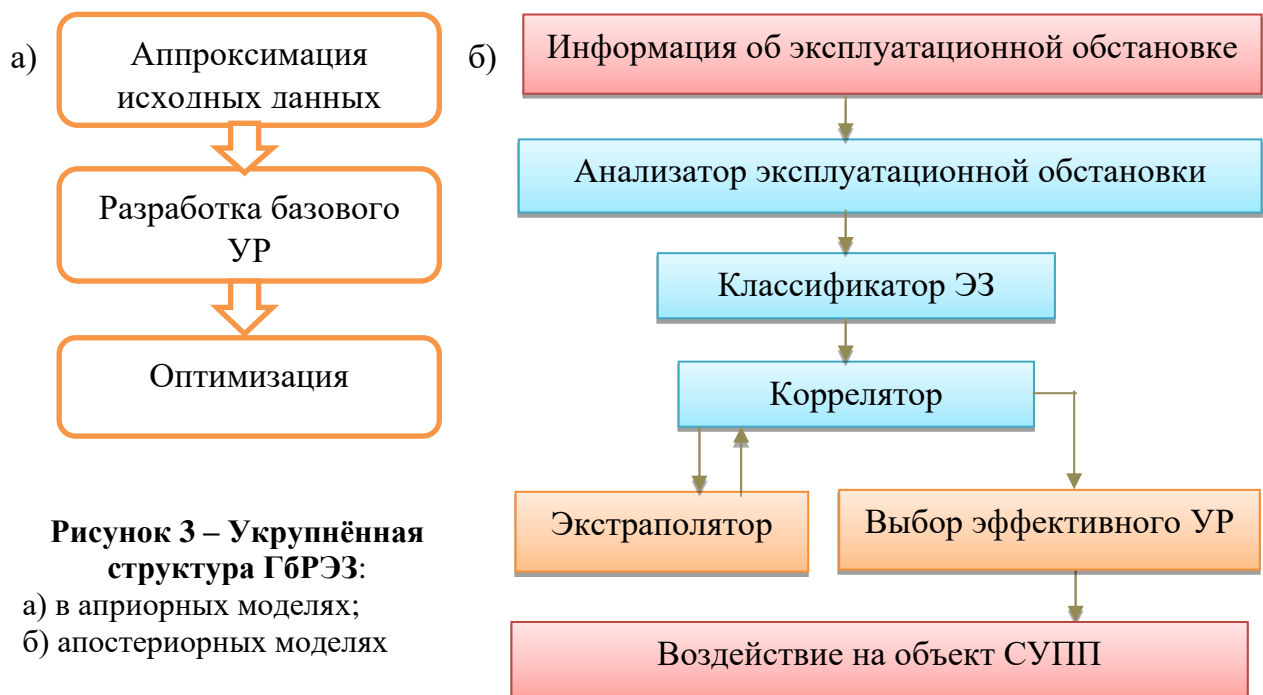


Рисунок 3 – Укрупнённая структура ГБРЭЗ:

- а) в априорных моделях;
б) апостериорных моделях

Оценка эффективности УР будет различаться для планового и оперативного управления. При плановом управлении производится поиск оптимальных УР с целью достижения максимального экономического результата:

$$F_i^{\text{план}}(\bar{a}_i, \bar{b}_i) = \{F_{1_i}(\bar{a}_{1_i}, \bar{b}_{1_i}), \dots, F_{w_i}(\bar{a}_{w_i}, \bar{b}_{w_i}), \dots, F_{y_i}(\bar{a}_{y_i}, \bar{b}_{y_i})\} \rightarrow \max \sum E_{ij}, \quad (1)$$

где F_i – вектор критериев оптимальности, характеризующих качество принятия УР на i -м этапе принятия решения; $i = 1, \dots, j$ – число этапов принятия решения; $\bar{a}_i = \{\bar{a}_{1_i}, \dots, \bar{a}_{p_i}, \dots, \bar{a}_{j_i}\}$ – вектор технических параметров на i -ом этапе; $\bar{b}_i = \{\bar{b}_{1_i}, \dots, \bar{b}_{p_i}, \dots, \bar{b}_{j_i}\}$ – вектор технологических параметров на i -ом этапе; $j = 1, \dots, p$ – число подсистем ИСУПП, участвующих в разработке и реализации УР; $y_i = 1, \dots, w_i$ – число критериев оптимальности на i -ом этапе разработки УР; $\sum E_{ij}$ – функция оценки финансового результата от реализации УР на i -ом этапе в j -ой подсистеме.

При установленных технических и технологических ограничениях: плановый объем перевозок $\Gamma_i^{\text{план}}$ должен соответствовать заявленному грузопотоку $\Gamma_i^{\text{заяв}}$: $\sum \Gamma_i^{\text{план}} = \sum \Gamma_i^{\text{заяв}}$; надежность выполнения планируемых сроков доставки для всех корреспонденций грузопотоков $T_{\text{техн}}$ относительно их нормативных значений $T_{\text{норм}}$ должна стремиться к 1: $P\{T_{\text{техн}} \leq T_{\text{норм}}\} \rightarrow 1$; непревышение потребностей инфраструктурных, путевых ресурсов и перевозочных средств $R_{\text{план}}^z$ относительно их наличного количества $R_{\text{нал}}^z$ (с учетом горизонта планирования решаемой ЭЗ) $\{R_{\text{план}}^z\} \leq \{R_{\text{нал}}^z\}$.

Диспетчерское управление предполагает организацию функционирования системы в соответствии с заранее разработанным планом. При этом оптимизация допускается только в рамках решения конкретной ЭЗ и в пределах объекта управления, при условии, что оптимизированное УР не потребует изменения условий функционирования смежных подсистем. Тогда функция эффективности диспетчерского управления может быть описана в общем виде:

$$F_i^{\text{опер}}(\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i) = \{F_{1_i}(\bar{a}_{1_i}, \bar{b}_{1_i}, \bar{c}_{1_i}), \dots, F_{W_i}(\bar{a}_{W_i}, \bar{b}_{W_i}, \bar{c}_{W_i}), \dots, F_{Y_i}(\bar{a}_{Y_i}, \bar{b}_{Y_i}, \bar{c}_{Y_i})\} \rightarrow F_i^{\text{план}}(\bar{a}_i, \bar{b}_i), \quad (2)$$

где $\bar{c}_i = \{\bar{c}_{1_i}, \dots, \bar{c}_{t_i}, \dots, \bar{c}_{\psi_i}\}$ – вектор неуправляемых параметров на i -ом этапе.

В работе установлены множества параметров $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$ для решения различных типов ЭЗ при различных видах управления. ГБРЭЗ позволяет на основании имеющихся знаний формировать адаптивные УР для объектов управления большего размера, более продолжительных периодов планирования, а также разрабатывать модели для решения новых ЭЗ.

Описание объектов инфраструктуры (ОИ) и перевозочных средств (ОПС) в априорных и апостериорных моделях ИСУПП основывается на семантических и онтологических связях между объектами ПП. Для описания системы предложена **процессно-объектная онтология ПП** как симбиоз онтологического описания, объектно-ориентированного и процессно-ориентированного подходов. Сущность разработанной онтологии применительно к моделированию ПП заключается в систематизации и объединении на полигоне инфраструктуры процессов перемещения (обслуживания) транспортного потока в соответствии с требованиями к параметрам перемещения (обслуживания) заявленного транспортного потока и возможностями инфраструктуры по их пропуску.

На этапе мониторинга осуществляется контроль дислокации каждого ОПС из совокупности объектов подвижного состава $\cup O_{\text{опс}_z}(\Pi)$ и их характеристик (Π) , влияющих на использование ОПС и принятие УР в ИСУПП. Для планирования перемещения ОПС на объекте инфраструктуры различного уровня агрегации требуется определение в реальном масштабе времени дислокации ОПС на ОИ: $O_{\text{опс}_z}(\Pi) : \{(t_{\kappa, i-1}); O_{\text{ои}_j}; S_{\text{ои}_1}\}$, в результате которого

идентифицируется выполнение последней технологической операции с ОПС $k, i-1$, объект размещения (O_{oi_j}), и точка привязки на карте, определяющая координату начала перемещения ОПС на ОИ или в железнодорожной сети (S_{oi_1}).

Процессно-объектная онтология ПП позволяет рассматривать ПП как единую предметную область, обеспечить онтологическое единообразие всех входящих в ИСУПП подсистем, вести скоординированную разработку и последующую эксплуатацию интеллектуальных подсистем и элементов в последовательно-параллельном режиме и силами различных разработчиков.

В результате анализа СУПП и выполненных теоретических исследований разработана функциональная архитектура ИСУПП (рисунок 4). В дальнейшем в работе рассмотрены вопросы построения подсистем Б5, Б6, В1, В3, Г5 (выделены на рисунке 5 синим цветом).

В главе 3 разработаны **теоретические основы формирования априорных моделей интеллектуального управления перевозочным процессом**, а также методики и технологии их применения при решении задач годового, среднесрочного и краткосрочного планирования. Определена обобщенная структура ГБРЭЗ априорного управления по основным технологическим процессам.

Основой планирования ПП является **разработка ГДП**. Установлено, что разрабатываемый на год нормативный ГДП не может быть использован при планировании поездной работы, так как в течение одного месяца разница между минимальными и максимальными размерами движения может достигать на двухпутных участках до 220 %, а на однопутных – свыше 320 %. Участковая скорость для различных ниток НГДП существенно отличается (например, для анализируемых участков в диапазоне от 35 км/ч до 59 км/ч). При этом по исполненному ГДП участковая скорость составляет от 81 до 115 % от нормативной. Таким образом, необходимо формирование адаптивной системы разработки НГДП, которая позволит учитывать требования клиентов и перевозчиков к параметрам системы доставки грузов и более эффективно использовать нитки ГДП с более высокой участковой скоростью.

Предложен метод решения новой ЭЗ – **«разработка многослойного адаптивного ГДП (МАГ)»**. Слой МАГ – это совокупность взаимоувязанных ниток ГДП, разработанных для сходной эксплуатационной обстановки и обеспечивающих пропуск установленного количества поездов.

Предполагается, что при разной эксплуатационной обстановке один и тот же ГДП может использоваться без пересоставления, а наиболее часто используемые расписания обеспечивают более высокую маршрутную (участковую) скорость и меньшее число остановок для обгонов и скрещений поездов. ГБРЭЗ МАГ предусматривает решение следующих ЭЗ (рисунок 5).

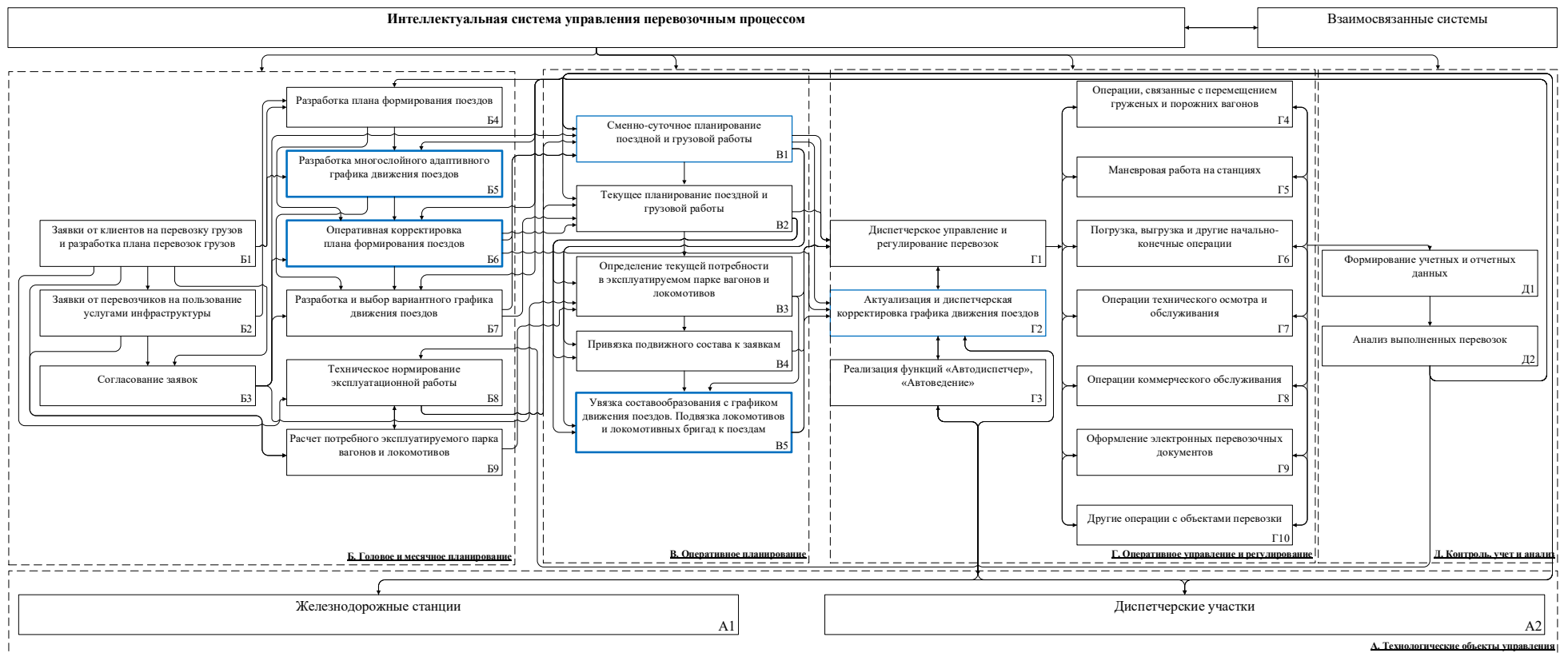


Рисунок 4 – Функциональная архитектура ИСУПП

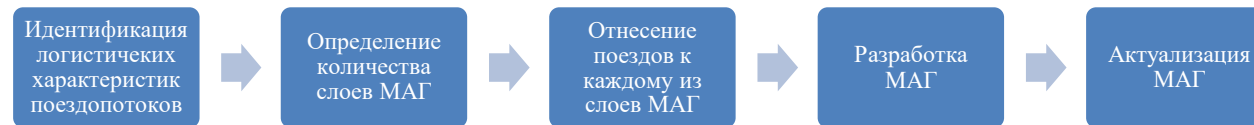


Рисунок 5 – Структура ГБРЭЗ МАГ

При идентификации логистических характеристик вагонопотоков $\{N_{\text{ПФ}}\}$ устанавливается потребность в нитках МАГ:

$$\{N_{\text{ГДП}}\} = \{N_{\text{ПФ}, \varphi(P_1, \dots, P_n)}, \dots, N_k, k_{\text{П}}^{\text{ГДП}}, N((p; q), t_i(Q, m, v, \{P_i^{\text{CB}}\}))\}, \quad (3)$$

где $\varphi(P_1, \dots, P_n)$ – функция, описывающая характеристики объектов инфраструктуры и технологии перевозчика, определяющие параметры следования поезда по маршруту $(p; q)$; N_k – требуемое количество ниток для обеспечения потребности в перевозке; $k_{\text{П}}^{\text{ГДП}}$ – категория нитки графика, определяющая приоритет при разработке ГДП; $t_i(Q, m, v, \{P_i^{\text{CB}}\})$ – продолжительность нахождения поезда в i -й подсистеме маршрута следования, определяемая свойствами поезда: массой Q , длиной m , скоростью v , свойствами перевозимого грузо- и вагонопотока $\{P_i^{\text{CB}}\}$.

В результате сбора заявок на период планирования и анализа выполнения ГДП за предыдущий период формируется массив заявок на предоставление доступа к услугам инфраструктуры

Задачи «*Определение количества слоев МАГ*» и «*отнесение поездных заявок к слоям*» можно отнести к задачам обработки массивов данных Data Mining и последующей их кластеризации. Для кластеризации поездных заявок предлагается использовать модифицированную версию алгоритма CLOPE.

Пусть имеется множество поездных заявок (база транзакций D), состоящая из множества транзакций – поездных заявок $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$. Каждая транзакция предполагает наличие определенных требований к условиям предоставления доступа и может быть описана совокупностью свойств $\{i_1, \dots, i_m\}$. Множество кластеров $\{C_1, \dots, C_k\}$ есть разбиение множества $\{t_1, \dots, t_n\}$, такое, что

$$C_1 \dots C_k = \{t_1, \dots, t_n\} \text{ и } C_i \neq \emptyset \wedge C_i \cap C_j = \emptyset, \text{ для } 1 \leq i, j \leq k. \quad (4), (5)$$

Каждый элемент C_i будет являться кластером (слоем графика); n, m, k – соответственно количество транзакций, количество объектов в базе транзакций и число кластеров. Каждый кластер C имеет следующие характеристики: $D(C)$ – множество уникальных поездных заявок; $Occ(i, C)$ – частота включения поездной заявки i в слой C ; $S(C) = \sum_{i \in D(C)} Occ(i, C) = \sum_{t_i \in C} |t_i|$; $W(C) = |D(C)|$; $H(C) = S(C)/W(C)$. Глобальный критерий качества распределения поездных заявок по слоям может быть выражен в виде функции стоимости $Profit(C)$:

$$Profit(C) = \sum_{i=1}^k |C_i| \sum_{i=1}^k G(C_i) \times |C_i| = \sum_{i=1}^k |C_i| \sum_{i=1}^k W(C_i) r S(C_i) \times |C_i|, \quad (6)$$

где $|C_i|$ – количество поездных заявок в i -м слое; k – количество слоев; r – положительное вещественное число, большее 1.

На основании тестовой выборки поездных заявок выполнен расчет оптимального количества слоев МАГ с использованием улучшенного алгоритма

CLOPE. В качестве приоритетных параметров, для которых весовые коэффициенты w_i принимались равными 2, были выбраны: категория поезда, частота отправления по нитке, постоянное или свободное расписание. Для остальных параметров весовые коэффициенты были приняты равными 1. В результате установлено, что для однопутных участков с уровнем загрузки до 50 % достаточно двух слоев МАГ; для однопутных с уровнем загрузки свыше 50 %, а также для двухпутных участков с загрузкой до 40 % – три слоя; для двухпутных участков с загрузкой свыше 40 % нужно использовать четыре слоя. Формализована *априорная модель разработки МАГ*, которая включает множество базовых правил, правила формирования ГБРЭЗ, информационные процедуры, алгоритмы, стратегию построения ГДП. Априорная модель позволяет разрабатывать базовый вариант ГДП в автоматическом режиме как для двухпутных, так и для однопутных участков, а также повысить маршрутную (участковую) скорость движения поездов ядра не менее, чем на 8 %.

Важной частью СУПП, определяющей ее эффективность, является *система организации вагонопотоков в поезда*. Организация вагонопотоков в поезда является многоуровневой задачей, требующей координации формируемых УР различных объектов полигона и горизонтов планирования: разработка ПФП для полигона (годовое планирование); оперативная корректировка ПФП (среднесрочное планирование); планирование поездообразования (ППО) на полигоне (оперативное планирование); регулирование состава образования на станции (диспетчерское управление).

Применяется параметр оценки ПФП *«устойчивость ПФП»* – свойство ПФП оставаться оптимальным (по установленному критерию) при изменении мощности струй вагонопотоков. Смоделированы варианты изменения мощности струй вагонопотоков и установлено, что в условиях Белорусской железной дороги ПФП является устойчивым при отклонениях фактических мощностей вагонопотока от прогнозных до 20–30 %, (фактические отклонения в среднем составляют 40–60 %, а в отдельных – до 500 %). В связи с этим ключевой задачей ИСУПП предложено считать создание системы разработки и оперативной корректировки ПФП в зависимости от складывающейся на полигоне эксплуатационной обстановки. Данная система является связующей между системой разработки ПФП (на год) и оперативным планированием поездной работы на станции (на сутки).

Априорная модель комплексного планирования поездной работы на полигоне предполагает использование *математического аппарата динамического программирования*. Основой решения задачи служит вариантное прогнозное моделирование ППО. ППО $P(S_i)$ по станции S_i рассчитывается в рамках комплексного ППО на полигоне $P\{S_1 \dots S_X\}$. Он учитывает ППО предыдущих станций полигона (результатов планирования)

и содержит, в свою очередь, исходные данные для ППО на последующих станциях полигона. Разработаны методики и установлены продолжительности периодов планирования поездной работы для различных уровней управления в условиях функционирования ИСУПП (таблица 1).

Таблица 1 – Продолжительности периодов планирования поездной работы

Уровень управления	Функциональное назначение	Период планирования по действующей технологии	Период планирования в условиях функционирования ИСУПП
1 Управление потоками на направлении	Оперативная корректировка ПФП на основе заявок на перевозку	Не регламентирован	5–10 сут.
2 Дорожный уровень управления	Оценка возможности ускоренного продвижения вагонопотоков	1 сут.	3–5 сут.
3 Линейный уровень	Оперативное планирование поездной работы	3–6 ч.	12–24 ч.

С целью повышения эффективности разработки и реализации УР предлагается увеличить иерархический уровень планирования поездообразования с линейного (станционного) до уровня центра управления перевозками дороги (ЦУП) и разрабатывать *комплексные ППО* для железнодорожного полигона. Рассчитано, что при реализации предложенной методологии в ИСУПП периодичность оперативной корректировки ПФП должна составлять 5–15 суток, период планирования поездообразования на дорожном уровне увеличится с одних до 3–5 суток, текущего планирования – с 3–6 до 12–24 часов, а также появляется возможность формирования плана поездной работы для полигона дороги, включающего до 30 технических станций.

Определено, что **система сменно-суточного планирования работы дороги** (ССП) является подсистемой СУПП, связывающей долгосрочное и среднесрочное планирование с непосредственным управлением операциями перевозочного процесса. В существующей ССП грузовой работы имеется значительная алеаторная неопределенность: к значениям плановых заявок на погрузку добавляются внеплановые заявки (по отдельным клиентам до 57 % от общего плана погрузки); определенное количество направляемых порожних вагонов забраковывается грузоотправителем по причине непригодности под погрузку конкретного груза (до 12 % от общего количества порожних вагонов); направляемый под выгрузку вагон может быть задержан в пути следования (до 1,5 %); некоторые вагоны могут быть переадресованы в процессе их следования на станцию назначения (до 1,2 %).

Предложено рассматривать разработку ССП как стохастическую транспортную задачу, в которой предполагается, что заявки на погрузку

$b_j = b_j(\omega)$ на j -й станции погрузки – случайная величина. Представлена математическая постановка регулирования порожних вагонов.

Прогнозирование грузовой работы дороги предлагается выполнять с использованием *алгоритмов машинного обучения, основанных на регрессионном анализе данных*. Задачей прогнозирования является уточнение числового значения выгрузки вагонов на станции S_i по данным о состоянии эксплуатационной обстановки и выгрузки на полигоне управление. Задачей функционирования алгоритма обучения является определение функции $f: R_n \rightarrow R$. Мер качества P определяется следующими выражениями:

$$\sum |\Delta U_{\text{погр}}| = \sum |U_{\text{факт}}^i - U_{\text{план}}^i - U_{\text{внеплан}}^i| \rightarrow 0; \quad (7)$$

$$\sum |\Delta U_{\text{выгр}}| = \sum |U_{\text{в.факт}}^i - U_{\text{в.план}}^i| \rightarrow 0, \quad (8)$$

т.е. минимизация отклонения суммы плановой $U_{\text{план}}^i$ и внеплановой погрузки $U_{\text{внеплан}}^i$, а также плановой выгрузки $U_{\text{в.план}}^i$ от их фактических значений $U_{\text{факт}}^i$, $U_{\text{в.факт}}^i$ за плановый период по каждому объекту управления.

Цель – построить модель, которая на основании данных об эксплуатационной обстановке на полигоне $x \in R_n$, определяет множество вагонов, подлежащих выгрузке в плановый период $y \in R$. Результатом линейной регрессии является линейная функция входных данных.

Обозначим y' – значение y , предсказанное моделью. Определим результат модели в виде

$$y' = w^T x, \quad (9)$$

где $w \in R^n$ – вектор весов параметров, характеризующих эксплуатационную обстановку на полигоне.

Установлено, что *значимыми параметрами x_n* , влияющими на план погрузки, являются количество поданных заявок на погрузку в установленный период; грузоотправитель; груз; станция отправления; день недели; месяц года; избыток / недостаток порожних вагонов на полигоне. Параметры x_v , влияющие на план выгрузки: станция / участок дислокации отправки; станция назначения; род подвижного состава; груз; грузополучатель; день недели; месяц года; избыток / недостаток порожних вагонов на полигоне; коэффициент загрузки участков на маршруте следования; наличие «окон» на маршруте следования от станции/участка дислокации до станции назначения.

Оценку качества модели предлагается выполнять путем вычисления среднеквадратической ошибки модели на тестовом наборе MSE_{test} . Разработан алгоритм машинного обучения, который улучшает веса w таким образом, что MSE_{test} уменьшается по мере того, как алгоритм получает новый опыт.

Количественное выражение емкости модели предлагается оценивать при помощи размерности Вапника – Червоненкиса (VC-размерность. На основании

накопленных в автоматизированной системе сменно-суточного планирования грузовой работы (АС ССП) данных о прогнозных и фактических значениях погрузки и выгрузки за 2019–2020 годы установлено, что минимальная MSE_{test} наблюдается при величине выборки от 50 до 70 предшествующих плановому периодов суток и составляет от 3 до 7 %. Дополнение обучающей выборки данными за аналогичный месяц предыдущего года увеличивает обучающую выборку до 80–100 значений. При этом MSE_{test} снижается до 2,5–5 %.

Разработаны методики и технологии ССП погрузки-выгрузки. Процедуры разработки, согласования, корректировки и утверждения ССП предложено рассматривать как функции бизнес-процесса. Применение предложенных моделей, методов и технологий позволило впервые сформировать единый пономерной пооперационный план грузовой работы для всего полигона железной дороги (не менее 200 станций, открытых для грузовых операций) на период не менее одних суток и обеспечить высокую точность разрабатываемых планов погрузки-выгрузки (до 91–94 % по сравнению с 65–75 % при традиционных технологиях).

В главе 4 разработаны **теоретические основы формирования апостериорных моделей ИСУПП**, а также методики и технологии их применения при решении задач планирования. Необходимость использования апостериорных моделей определяется тем, что сформированные в априорных моделях УР не могут быть реализованы, так как изменились условия функционирования; априорные модели не позволили получить УР с необходимым уровнем детализации; при разработке априорных планов использовалась информация со значительной величиной погрешности, в связи с чем разработанные УР требуют уточнений.

Одной из важнейших задач СУПП, требующих использования апостериорных моделей, предложено считать **диспетчерское управление поездной работой (ДУПП)**. Анализ поездной работы на Белорусской железной дороге позволил установить, что отклонения времени следования специализированных контейнерных поездов от установленного расписания составляют до 3,5 часов как в сторону опоздания, так и до 1,5 часов в сторону раннего проследования. 40,3 % поездов отправляется позже установленного графиком времени на 25 минут и более. Подобные проблемы характерны и для зарубежных железных дорог. В связи с этим ДУПП остается неотъемлемой составляющей СУПП. ДУПП в ИСУПП в общем виде включает решение двух типов ЭЗ: актуализация ГДП в соответствии с эксплуатационной обстановкой и диспетчерская корректировка.

Технология актуализации нормативного ГДП предполагает различные сценарии организации поездной работы на железнодорожных полигонах в зависимости от эксплуатационной нагрузки, наличия перевозочных ресурсов,

состояния инфраструктуры. Переход между сценариями заключается в выборе для конкретного периода времени соответствующих слоев ГДП и отдельных ниток поездов. Важнейшей интеллектуальной функцией ДУПП следует считать выбор алгоритма диспетчерской корректировки в зависимости от складывающейся поездной обстановки. Апостериорная модель **интеллектуальной диспетчерской корректировки ГДП** предполагает решение *задачи ситуационного моделирования*: идентификация отклонений фактической нитки поезда от прогнозной; классифицирование отклонений; выбор алгоритма и ликвидация отклонений.

С целью упорядочивания множества возможных вариантов диспетчерских корректировок и выбора рационального предлагается формирование *дерева решений ГДП*.

Цель индукции дерева решений ГДП – определить для любой эксплуатационной обстановки A_j алгоритм диспетчерской корректировки C_i .

Отличительной особенностью ГДП от традиционных объектов классификации является его непрерывное изменение во времени. В связи с этим предлагается рассматривать множество параметров, характеризующих нитки ГДП, как темпоральные данные. Тогда задача обобщения и классификации эксплуатационных обстановок формулируется следующим образом. Пусть график исполненного движения (ГИД) строится на основании данных об изменении состояний блок-участков q при проследовании по ним поездов. Изменение состояний происходит в некоторые дискретные моменты времени: $t = 0, 1, 2, 3, \dots, r$. Тогда поездную обстановку на полигоне управления в некоторый момент времени i можно представить в виде вектора

$$S_i = \langle x_1(t = i), x_2(t = i), \dots, x_q(t = i), t = i \rangle. \quad (11)$$

Для того, чтобы проследить динамику продвижения поездов по участку, их возможные отклонения от плановых ниток ГДП, динамику изменения отклонений (отставание или нагон), необходимо рассмотреть упорядоченное множество таких векторов, полученных на конечном временном интервале (t_i, t_{i+r-1}) , $r > 1$.

На основании данных о поездах ГИД и плановом ГДП формируется расчетная поездная обстановка (место дислокации каждого из поездов, находящихся в движении, в каждый момент планового периода). Расчетное значение места нахождения поезда на момент времени t_{i+r+v} определяется как

$$x_v(t = i + v + r) = x_q(t = i + v) + \Delta x_{r-q}^{\text{прогноз}} (\Delta t = r - q). \quad (12)$$

Тогда эксплуатационная обстановка на полигоне будет характеризоваться совокупностью массивов информации об исполненной (зеленая область), плановой (синяя) и прогнозной (желтая) поездных обстановках (таблица 2).

Таблица 2 – Динамический объект обобщения эксплуатационной обстановки

	Поезд 1	Поезд 1 (план)	Поезд 2	Поезд 2 (план)	...	Поезд q	Поезд q (план)	Время (t)
S_i	ГИД	ПГДП						
S_{i+1}								
S_{i+2}								
...								
S_{i+v}								
...	Прогноз							
S_{i+r}								

Ключевым отличием интеллектуальной диспетчерской корректировки от традиционных подходов, является *оперирование резервами*, имеющимися в перегонных временах хода, интервалах следования между поездами и в станционных интервалах. Разработано семейство алгоритмов, которые обеспечивают диспетчерскую корректировку ГДП при различных видах отклонений фактических траекторий движения поездов от прогнозных на основании адаптивного набора критериев.

Путем моделирования в программной среде АС «Графист» установлено, что интеллектуальная диспетчерская корректировка ГДП за счет взаимоувязанного изменения ниток ГДП позволяет компенсировать отклонения в ГДП на однопутных участках до 11 % от суммарного времени хода по участку, а на двухпутных – до 7 % и обеспечивать своевременное отправление и прибытие всех поездов по начально-конечным станциям участка. Использование разработанных алгоритмов и интеллектуальных технологий позволяет формировать прогнозный ГДП на 24 часа (при существующей технологии 3–6 часов).

Диспетчерское управление и регулирование станционной работой обусловлено существенной неравномерностью и неопределенностью транспортных потоков, предъявляемых к обработке на станциях. В диссертации разработана методология *решения новой ЭЗ – УСОГДП*, которая в отличие от существующих, предполагает нахождение гармонизированных планов работы не для пары «станция – железнодорожный участок», а для всего полигона управления ЦУП. Для формализации процесса планирования предлагается использовать *продукционные правила*. Построена апостериорная продукционная модель УСОГДП (рисунок 6) и определена структура ГБРЭЗ.

Для реализации задач моделирования весь перерабатываемый на станциях поездопоток идентифицируется с целью определения соответствующей технологии переработки (сценария поведения системы). Перечень фиксируемых в модели событий определен в соответствии с требованиями вагонной модели дороги (см. рисунок 6). ГБРЭЗ УСОГДП предполагает как реализацию расчетно-информационных процедур, так и оптимизацию разработанных планов.

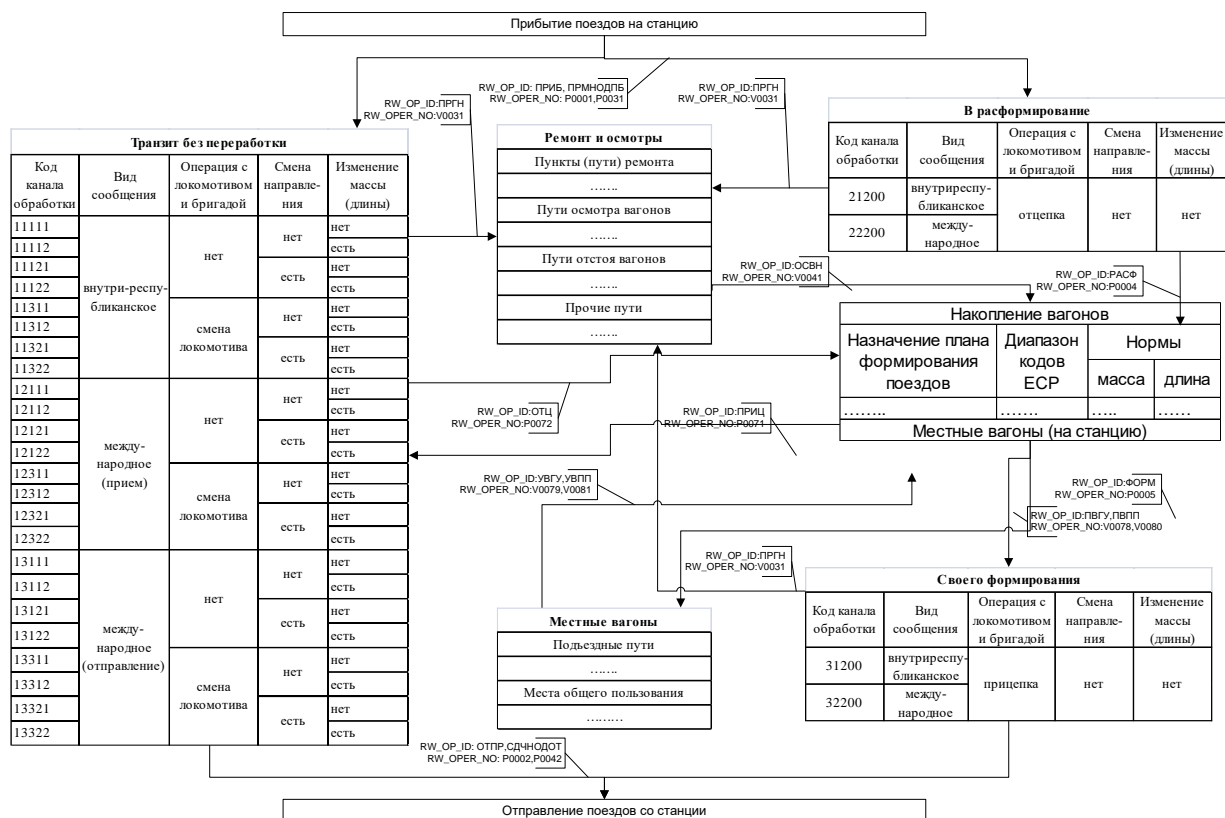


Рисунок 6 – Апостериорная производственная модель УСОГДП

В зависимости от технологической линии обработки ГБРЭЗ может включать решение следующих ЭЗ: определение продолжительности нахождения состава в подсистеме; определение готовности к отправлению транзитного поезда; разложение составов по назначениям ПФП; планирование процесса накопления вагонов на состав поезда; определение времени включения местных и иных вагонов в процесс накопления вагонов и формирование плана обработки составов и местных вагонов; обеспечение сформированных составов поездными локомотивами и локомотивными бригадами; формирование расписания готовности составов к отправлению со станций составообразования. Для каждой ЭЗ определены методики решения и алгоритмы.

Формирование УР в УСОГДП предполагает определение не только количественных параметров планов, но и временных значений. Для решения этой задачи необходимо спрогнозировать *продолжительность выполнения технологической операции* (ПВТО) (обработка поезда, погрузка вагона, расформирование состава и др.). Для определения ПВТО предложено использовать разработанный Л.П. Тулуповым ситуационно-эвристический метод планирования (СЭМП), который дополнен и усовершенствован оригинальным математическим аппаратом теории нейронных сетей.

Количественные характеристики ситуаций и соответствующие им отчетные значения показателя составляют строку опыта. Строки опыта за z предплановых периодов образуют массив опыта Z (таблица 3).

Таблица 3 – Массив опыта Z

Строка опыта	Факторы		Выполненные показатели
	основные	дополнительные	
1	$\Phi_1^1 \dots \Phi_i^1 \dots \Phi_I^1$	$\Phi_1^{A1} \dots \Phi_v^{A1} \dots \Phi_\theta^{A1}$	$X^1 X_1^1 \dots X_I^1 \dots X_L^1$
...
j	$\Phi_1^j \dots \Phi_i^j \dots \Phi_I^j$	$\Phi_1^{Aj} \dots \Phi_v^{Aj} \dots \Phi_\theta^{Aj}$	$X^j X_1^j \dots X_I^j \dots X_L^j$
...
z	$\Phi_1^z \dots \Phi_i^z \dots \Phi_I^z$	$\Phi_1^{Az} \dots \Phi_v^{Az} \dots \Phi_\theta^{Az}$	$X^z X_1^z \dots X_I^z \dots X_L^z$
z+1	$\Phi_1^{z+1} \dots \Phi_i^{z+1} \dots \Phi_I^{z+1}$	$\Phi_1^{A(z+1)} \dots \Phi_v^{A(z+1)} \dots \Phi_\theta^{A(z+1)}$???

Принимается, что ПВТО зависит от основных (Φ_i) и дополнительных (Φ_v) факторов, где $i = 1, 2, \dots, I; v = 1, 2, \dots, \theta$. На начало расчета значения факторов известны и в совокупности составляют исходную ситуацию ($\Phi_i^{z+1}, \Phi_v^{z+1}$). Под прогнозным значением в УСОГДП понимается установленную ПВТО для эксплуатационной обстановки, которая сложилась на плановый период $\tilde{X}_1^{z+1}, \tilde{X}_2^{z+1}, \dots, \tilde{X}_i^{z+1}, \dots, \tilde{X}_I^{z+1}$. Обозначим всю их совокупность через (\tilde{X}_I^{z+1}) , причем величина $\tilde{X}^{z+1} = \sum_I \tilde{X}_I^{z+1}$ имеет физический смысл, т. е. группа прогнозируемых показателей однородна.

Методика прогнозирования ПВТО предусматривает три этапа: подготовительный, оперативный и самообучение. При разработке архитектуры нейронной сети за основу взята простейшая модель однослойной искусственной нейронной сети (ИНС), включающая совокупность из N нейронов и последовательно расположенные сумматоры со встроенными блоками функций активации. Апробация методики выполнена на примере нормирования времени роспуска состава с горки ($t_{\text{рос}}$). Выполнена программная реализация и установлено, что использование ИНС в УСОГДП повышает точность планирования до 25 % по сравнению с существующими методами, а отклонения свыше 10 % процентов от фактических значений наблюдаются менее, чем в 14 % случаев.

Разработанная методология УСОГДП впервые позволила разрабатывать совместные пономерные пооперационные планы поездной и станционной работы для полигонов, включающих до 100 поездо-участков и до 30 технических станций.

В главе 5 приведено описание практической реализации научных результатов. Реализация ИСУПП на железной дороге позволяет сформировать ЕТПП. Для этих целей разработана Концепция формирования ЕТПП в ИСУПП. В рамках концепции определены, цели, функции задачи, приоритеты, ограничения, принципы формирования ЕТПП. Регламентирована структура ЕТПП в ИСУПП, которая включает функциональные и технологические подсистемы. Установлены этапность разработки и целевые задачи по каждому этапу.

В настоящее время на Белорусской железной дороге реализованы или находятся в стадии реализации следующие функциональные модули ИСУПП. Разработанные в диссертационном исследовании интеллектуальные методы, модели и технологии разработки ГДП реализованы в АС «Графист» (рисунок 7), которая находится в промышленной эксплуатации в ЦУП.

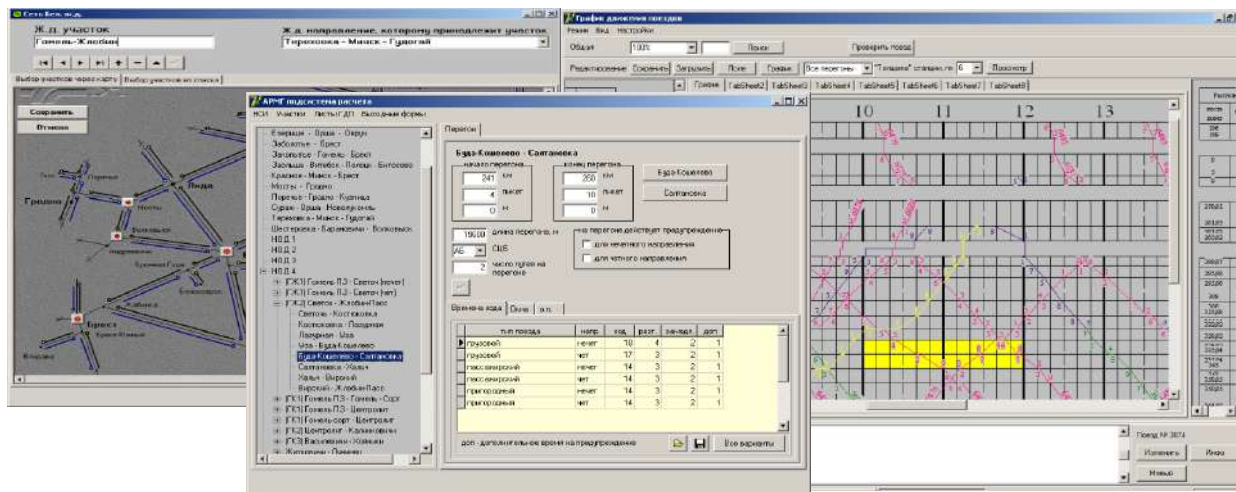


Рисунок 7 – Модули автоматического построения и корректировки ГДП в АС «Графист»

Интеллектуальный алгоритм разработки ГДП построен таким образом, чтобы в зависимости от взаимного расположения поездов в ГДП и их категорий определять, какой из станционных интервалов в каждом конкретном случае должен быть использован. Решение задачи предусматривается на полигоне любой протяженности и конфигурации. Интеллектуализация функций разработки ГДП позволила снизить загрузку разработчиков ГДП на 20–30 %, на отдельных участках повысить участковую скорость на 7–11,5 % и снизить удельные энергетические затраты на тягу на 3–6 %.

Разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию АС ССП, которая обеспечивает сквозное планирование грузовой работы железнодорожного транспорта для всего полигона дороги, всех уровней управления (дорожного, отделенческого, линейного) и всех периодов ССП. В АС ССП (рисунок 8) реализована функция интеллектуальной привязки вагонов к заявкам (с учетом их состояния, дислокации, категории годности, собственника и других признаков), а также другие элементы интеллектуальных технологий: прогнозирование времени поступления вагонов на станцию, корректировка плановых показателей на вторую смену в зависимости от их реализации за первую; формирование планов с учетом директивного установления повышенного задания на выполнение погрузки и др. По итогам эксплуатации АС ССП установлено, что за счет повышения точности планирования доля внеплановой погрузки сократилась на 20–30 %.

Впервые реализована система пономерного пооперационного планирования грузовой работы с высокой точностью планирования (91–94 %).

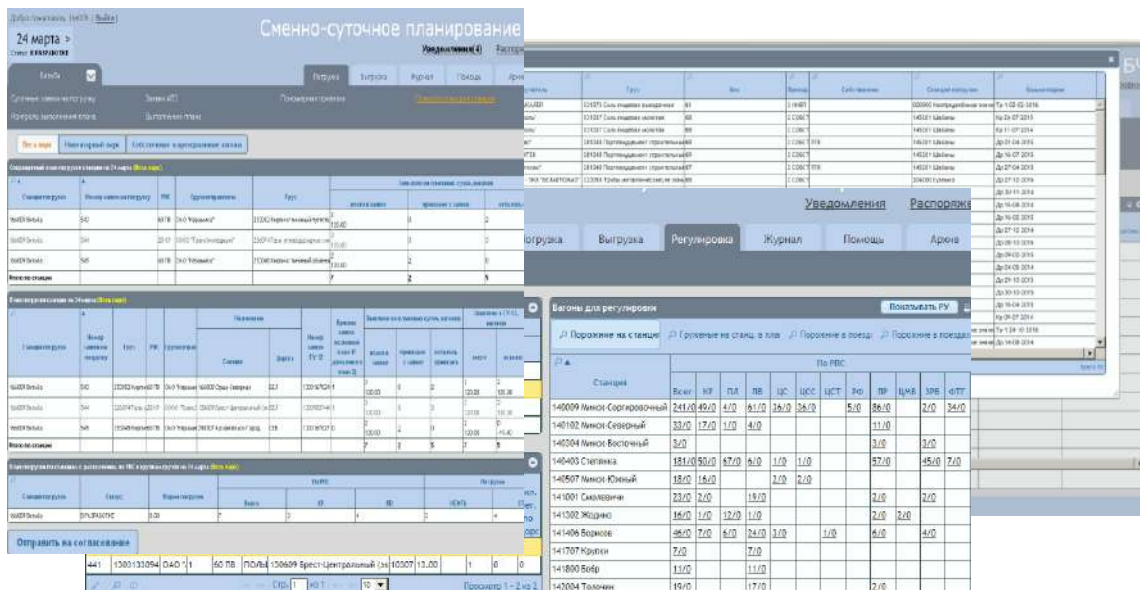


Рисунок 8 – Модули интеллектуального планирования, привязки заявок к вагонам и контроля выполнения планов в АС ССП

Использование интеллектуальных технологий в ССП в совокупности позволило повысить коэффициент сдвоенных операций на 8–12 %; сократить простой местного вагона под одной грузовой операцией на отдельных грузовых станциях на 6–9 %. Установлено, что проект обеспечивает порядка 1,6 млн дол. чистого экономического эффекта в год.

Разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию автоматизированная система УСОГДП (рисунок 9).

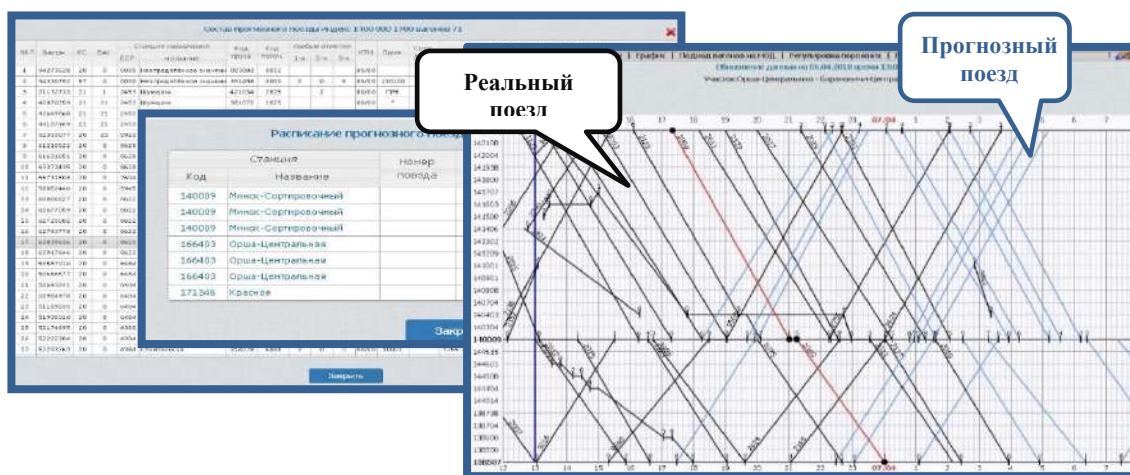


Рисунок 9 – Модули интеллектуального планирования состава образования и прогнозного ГДП в УСОГДП

Интеллектуальным решением УСОГДП является сокращенный ПГДП, в котором путем многофакторного отбора выполняется привязка всех участвующих в поездообразовании поездов к ниткам ПГДП. Использование

УСОГДП позволило повысить эффективность диспетчерского управления за счет повышения достоверности и автоматизации разработки ПГДП с дальнейшим его использованием в системе автоматизированного управления движением поездов (автодиспетчер), что в свою очередь позволило укрупнить полигоны управления движением поездов в 1,3–1,5 раза; сократить время нахождения поездов и локомотивов на технических станциях за счет сокращения в пределах от 15 до 20 процентов времени ожидания выполнения технологических операций; обеспечить согласование ПГДП с поездной и локомотивной моделью дороги, сократив непроизводительные потери локомотивных бригад до 20 %.

Разработана проектная документация на ряд других подсистем ИСУПП.

В главе 6 рассмотрены этапность и эффективность построения интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге.

На основании результатов оценки экономических показателей эффективности внедрения системы предлагается следующая этапность построения ИСУПП: 1) создание цифровой модели перевозочного процесса; 2) внедрение систем поддержки принятия управленческих решений, основанный на использовании априорных моделей ПП и модулей технико-экономической оценки УР; 3) внедрение интеллектуальных подсистем основанное на использовании апостериорных моделей ПП, и реализация автоматического управления объектами перевозочного процесса.

Выполнена оценка системных свойств ИСУПП для исходного состояния (до начала внедрения рассмотренных в работе систем) установленных этапов. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные параметры и оценочные характеристики системных свойств ИСУПП

Параметр	Обозначение	Вариант организационной структуры			
		исходный	1-й этап	2 -й этап	3-й этап
Число вершин структуры	n	109	104	50	47
Связи вершин	$\sum a_{ij}$	1352	1132	442	414
Максимальный диаметр структуры	d_{ij}	7	7	6	6
Степень связности элементов	p_i	ДГП-20 ДНЦ-25 ДСЦ-14	ДГП-18 ДНЦ-22 ДСЦ-13	ДГП-17 ДНЦ-20 ДСЦ-8	ДГП-17 ДНЦ-20 ДСЦ-7
Структурная избыточность	S_n	5,26	4,50	3,51	3,50
Неравномерность распределения связей	ε^2	7,19	6,5	5,12	4,17
Структурная компактность	S_k	0,78	0,57	0,47	0,5
Максимальное значение разброса структуры	z_i	71	70	37	37
Степень централизации	δ	0,47	0,52	0,66	0,75

Дальнейшее повышение уровня централизации и снижение структурной избыточности может быть достигнуто только при интеллектуализации функций смежных подсистем железнодорожного транспорта. В результате доказано, что качество управления ПП зависит как от структуры управления, так и от уровня интеллектуализации решаемых задач. По результатам анализа сформированы рекомендации по развитию СУПП.

В результате математического моделирования установлено, что внедрение ИСУПП позволяет существенно повысить надежность СУПП. При решении задач оперативного управления в СУПП переход от информационных к интеллектуальным системам позволяет снизить потенциальные потери железной дороги на 30–55 % за счет наличия предварительно сформированных текущих планов и возможности использования в период сбоев прогнозной информации.

При решении задач оперативного планирования ИСУПП позволяет снизить потенциальные потери на 4,5–7,5 раз (при периоде сбоев до 24 часов) за счет увеличения глубины планирования (рисунок 10).

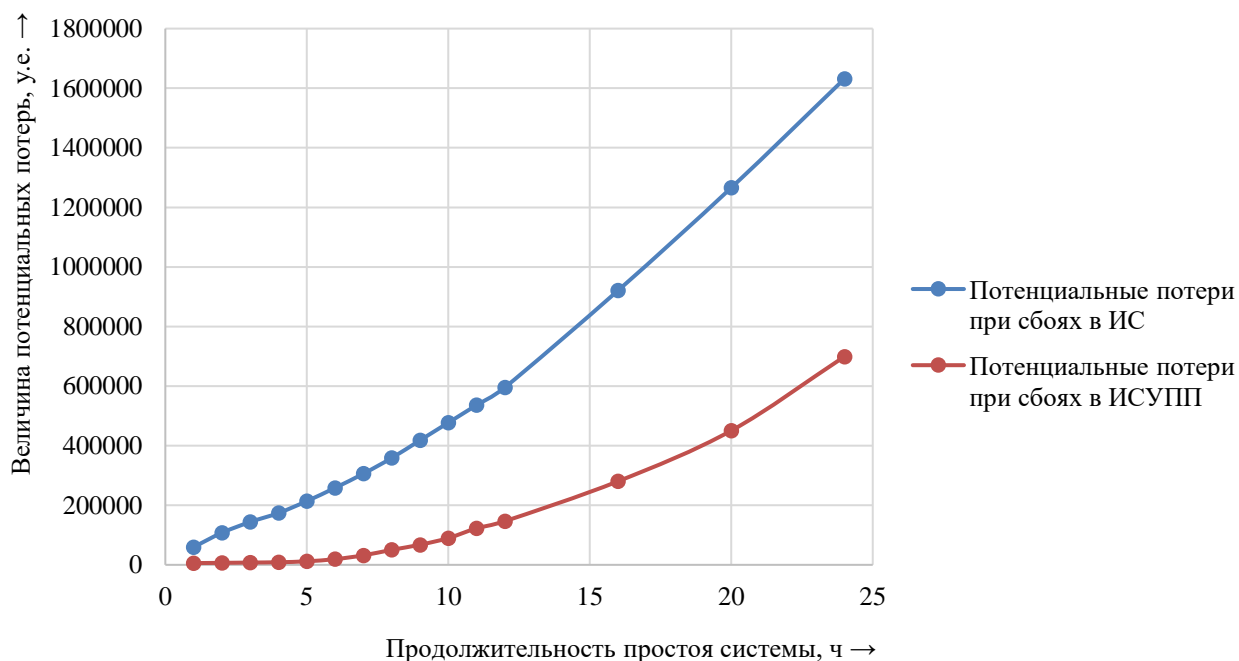


Рисунок 10 – Сравнительный анализ потенциальных потерь, возникающих при отказах в действующих ИС и в ИСУПП

На основе расчета денежных потоков установлены экономические показатели внедрения ИСУПП: чистый дисконтированный доход по истечении 10 лет – около 20 млн руб.; дисконтированный срок окупаемости – 3,1 года с момента начала инвестиций; валовая прибыль – около 5 млн руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1 Выполнен системный анализ проблемы управления перевозочным процессом. Определены архитектурные и функциональные недостатки существующих ИС в СУПП. Определены специфические свойства СУПП, которые не позволяют использовать в полном объеме накопленный в других отраслях и других железнодорожных транспортных системах опыт интеллектуализации управления при построении ИСУПП. Предложено в качестве основы цифровой трансформации железнодорожного транспорта рассматривать ИСУПП [1, 12, 15, 60, 67, 66, 82].

2 Разработана методология формирования ИСУПП. Установлены закономерности переходов между видами управления и сформированы риск-профили различных видов управления в СУПП. Впервые предложено для описания ЭЗ планирования использовать априорные модели, а для диспетчерского управления – апостериорные модели. Введено понятие ГБРЭЗ как ключевого элемента ИСУПП, позволяющего формировать комплексные УР. Использование ГБРЭЗ дало возможность сформулировать и решить новые ЭЗ, в том числе, разработка и актуализация МАГ, УСОГДП, интеллектуальная диспетчерская корректировка ГДП [1, 14, 19, 23, 25, 26, 36, 56, 57, 59, 70, 73, 74].

3 Разработаны принципы формирования процессно-объектной онтологии ПП, реализация которой позволяет рассматривать ПП как единую предметную область, обеспечить онтологическое единообразие всех входящих в ИСУПП подсистем, вести скоординированную разработку и последующую эксплуатацию интеллектуальных подсистем и элементов [1, 18, 28, 61, 62, 66, 75, 79, 87].

4 Разработаны априорная модель, метод и методика решения новой эксплуатационной задачи «Формирование и актуализации МАГ», что дополняет существующую теорию разработки ГДП. Разработан метод определения количества слоев МАГ и распределения поездных заявок между слоями с использованием улучшенного алгоритма CLOPE. Установлено, что для однопутных участков с уровнем загрузки до 50 % достаточно двух слоев МАГ; для однопутных с уровнем загрузки свыше 50 %, а также для двухпутных участков с загрузкой до 40 % – трех слоев; для двухпутных участков с загрузкой свыше 40 % рекомендуется использовать четыре слоя. Полученные результаты позволяют в автоматическом режиме разрабатывать адаптивные ГДП, а также повысить участковую скорость движения поездов ядра не менее, чем на 8 % [1, 3, 20, 27, 72, 74, 81].

5 Разработана новая методология интеллектуального планирования поездной работы. Предложено в дополнение к разработке годового ПФП выполнять его актуализацию в зависимости от складывающейся

эксплуатационной обстановки, повысить уровень принятия решений при ППО со станционного до дорожного, а также устанавливать в планах не только количественные, но и временные параметры процессов. При реализации предложенной методологии в ИСУПП периодичность оперативной корректировки ПФП должна составлять 5–15 суток, период ППО на дорожном уровне увеличится с одних до 3–5 суток, текущего планирования – с 3–6 до 12–24 часов, а также появляется возможность формирования гармонизированного плана поездной работы для полигона железной дороги, включающего до 30 технических станций. Установлено, что интеллектуальное комплексное ППО позволит сократить вагоно-часы простоя на отдельных технических станциях на 6–9 %; снизить пробег поездных локомотивов на 5–8%; снизить затраты на маневровую работы на формирование поездов на 8–11%; снизить задержки поездов в ожидании отправления на 20–25% и увеличить провозную способность отдельных участков на 15–20 % [1, 2–6, 9, 10, 24, 25, 34–39, 51, 85, 90–96].

6 Предложен новый метод планирования поездной и грузовой работы, который за счет использования априорных моделей, сценарного описания бизнес-процессов планирования предусматривает перенос процедуры разработки конечного УР со станционного на дорожный уровень и впервые позволяет сформировать единый пономерный пооперационный план грузовой работы для всего полигона железной дороги (не менее 200 станций, открытых для грузовых операций) на период не менее одних суток. Предложена методика уточнения параметров грузовой работы с использованием алгоритмов машинного обучения. Использование метода и методики впервые обеспечило пономерное пооперационное планирование грузовой работы на дорожном уровне с высокой точностью (до 91–94 % по сравнению с 65–75 % при традиционных технологиях). Построена априорная модель планирования, регламентированы информационные и функциональные взаимосвязи между различными бизнес-процессами, что в совокупности обеспечило снижение доли внеплановой погрузки на 20–30 %, повысило коэффициент сдвоенных операций на 8–12 %, сократило простой местного вагона под одной грузовой операцией на отдельных станциях на 6–9% [1, 17, 24, 32, 52, 55, 58, 76, 83, 89].

7 Разработаны апостериорные модели и семейство алгоритмов интеллектуальной диспетчерской корректировки ГДП. Предложено рассматривать множество параметров, характеризующих нитки ГДП, как темпоральные данные; формализовано описание эксплуатационной обстановки; сформулирована задача обобщения и классификации эксплуатационных обстановок при наличии темпоральных данных. Доказано, что интеллектуальная диспетчерская корректировка ГДП на основании адаптивного набора критериев позволяет компенсировать отклонения в ГДП

на однопутных участках до 11 % от времени хода поезда по участку, а на двухпутных – до 7 %. Использование интеллектуальных технологий формирования прогнозного ГДП позволяет увеличить период текущего планирования поездной работы с 3–6 часов (при существующей технологии) до 24 часов [1, 7, 8, 30, 40–44, 48–51, 59, 60, 97].

8 Разработана методология решения новой эксплуатационной задачи – УСОГДП, которая, в отличие от существующих, предполагает нахождение гармонизированных планов работы не для пары «станция – железнодорожный участок», а для всего полигона управления ЦУП. Разработанная методология впервые позволила исключить технологические разрывы при информационном обмене между ЦУП и техническими станциями и разрабатывать совместные планы поездной и станционной работы для полигонов, включающих до 100 поездо-участков и до 30 технических станций. Построена апостериорная модель УСОГДП, которая за счет использования математического аппарата ситуационного моделирования и ИНС позволяет разрабатывать адаптивные планы составообразования в зависимости от эксплуатационной обстановки, обеспечить повышение точности планирования до 25 % по сравнению с существующими методами и укрупнить полигоны управления движением поездов в 1,3–1,5 раза; сократить время нахождения поездов и локомотивов на технических станциях за счет сокращения в пределах от 15 до 20 % времени ожидания выполнения технологических операций; обеспечить согласование ПГДП с поездной и локомотивной моделью дороги, сократив непроизводительные потери локомотивных бригад до 20 % [1, 13, 22, 32, 63, 68, 76, 83, 84, 98].

9 Разработана концепция формирования ЕТПП в ИСУПП, в которой регламентированы цели, функции, задачи, приоритеты, ограничения, принципы интеллектуального управления, структура, этапность разработки и целевые задачи по каждому этапу. Особенностью ЕТПП является сочетание централизованного управления СУПП с локальным управлением объектами, что позволяет обеспечить автономность при решении локальных ЭЗ с возможностью оптимизационного управления системой в целом [1, 21, 31, 33, 49, 51, 54, 69, 71, 73, 77, 78].

10 Обоснована этапность построения ИСУПП, которая включает: 1) создание цифровой модели перевозочного процесса; 2) внедрение систем поддержки принятия управленческих решений, основанных на использовании априорных моделей ПП и модулей технико-экономической оценки УР; 3) внедрение интеллектуальных подсистем, основанных на использовании апостериорных моделей ПП, и реализация автоматического управления объектами перевозочного процесса. Выполнена оценка параметров структуры, в результате которой установлено, что по анализируемым функциям уровень централизации системы при интеллектуальном управлении увеличивается с 0,47

до 0,75; структурная избыточность снижается с 5,26 до 3,50; неравномерность распределения связей снижается с 7,19 до 4,17. По результатам анализа критериев эффективности ИСУПП разработаны рекомендации по повышению качества управления ПП [1, 11, 33, 45, 47, 53].

11 В результате математического моделирования установлено, что при решении задач оперативного управления в СУПП переход от информационных к интеллектуальным системам позволяет снизить потенциальные потери железной дороги на 30–55 % за счет наличия предварительно сформированных текущих планов и возможности использования в период сбоев прогнозной информации, а при решении задач оперативного планирования – в 4,5–7,5 раз (при периодах сбоев до 24 часов) за счет увеличения глубины планирования. На основе расчета денежных потоков установлены экономические показатели внедрения ИСУПП: чистый дисконтированный доход по истечении 10 лет – около 20 млн руб.; дисконтированный срок окупаемости – 3,1 года с момента начала инвестиций; валовая прибыль – около 5 млн руб. в год [16, 46, 86].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационного исследования имеют практическую направленность и нашли применение в СУПП Белорусской железной дороги. Автор является непосредственным разработчиком следующих стратегических и нормативных документов: Концепция развития логистической системы Республики Беларусь на период до 2030 г.; СТП БЧ 15.114-2018 «Порядок разработки графика движения поездов на Белорусской железной дороге»; СТП 09150.05.090-2008 «Типовой технологический процесс развоза вагонов с местным грузом на отделении Белорусской железной дороги», СТП БЧ 15.315-2015 «Порядок расчета станционных и межпоездных интервалов на Белорусской железной дороге»; СТП БЧ 15.073-2017 «Порядок оперативного планирования поездной и грузовой работы Белорусской железной дороги, составления и контроля за выполнением суточных и сменных планов деятельности отделения дороги и станций».

Разработана проектная документация на создание интеллектуальных систем на Белорусской железной дороге, в том числе на создание Интеллектуальной системы планирования поездной работы; системы формирования прогнозного графика движения поездов с реализацией функции автодиспетчера и автоведения; системы автоматического управления технической станцией. Результаты исследований использованы при разработке «Имитационной ресурсной модели использования инфраструктуры ОАО РЖД» (АС ПРОГРЕСС); «Программного обеспечения технологии организации вагонопотоков» (АСОВ), а также внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета транспорта, Российского университета транспорта, Сибирского государственного университета путей сообщения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1 Ерофеев А.А. Интеллектуальная система управления перевозочным процессом: монография. – Гомель: БелГУТ, 2022. – 437 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах

2 Ерофеев А.А. Выбор оптимального варианта поездобразования на полигоне методом динамического программирования // Вестник ВНИИЖТа. – 2007. – № 4. – С. 11–15.

3 Кузнецов В.Г., Шакель Н.В., Ерофеев А.А., Ерофеева Е.А. Комплекс прикладных программ для разработки графика движения поездов // Вестник ВНИИЖТа. – 2007. – № 4. – С. 25–31.

4 Ерофеев А.А. Нормативно-справочная информация в системе поездобразования // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2007. – № 1–2 (14–15). – С. 54–59.

5 Ерофеев А.А., Кузнецов В.Г. Определение расчетных периодов планирования поездобразования // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – № 19. – С. 99–104.

6 Ерофеев А.А. Повышение транзитности в системе организации вагонопотоков // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – № 21. – С. 228–232.

7 Ерофеев А.А., Ерофеева Е.А. Автоматизация диспетчерского управления поездной работой на Белорусской железной дороге // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. № 40. – С. 133–139.

8 Ерофеев А.А., Ерофеева Е.А. Автоматизированная система разработки прогнозного графика движения поездов на Белорусской железной дороге // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2011. – № 1 (22). – С. 59–64.

9 Бубнова Г.Б., Ерофеев А.А., Корнев П.Г. Логистическое взаимодействие компаний-операторов при организации вагонопотоков по экономическим критериям // Экономика железных дорог. – 2012. – № 10. – С. 85–91.

10 Ерофеев А.А., Корнев П.Г. Технологическая потребность в корректировке плана формирования поездов // Мир транспорта. – 2013. – № 1. – С. 124–129.

11 Ерофеев А.А. Оценка системных свойств структуры управления перевозочным процессом в условиях развития Центра управления перевозками // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2013. – № 2 (27). – С. 60–64.

12 Мацкель В.М., Ерофеев А.А., Страдомский М.Ю. Перевозочная деятельность Белорусской железной дороги и перспективные направления развития // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2015. – № 2 (31). – С. 18–24.

13 Ерофеев А.А., Федоров Е.А. Планирование состава образования в системе интеллектуального управления перевозочным процессом // Сб. науч. тр. Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна. – 2016. – № 12. – С. 16–24.

14 Ерофеев А.А. Интеллектуальное управление перевозочным процессом: от оперативного к плановому // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 4. – С. 74–77.

15 Ерофеев А.А. Предпосылки создания интеллектуальной системы управления перевозочным процессом // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 42–45.

16 Ерофеев А.А. Влияние сбоев в информационно-управляющих системах на перевозочный процесс // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 46–50.

17 Ерофеев А.А., Дулуб П.М., Терещенко О.А. Автоматизация оперативного планирования грузовой работы // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 7. – С. 11–14.

18 Ерофеев А.А., Кузнецов В.Г., Козлов В.Г., Глевицкий Г.В. Применение предметно-ориентированной ГИС для решения задач оперативного управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 2 (37). – С. 50–56.

19 Ерофеев А.А. На рельсах искусственного интеллекта // Научно-производственный журнал «Вестник связи». – 2019. – № 1 (153). – С. 33–36.

20 Ерофеев А.А., Козлов В.Г., Терещенко О.А., Сидорович Ю.С. Научно-практические подходы к разработке энергоэффективного графика движения поездов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2019. – № 1 (38). – С. 66–69.

21 Ерофеев А.А., Терещенко О.А., Лавицкий В.В. Разработка интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 6. – С. 74–77.

22 Ерофеев А.А., Федоров Е.А., Федорцов М.В. Автоматизированная система УСОГДП // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 9. – С. 22–27.

23 Ерофеев А.А. Принципы построения апостериорных моделей интеллектуального управления перевозочным процессом // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 31–36.

24 Ерофеев А.А., Дулуб П.М. Интеллектуальная система сменно-суточного планирования поездной работы // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 10. – С. 19–23.

25 Borodin A., Prokofieva E., Panin V., Erofeev A. Hybrid Intelligent Systems of Cooperative Transportation Planning // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 54. – P. 92–103.

26 Ерофеев А.А., Бородин А.Ф. Модели описания процессов поиска управляющих решений в ИСУПП // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 2 (41). – С. 59–63.

27 Ерофеев А.А. Использование алгоритма CLOPE в системе разработки нормативного графика движения поездов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 51–55.

28 Erofeev A. Scientific principles of coordinating the functioning of elements in a multi-level Intelligent Transportation Control System // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: Сб. науч. тр. / редкол. В.В. Голенков и др. – Минск: БГУИР, 2021. – Вып. 5. – С. 267–272.

29 Ерофеев А.А., Чапский С.Ю. Прогнозирование продолжительности выполнения технологических операций в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2022. – № 1. – С. 52–56.

30 Ерофеев А.А. Апостериорная модель интеллектуальной диспетчерской корректировки графика движения поездов // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов: Междунар. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2021. – Вып. 3. – С. 96–107.

31 Сладкевич А.Н., Ерофеев А.А., Федоров Е.А., Страдомская А.А. Цифровизация транспортно-экспедиционной деятельности // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 5. – С. 46–50.

32 Ерофеев А.А. Технологии искусственного интеллекта при решении эксплуатационных задач в системе сменно-учетного планирования грузовой работы железнодорожных станций // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов: Междунар. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2022. – Вып. 4. – С. 102–108.

33 Erofeev A. About Creation of the Intelligent Transportation Control System in Railway Transport // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: Сб. науч. тр. / редкол. В.В. Голенков и др. – Минск: БГУИР, 2023. – Вып. 7. – С. 285–290.

Статьи в сборниках научных трудов и материалов конференций

34 Ерофеев А.А. Повышение транзитности вагонопотоков // Сб. тр. аспирантов и магистрантов. – Гомель, 2002. – Вып. 2. – С. 52–56.

35 Ерофеев А.А. Особенности внутридорожного плана формирования поездов на современном этапе с учетом проблемы организации сквозных поездов // Сб. тр. аспирантов и магистрантов. – Гомель, 2002. – Вып. 2. – С. 56–60.

36 Ерофеев А.А., Лисогурский О.Н., Мишин Г.Ю. Математическое обеспечение системы регулирования парка порожних вагонов // Комплексная эксплуатация видов транспорта: Междунар. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2004. – С. 126–139.

37 Ерофеев А.А. Определение уровня и потенциала транзитности в системе поездообразования // Сб. статей докл. 7-й конф. молодых ученых. – Вильнюс: Техника, 2006. – С. 109–112.

38 Ерофеев А.А. Формирование объектной среды поездообразования // Современные проблемы управления перевозочным процессом. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. – М.: МИИТ, 2006. – С. II-16–II-18.

39 Ерофеев А.А. Эффективность системы поездообразования // Проблемы и перспективы развития транспортных систем в условиях реформирования железнодорожного транспорта: управление, экономика и технологии: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Сер. «Техника, технология». – Киев: ДЕТУТ, 2008. – С. 128–129.

40 Ерофеев А.А. Особенности автоматизированной разработки прогнозного графика движения поездов // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2010. – С. 34–36.

41 Ерофеев А.А. Развитие системы управления поездной работой на Белорусской железной дороге // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2010. – С. 36–37.

42 Ерофеев А.А. Аспекты автоматизации разработки прогнозного графика движения поездов // Проблемы и перспективы развития транспортных систем в условиях реформирования железнодорожного транспорта: управление, экономика и технологии: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Сер. «Техника, технология». – Киев: ДЕТУТ, 2011. – С. 176–177.

43 Ерофеев А.А. Интеллектуальные системы ЦУП // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2012. – С. 16–17.

44 Кузнецов В.Г., Ерофеев А.А. Развитие Центра управления перевозками Белорусской железной дороги // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2012. – С. 27–28.

45 Ерофеев А.А. Оценка свойств функционально-иерархического построения структуры управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге // Проблемы и перспективы развития транспортных систем в условиях реформирования железнодорожного транспорта: управление, экономика и технологии: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Сер. «Техника, технология». – Киев: ДЕГУТ, 2013. – С. 157–159.

46 Ерофеев А.А. Влияние сбоев в информационных системах дорожного уровня на организацию перевозочного процесса // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2013. – С. 75–76.

47 Ерофеев А.А. Параметрическая оценка структуры управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2013. – С. 76–78.

48 Ерофеев А.А., Ерофеева Е.А. Интеллектуальная система оперативного управления поездной работой на Белорусской железной дороге // Современные концепции развития транспорта и логистики в Республике Беларусь: Сб. статей / сост. В.В. Апанасович, А.Д. Молокович. – Минск: Центр «БАМЭ-Экспедитор», 2014. – С. 149–154.

49 Кузнецов В.Г., Ерофеев А.А., Федорцов М.В. Комплексный подход к информационным технологиям оперативного планирования поездной работы на Белорусской железной дороге // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2013): Тр. второй науч.-техн. конф. – М.: ОАО «НИИАС», 2013 – С. 80–82.

50 Кузнецов В.Г., Ерофеев А.А. Система разработки прогнозного графика движения поездов на Белорусской железной дороге // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2013): Тр. второй науч.-техн. конф. – М.: ОАО «НИИАС», 2013. – С. 83–86.

51 Ерофеев А.А. Системы поддержки принятия решений в управлении поездной работой в центре управления перевозками Белорусской железной

дороги // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – Н. Новгород: Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. – Вып. 37. – С. 42–47.

52 Ерофеев А.А., Старинская Н.А., Прудников П.Н. Интеллектуальные технологии в оперативном планировании грузовой работы Белорусской железной дороги // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2014): Тр. третьей науч.-техн. конф. с междунар. участием. – М.: ОАО «НИИАС», 2014. – С. 30–33.

53 Ерофеев А.А. Влияние сбоев в информационных системах дорожного уровня на организацию перевозочного процесса // Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.А. Платонова. – Воронеж: Руна, 2015. – № 1. – С. 11–15.

54 Ерофеев А.А. Концептуальные подходы к созданию интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте // Информационные технологии и системы 2015 (ИТС 2015): Материалы Междунар. науч. конф. / редкол. Л.Ю. Шилин и др. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 44–45.

55 Ерофеев А.А., Старинская Н.А. Технология сменно-суточного планирования грузовой работы на Белорусской железной дороге // Современные проблемы развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом / под общ. ред. В.Н. Морозова и Ю.О. Пазойского. – М.: ВИНТИ РАН, 2015. – С. 88–90.

56 Ерофеев А.А. Система интеллектуального управления перевозочным процессом: модели поведения // Транспортные системы: тенденции развития: Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Б.А. Лёвина. – М.: МИИТ, 2016. – С. 380–383.

57 Ерофеев А.А., Кузнецов В.Г. Практико-ориентированные методы принятия управленческих решений с использованием моделей транспортных процессов // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана: Сб. материалов науч.-практ. конф. – Минск: БНТУ, 2016. – С. 60–61.

58 Ерофеев А.А. Интеллектуализация управления поездной работой на Белорусской железной дороге // Наука и образование транспорту: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. (2016, Самара). Т. 1 / редкол. Д.В. Железнов и др. – Самара: СамГУПС, 2016. – С. 100–104.

59 Ерофеев А.А. Интеллектуальная диспетчерская корректировка графика движения поездов // Информационные технологии и системы 2016 (ИТС 2016): Материалы Междунар. науч. конф. / редкол. Л.Ю. Шилин и др. – Минск: БГУИР, 2016. – С. 100–101.

60 Ерофеев А.А. Интеллектуальная оперативная корректировка графика движения поездов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2016): Тр. пятой науч.-техн. конф. с междунар. участием. – М.: ОАО «НИИАС», 2016. – С. 57–60.

61 Erofeev A., Erofeeva N. Intelligent management of the railway transportation process: object model // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол. В.В. Голенков и др. – Минск: БГУИР, 2017. – С. 281–284.

62 Ерофеев А.А. Семиотическая модель перевозочного процесса и ее использование при проектировании интеллектуальных систем // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2017): Тр. шестой науч.-техн. конф. – М.: ОАО «НИИАС», 2017. – С. 24–26.

63 Глевицкий Г.В., Федорцов М.В., Ерофеев А.А., Кузнецов В.Г. Развитие системы мониторинга при создании автоматизированной системы управления состоянием инфраструктуры железной дороги // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки. В 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2017. – С. 15–16.

64 Кулаженко Ю.И., Ерофеев А.А., Кузнецов В.Г. Развитие системы государственного контроля безопасности транспортной деятельности на железнодорожном транспорте // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки. В 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2017. – С. 38–39.

65 Erofeev A. A. Railway traffic management system with the intellectual control // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. / редкол. В.В. Голенков и др. – Минск: БГУИР, 2018. – С. 321–324.

66 Ерофеев А.А., Голенков В.В. Перспективы внедрения интеллектуальных систем управления на железнодорожном транспорте // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2018. – С. 96–98.

67 Erofeev A. A. Multi-criteria evaluation of management decisions in the intellectual system of transportation management // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: Сб. науч. тр. / редкол. В.В. Голенков и др. – Минск: БГУИР, 2019. – Вып. 3. – С. 205–208.

68 Ерофеев А.А., Бик-Мухаметова О.И., Макриденко А.Б. Современный подход к обеспечению безопасности на железнодорожных технических станциях // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 29–31.

69 Ерофеев А.А., Терещенко О.А., Лавицкий В.В. Интеллектуальная система управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): Тр. шестой науч.-техн. конф. – М.: ОАО «НИИАС», 2019. – С. 24–26.

70 Ерофеев А.А. Интеллектуальное управление перевозочным процессом // Тихомировские чтения: Инновационные технологии перевозочного процесса: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А. Ерофеева. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 13–16.

71 Erofeev A.A. The intelligent control concept of the transportation process on the Belarusian Railway // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: Сб. науч. тр./ редкол. В.В. Голенков и др. – Минск: БГУИР, 2020. – Вып. 4. – С.157–160.

72 Ерофеев А.А., Федоров Е.А. Процессно-объектный метод разработки графика движения поездов на инфраструктуре железнодорожного транспорта // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (Санкт-Петербург, 23–25 октября 2019 г.): Сб. тр. третьей Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. / под ред. А.А. Краснощека, П.К. Рыбина. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – Ч. 1: Развитие транспортной инфраструктуры и управление перевозками. – С. 245–256.

73 Ерофеев А.А., Бородин А.Ф. Концепция интеллектуального управления перевозочным процессом и этапность ее реализации // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. В 5 ч. Ч. 3 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2020. – С. 16–20.

74 Кузнецов В.Г., Ерофеев А.А., Дулуб П.М. Моделирование использования суточного бюджета времени при оценке пропускной способности объектов железнодорожного узла // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф.: в 5 ч. Ч. 3 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2020. – С. 36–38.

75 Ерофеев А.А. Интеллектуальная система автоматического управления технической станцией // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020: Материалы Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2020. – С. 92–96.

76 Ерофеев А.А., Терещенко О.А. Информационно-управляющая система центра управления местной работой // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020: Материалы Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2020. – С. 96–101.

77 Ерофеев А.А. О состоянии и перспективах развития интеллектуальных систем управления перевозками на Белорусской железной дороге // Фёдор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России: Тр. Междунар. науч.-практ. конф. / отв. ред. А.Ф. Бородин, сост. Р.А. Ефимов. – М.: РУТ (МИИТ), 2021. – С. 33–41.

78 Ерофеев А.А. О состоянии и перспективах развития интеллектуальных систем управления перевозками на Белорусской железной дороге // Бюллетень ОАО РЖД. – 2021. – № 1. – С. 27–37.

79 Ерофеев А.А., Бородин А.Ф. Принципы формирования управляющих решений в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 11–14.

80 Дубина Ю.В., Ерофеев А.А., Кузнецов В.Г. Потенциал железнодорожного транспорта для обеспечения потребностей перевозок // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А. Ерофеева. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 131–136.

81 Ерофеев А.А., Козлов В.Г., Терещенко О.А., Макриденко А.Б. Требования к созданию автоматизированной системы формирования прогнозного графика адаптированного в систему оперативного управления // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А. Ерофеева. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 154–158.

82 Ерофеев А.А., Терещенко О.А. Развитие информационных технологий на железнодорожном транспорте при формировании цифровых транспортных коридоров // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во

трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А. Ерофеева. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 158–163.

83 Ерофеев А.А., Терещенко О.А., Козлов В.Г. Управление перевозочным процессом в районе местной работы железной дороги на основе информационных технологий // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А. Ерофеева. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 163–167.

84 Ерофеев А.А., Ерофеева Е.А. Имитационная модель как инструмент совершенствования технологии работы станции // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А. Ерофеева. – Гомель: БелГУТ, 2021. – С. 20–26.

85 Ерофеев А.А. Периоды планирования поездной работы в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки: Тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 125-летию университета. – М., 2021. – С. 353–363.

86 Ерофеев А.А. Оценка влияния внедрения интеллектуальных систем на надежность системы управления перевозочным процессом // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской железной дороги. В 2 ч. / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель, 2022. – С. 20–25.

87 Ерофеев А.А. Процессно-объектный подход к формированию целевой модели интеллектуальной транспортной системы // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – М., 2023. – С. 125–130.

Тезисы докладов на научных конференциях

88 Лисогурский О.Н., Ерофеев А.А. Информационная модель нормирования показателей технического плана железной дороги // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Тез. докл. V респ. науч. конф. студентов и аспирантов. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2002. – С. 15–16.

89 Ерофеев А.А., Лисогурский О.Н., Мишин Г.Ю. Информационно-экспертная система оперативного регулирования вагонопотоков на железной дороге // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Тез. докл. V респ. науч. конф. студентов и аспирантов. – Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2002. – С. 122.

90 Кузнецов В.Г., Ерофеев А.А. Методологические подходы к совершенствованию системы организации вагонопотоков на железной дороге // Проблемы и перспективы развития транспортных систем: техника, технология, экономика и управление: Тез. докл. первой науч.-практ. конф. – Киев: КУЭТТ, 2003. – С. 95–97.

91 Грунтов П.С., Ерофеев А.А. Информационно-технологический подход к системе поездообразования // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. II / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2003. – С. 17–19.

92 Кузнецов В.Г., Михайлюк В.Б., Бекеш В.Г., Ерофеев А.А. Методологические подходы к совершенствованию системы организации вагонопотоков на Белорусской железной дороге // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. II / под ред. В.И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2003. – С. 32–34.

93 Ерофеев А.А. Управление процессами поездообразования // Сб. тез. докл. 7-й конф. молодых ученых. – Вильнюс: Техника, 2004. – С. 336.

94 Ерофеев А.А. Формирование объектной среды поездообразования // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Тез. докл. V респ. науч. конф. студентов и аспирантов. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2006. – С. 45–46.

95 Ерофеев А.А. Повышение транзитности в системе организации вагонопотоков // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тез. докл. 67-й Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск: ДИИТ, 2007. – С. 123–124.

96 Кузнецов В.Г., Ерофеев А.А. Определение расчетных периодов планирования поездообразования // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тез. докл. 67-й Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск: ДИИТ, 2007. – С. 128–129.

97 Ерофеев А.А., Ерофеева Е.А. Автоматизация диспетчерского управления поездной работой на Белорусской железной дороге // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании: Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск: ДИИТ, 2012. – С. 185–191.

98 Ерофеев А.А., Федоров Е.А. Планирование состава образования в системе интеллектуального управления перевозочным процессом // Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности, образовании: Тез. докл. X Междунар. науч.-практ. конф. – Днепр, 2016. – С. 65–66.

РЭЗІЮМЭ

Ерафееў Аляксандр Аляксандравіч

Тэорыя пабудовы інтэлектуальнай сістэмы кіравання перавозачным працэсам на чыгуначным транспарце

Ключавыя словы: перавозачны працэс, інтэлектуальная сістэма кіравання перавозачным працэсам, апрыёрная мадэль, апастэрыёрная мадэль, анталогія, апэратыўнае планаванне, дыспетчарскае кіраванне, графік руху цягнікоў, гібрыдны рэшацель эксплуатацыйных задач.

Мэта даследавання: распрацоўка тэорыі пабудовы інтэлектуальнай сістэмы кіравання перавозачным працэсам, выкарыстанне якой дасць магчымасць павысіць адаптыўнасць тэхналогій перавозачнага працэсу да зменлівай эксплуатацыйнай абстаноўцы, вырашаць новыя эксплуатацыйныя задачы, павысіць кіравальнасць сістэмы, што ў сукупнасці дасць магчымасць забяспечыць эфектыўнае функцыянаванне чыгункі ва ўмовах змянення транспартных патокаў.

Метады даследавання: статыстычныя метады апрацоўкі дадзеных, рэгрэсійны аналіз, прадукцыйныя мадэлі, сітуацыйнае мадэляванне, тэорыя штучных нейронавых сетак, тэорыя сістэм, алгарытм кластарызацыі CLOPE, сітуацыйна-эўрыстычны метад планавання, матэматычнае мадэляванне, графічнае мадэляванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана новая тэорыя пабудовы інтэлектуальнай сістэмы кіравання перавозачным працэсам, уключаючы правілы фарміравання анталогіі, прынцыпы фарміравання апрыёрных і апастэрыёрных мадэлей апісання тэхналагічных працэсаў, правілы пабудовы гібрыдных рэшателёў эксплуатацыйных задач. Распрацаваны апрыёрныя і апастэрыёрныя мадэлі, метады і тэхналогіі вырашэння існуючых і новых эксплуатацыйных задач, у тым ліку распрацоўкі адаптыўнага графіка руху цягнікоў, дэталізаванага пааперацыйнага зменна-сутачнага планавання цягніковай і грузавой работы, планавання цягаўтварэння, дыспетчарскага кіравання.

Ступень выкарыстання і рэкамендацыі. Вынікі даследаванняў выкарыстаны пры распрацоўцы стратэгічных і нарматыўных дакументаў Міністэрства транспарту і камунікацый Рэспублікі Беларусь, праектных дакументаў на стварэнне інтэлектуальных і аўтаматызаваных сістэм Беларускай чыгункі і ААТ «Расійскія чыгункі», у навучальным працэсе вышэйшых навучальных устаноў. Могуць быць скарыстаны пры распрацоўцы інтэлектуальных сістэм кіравання перавозачным працэсам на айчынных і замежных чыгунках.

Вобласць ужывання: чыгуначны транспарт.

РЕЗЮМЕ

Ерофеев Александр Александрович

Теория построения интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте

Ключевые слова: перевозочный процесс, интеллектуальная система управления перевозочным процессом, априорная модель, апостериорная модель, онтология, оперативное планирование, диспетчерское управление, график движения поездов, гибридный решатель эксплуатационных задач.

Цель исследования: разработка теории построения интеллектуальной системы управления перевозочным процессом, использование которой позволит повысить адаптивность технологий перевозочного процесса к изменяющейся эксплуатационной обстановке, решать новые эксплуатационные задачи, повысить управляемость системы, что в совокупности позволит обеспечить эффективное функционирование железной дороги в условиях изменения транспортных потоков.

Методы исследования: статистические методы обработки данных, регрессионный анализ, продукционные модели, ситуационное моделирование, теория искусственных нейронных сетей, теория систем, алгоритм кластеризации CLOPE, ситуационно-эвристический метод планирования, математическое моделирование, графическое моделирование.

Полученные результаты и их новизна. Разработана новая теория построения интеллектуальной системы управления перевозочным процессом, включая правила формирования онтологии, принципы формирования априорных и апостериорных моделей описания технологических процессов, правила построения гибридных решателей эксплуатационных задач. Разработаны априорные и апостериорные модели, методы и технологии решения существующих и новых эксплуатационных задач, в том числе разработки адаптивного графика движения поездов, детализированного пооперационного сменно-суточного планирования поездной и грузовой работы, планирования поездообразования, диспетчерского управления.

Степень использования и рекомендации. Результаты исследований использованы при разработке стратегических и нормативных документов Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, проектных документов на создание интеллектуальных и автоматизированных систем Белорусской железной дороги и ОАО «Российские железные дороги», в учебном процессе высших учебных заведений. Могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем управления перевозочным процессом на отечественных и зарубежных железных дорогах.

Область применения: железнодорожный транспорт.

SUMMARY

Erofeev Alexander

The theory of constructing an intelligent control system for the transportation process in railway transport

Key words: transportation process, intelligent transportation process control system, a priori model, a posteriori model, ontology, operational planning, dispatch control, train schedule, hybrid operational problem solver.

The aim of the research: to develop a theory for constructing an intelligent transportation process management system, the use of which will increase the adaptability of transportation process technologies to a changing operational environment, solve new operational problems, increase the controllability of the system, which together will ensure the effective functioning of the railway in conditions of changing traffic flows.

Research methods: statistical methods of data processing, regression analysis, production models, situational modeling, theory of artificial neural networks, systems theory, CLOPE clustering algorithm, situational heuristic planning method, mathematical modeling, graphical modeling.

The results obtained and their novelty. The new theory for constructing an intelligent transportation process management system has been developed, including rules for the formation of an ontology, principles for the formation of a priori and a posteriori models for describing technological processes, and rules for constructing hybrid solvers of operational problems. A priori and a posteriori models, methods and technologies for solving existing and new operational problems have been developed, including the development of an adaptive train schedule, detailed operational shift-daily planning of train and freight work, train formation planning, and dispatch control.

Application recommendations. The research results were used in the development of strategic and regulatory documents of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, project documents for the creation of intelligent and automated systems of the Belarusian Railway and JSC «Russian Railways», in the educational process of higher educational institutions. Can be used in the development of intelligent transportation process control systems on domestic and foreign railways.

Field of application: railway transport.



Научное издание

ЕРОФЕЕВ Александр Александрович

**ТЕОРИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
технических наук

по специальности 05.22.08 –

Управление процессами перевозок

Подписано в печать 19.12.2023 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 2,8. Тираж 100 экз. Зак. 2533.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский государственный университет транспорта.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

№ 3/1583 от 14.11.2017.

Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель

Лист исправлений к автореферату диссертации Ерофеева А.А. «Теория построения интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.08 – управление процессами перевозок

На обороте обложки автореферата информацию об официальном оппоненте читать в редакции:

Лобашов Алексей Олегович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные системы и технологии» Белорусского национального технического университета

На обороте обложки автореферата информацию об оппонировавшей организации читать в редакции:

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент




Н.А.Кекиш

Соискатель

А.А.Ерофеев