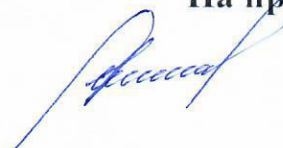


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи



БАНИКОВ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА  
ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

05.02.22 – Организация производства (транспорт, технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Сирина Нина Фридриховна

Екатеринбург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПАССАЖИРСКИХ СОСТАВОВ.....	11
1.1. Реформирование пассажирской инфраструктуры.....	11
1.2. Анализ системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов в России .....	18
1.3 Система технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов за рубежом.....	24
Выводы по первой главе .....	29
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРВИСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПАССАЖИРСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА .....	31
2.1. Функциональная архитектура цифровой модели сервисного технического обслуживания и ремонта.....	31
2.2. Методологические основы формирования сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава.....	36
2.3. Математическая модель сервисного технического обслуживания и ремонта.....	42
Выводы по второй главе.....	62
3. ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СЕТИ СЕРВИСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА НА ПОЛИГОНЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ.....	63
3.1. Разработка информационного взаимодействия при проведении сервисного технического обслуживания и ремонта.....	63
3.2 Формирование цифровой модели организационной сети на полигоне железной дороги.....	69
3.3 Сервисное техническое обслуживание и ремонт в среде цифрового моделирования AnyLogic.....	79
Выводы по 3 главе .....	91
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	92
4.1 Основные показатели управления эффективностью сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов .....	92

4.2 Влияние сервисного технического обслуживания и ремонта на управление интенсивностью отказов.....	98
Выводы по 4 главе .....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	106
Приложение А. Вероятность перехода состояний пассажирского вагона в системе сервисного технического обслуживания и ремонта .....	117
Приложение Б. Справочник состояний пассажирского вагона в системе сервисного технического обслуживания и ремонта.....	118
Приложение В. Акт об использовании результатов кандидатской диссертационной работы.....	122

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** В рамках реализации Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [1], Правительством Российской Федерации определена программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 года № 466-р [2] утверждена программа развития холдинга открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года, данная программа включает в себя переход на «Цифровую железную дорогу».

Одним из направлений «Цифровизации Российских железных дорог» является создание инструментов интеллектуального управления, цифрового моделирования и мониторинга транспортных средств и объектов инфраструктуры. Данное направление развития рассматривает следующие вопросы: актуальная цифровая информация по объектам пассажирской транспортной инфраструктуры; моделирование процессов эксплуатации и ремонта пассажирского подвижного состава с привязкой к жизненному циклу; сервис прогнозирования надежности эксплуатируемого пассажирского подвижного состава; цифровое планирование различных видов ремонта пассажирского подвижного состава.

В настоящее время конкурентоспособность пассажирского железнодорожного транспорта определяется такими факторами как: скорость, надежность, ритмичность, безопасность, удобство, комфорт, тариф, а так же технический уровень подвижного состава, который играет ключевую роль. Для обеспечения безопасности движения, поддержания пассажирского подвижного состава в исправном и работоспособном состояниях существуют специализированные подразделения пассажирской инфраструктуры, осуществляющие контроль технического состояния пассажирских вагонов.

Действующая система технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов влияет как на надежность подвижного состава, так и на жизненный цикл в целом, определяя эффективность работы и себестоимость пассажирских перевозок.

В настоящее время первостепенной задачей в системе технического обслуживания и ремонта становится оптимизация межремонтных циклов, совершенствование существующих и внедрение новых форм организации производства.

В настоящее время инструменты планирования технического обслуживания и ремонта являются статическими. Они не учитывают динамическую информацию в процессе жизненного цикла подвижного состава. Средства планирования в основном представляют собой копию руководства по организации технического обслуживания и ремонта.

Формирование научного обеспечения цифровой модели предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту как трансформация стратегии от диагностической к прогнозирующей. Управление сервисным техническим обслуживанием и ремонтом позволит адаптировать переход технического обслуживания и ремонта как существующего, так и высокоскоростного пассажирского подвижного состава к сервисному техническому обслуживанию и ремонту.

Цифровая модель предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту охватывает жизненный цикл пассажирского подвижного состава от первоначального планирования до множества решений, таких как: разделение в механизме финансирования, выбора оператора услуг, определения ключевых показателей эффективности для оператора, установления сборов, получение максимальной прибыли, обеспечения доступа ко всем операторам железнодорожных услуг.

Поэтому, первостепенная задача заключается в увеличении эффективности деятельности предприятий на полигоне железной дороги. Исследования, цель которых, заключается в разработке методов и инструментов планирования организации производственных процессов, по техническому обслуживанию и ремонту с

применением цифровизации производства будут являться инструментом для достижения поставленных целей.

Одно из решений данной задачи – сервисное техническое обслуживание и ремонт пассажирских вагонов на основе создания цифровой платформы многоцелевого подхода оптимизации и принятия управленческих решений.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиям проблем технического обслуживания и ремонта подвижного состава проводились научными коллективами ВНИИЖТ, МИИТ, РГУПС, УрГУПС, ДВГУПС, ИрГУПС, СамГУПС, ПГУПС, ОмГУПС.

Выполненные исследования базируются на трудах ученых в области функционирования и совершенствования организации производственных процессов технического обслуживания и ремонта подвижного состава: С.М. Бородай, А.Л. Бродовского, Д.Г. Евсеева, Н.Ф. Сириной и труды зарубежных ученых: С. Kirchner, G. Leborgne, G. Pierskalla и S. Voelker. Учитывались результаты исследований по организации работы и управления железнодорожным транспортом: М.М. Болотин, М. Г. Буткина, Б.М. Лapidуса, А.Н. Рахмангулова, В.М. Сай., В.М. Самуйлова, О.Г. Туровца, Д.И. Шикиной, П.А. Устича. Вопросами развития сетевых организационных структур занимались: Л.Б. Миротин, В.А. Персианова, С.В. Сизый.

В диссертации рассматриваются научные основы организации управления производственным процессом при сервисном техническом обслуживании и ремонте пассажирских вагонов. Рассмотрены аспекты цифровой модели производственного процесса предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту для прогнозирования событий и составления оптимальных планов проведения работ с учетом многомодальности и структурной неоднородности данных.

**Цель диссертационной работы** – разработка цифровой модели производственного процесса предприятия сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов.

**Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:**

1. Выполнить анализ организации технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов, и определить основные направления цифровой трансформации производственных процессов.

2. Разработать графоаналитическую модель состояний пассажирского подвижного состава, позволяющую разделять виды производимых работ по техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов по предприятиям полигона железной дороги.

3. Разработать цифровую модель производственного процесса предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов, позволяющую оценивать производственные возможности сервисного технического обслуживания и ремонта, и количественно оценивать их

4. Разработать цифровую модель организационной структуры сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов на полигоне железной дороги.

5. Разработать ключевые показатели эффективности управления организацией сервисным техническим обслуживанием и ремонтом пассажирских вагонов в условиях цифровой трансформации производственных процессов.

**Объект исследования** – процесс организации сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов на основе цифровой модели производственного процесса предприятия.

**Предмет исследования** – организация функционирования системы технического обслуживания и ремонта, планирование и управление на всех этапах жизненного цикла пассажирских вагонов.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложен переход на сервисное техническое обслуживание и ремонт пассажирских вагонов, предложены понятия: «Цифровая трансформация» и «Цифровая модель предприятия».

2. Предложена графоаналитическая модель состояний пассажирского подвижного состава, с разделением видов производимых работ в системе технического обслуживания и ремонта.

3. Разработана цифровая модель производственного процесса предприятия в системе сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов, позволяющая оценивать различные сценарии ее реализации.

4. Разработана цифровая модель организационной структуры сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов на полигоне железной дороги.

5. Разработаны ключевые показатели эффективности управления организацией сервисного технического обслуживания и ремонта, влияющие на принятие управленческих решений на всех этапах жизненного цикла пассажирских вагонов.

**Теоретическая значимость** заключается в цифровизации производственного процесса предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту для прогнозирования событий и составления оптимальных планов проведения работ с учетом многомодальности и структурной неоднородности данных.

**Практическая значимость** заключается в переходе с технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава к сервисному техническому обслуживанию и ремонту. Всесторонняя оценка производственных возможностей в цифровой модели позволит рационально спланировать и организовать систему сервисного технического обслуживания и ремонта.

**Методология и методы исследования.** В основу методологии исследования при разработке цифровой модели использовались теории массового обслуживания и структурно-функциональный анализ. В работе использовались методы системного анализа, теории графов, дискретного анализа цепей, теории вероятностей, а так же методы теории случайных процессов и теории Марковских процессов.

**Положения, выносимые на защиту.**



1. Графоаналитическая модель технического состояния пассажирского подвижного состава с разделением видов производимых работ сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава по предприятиям полигона железной дороги.

2. Цифровая модель производственных процессов предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов, позволяющая оценивать производственные сценарии.

3. Цифровая модель организационной структуры сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов на полигоне железной дороги, предусматривающая последовательную реализацию функционирования системы с учётом влияния внешних факторов.

4. Показатели эффективности управления организацией сервисным техническим обслуживанием и ремонтом пассажирского подвижного состава в условиях цифровизации производственных процессов.

**Степень достоверности результатов** подтверждается методологической основой исследования, выполненного на актуальных представлениях о процессах организации производства по проведению технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава, использованием признанных наработок отечественных и зарубежных ученых, корректностью применения математического аппарата в цифровой моделируемой системе, адекватностью в разработанной цифровой модели и результатов расчетов; аргументированным использованием в математических гипотез и допущений.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения научно-квалификационной работы докладывались на: международной научно-технической конференции «Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог» (16-17 ноября 2016 г., Екатеринбург); всероссийской научной конференции «Техника и технологии наземного транспорта» (20 февраля 2017 г. Екатеринбург); международной научно-практической конференции «Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего

и профессионального образования» (26 апреля 2017 г. Екатеринбург); IX международной научной конференции «Transport problems» (26-29 июня 2017 г. Катовице, Польша); всероссийской научной конференции «Техника и технологии наземного транспорта» (25-26 января 2018 г., Екатеринбург); X Международной научно-практической конференции «Будущее транспорта России – 2018» (25 апреля 2018 г., Екатеринбург); X международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (15-16 ноября 2018 г., Новосибирск); заседаниях кафедры «Вагоны» УрГУПС.

**Публикации.** Основные положения научно-квалификационной работы отражены в 16 печатных работах, в том числе две работы опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций», а так же пять работ входят в международную систему цитирования Scopus.

# 1. АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПАССАЖИРСКИХ СОСТАВОВ

## 1.1. Реформирование пассажирской инфраструктуры

Организационно-управленческая эффективность организации работы пассажирской инфраструктуры, с целью обеспечения работоспособного состояния пассажирских вагонов, является основным критерием результативности работы всего комплекса. Программа развития «Комплексная программа реорганизации и развития отечественного локомотиво- и вагоностроения, организации ремонта и эксплуатации пассажирского и грузового подвижного состава на период 2001-2010 г.» стала отправной точкой в направлениях попытки реформирования развития транспортной отрасли. Одно из направлений – разработка системы эксплуатации, технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов, основанная на автоматизации производства и внедрения информационных технологий [3, 4].

Пассажирские перевозки открытого акционерного общества «Российские железные дороги» обеспечивают важную социальную и территориальную составляющую транспортной отрасли. Пассажирская железнодорожная отрасль представляет собой сложноорганизованную систему, включающую: собственника пассажирского подвижного состава, владельца инфраструктуры, заводы-изготовители подвижного состава, ремонтные предприятия и сторонние компании. Производственные изменения в пассажирской отрасли взаимосвязаны с изменениями условий рыночной экономики, а так же процессов реформирования в самой транспортной отрасли. Реформирование производилось с целью предоставления доступных потребителям пассажирских перевозок, а так же с целью достижения безубыточности хозяйственной деятельности компаний, обеспечивающих пассажирские перевозки [5].

На пассажирском железнодорожном транспорте исторически сложилась производственная структура, представленная на рисунке 1.1. Данная система

управления на пассажирском железнодорожном транспорте сочетала в себе территориально-административный и производственно-отраслевой функционал.

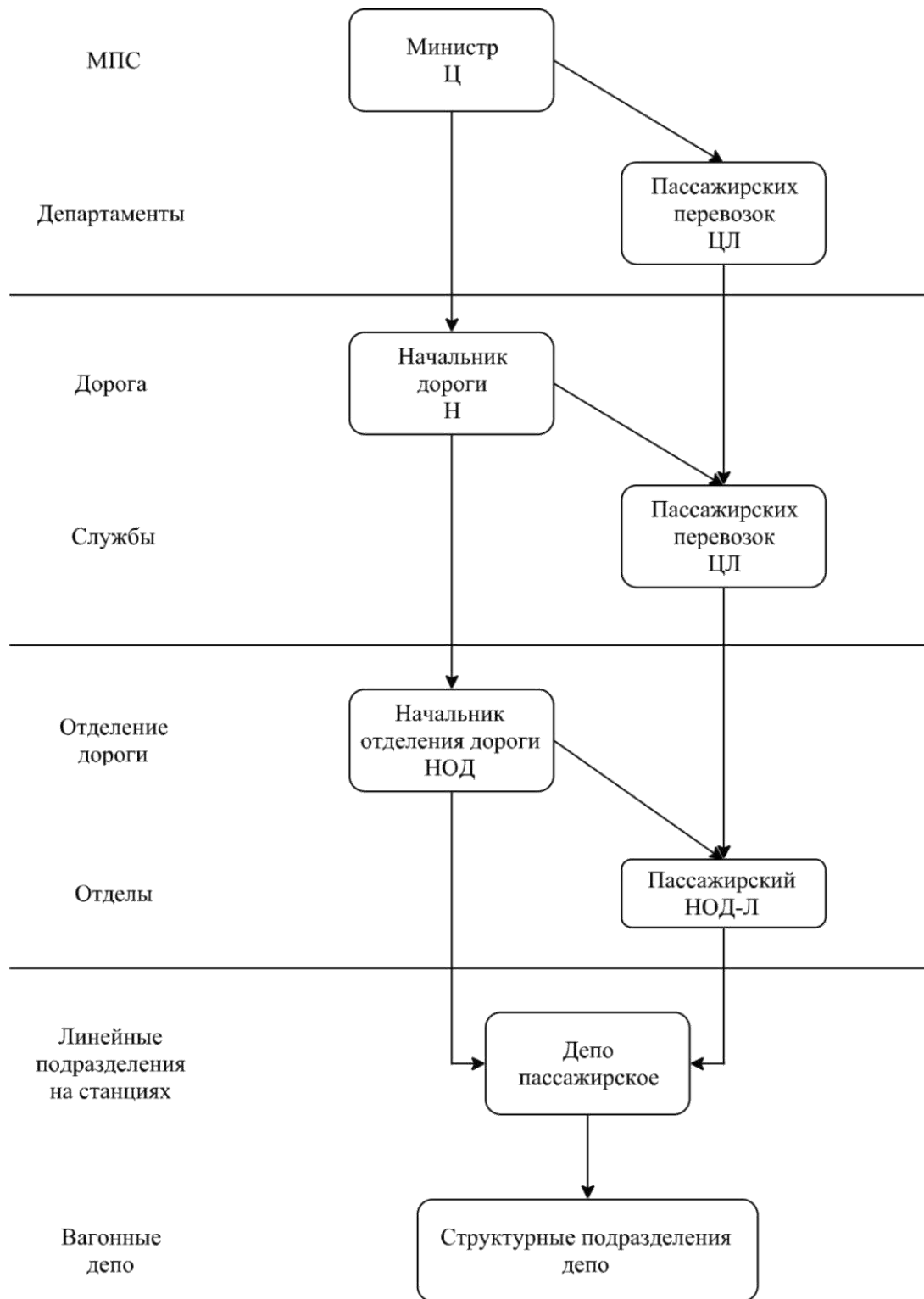


Рисунок 1.1 – Структурная схема пассажирского вагонного хозяйства МПС

Долгое время субсидирование пассажирских перевозок производилось за счет дохода, получаемой за счет грузовых перевозок. Перекрестное субсидирование ограничивало расширение и реструктуризацию организационно-управленческой системы. Субсидирование пассажирской отрасли ограничивало развитие, так как средства не поступали на закупку нового подвижного состава, а так же в развитие и модернизацию инфраструктуры. В условиях рыночных и договорных форм организации хозяйственного взаимодействия предприятий сложившаяся ситуация требовала изменений [5].

Перекрестное субсидирование прибыли, получаемое от грузовых перевозок, снижали эффективность в реализации перспективных проектов ОАО «РЖД». В результате составы пассажирских поездов состояли из вагонов, отработавших большую часть своего жизненного ресурса. Удобство и комфорт пассажиров оставался на последнем месте клиентоориентированности пассажирской отрасли. Потребность в реформировании пассажирской отрасли стало важной задачей.

Реформирование пассажирской отрасли не произвели одномоментно. Повышение эффективности работы пассажирской отрасли достигли путем реализации внутривидовой конкуренции, а так же привлечения для частных капиталов в пассажирскую отрасль. Реформирование и реструктуризация отрасли учитывалась на географическом пространстве, производственных возможностях инфраструктуры, а так же экономической особенности организации хозяйственной деятельности Российского железнодорожного пассажирского транспорта [6].

Постановлением Правительства Российской Федерации № 384 от 18.05.2001 года утверждена «Программа структурной реформы железнодорожного транспорта». Процесс реформирования, приведенный в таблице 1.1, включал в себя подготовку и постепенное реформирование с целью создания открытого акционерного общества «Федеральная пассажирская компания». Произведенные мероприятия открыли экономические вливания в развитие железнодорожной пассажирской отрасли, в связи с возникновением нового хозяйствующего субъекта. Это стало серьезным шагом в период роста пассажиропотока, а так же в необходимости разви-

тия мобильности населения. В результате реформы подготовлена основа для дальнейшего развития пассажирского железнодорожного комплекса [7].

Таблица 1.1 – Этапы реформирования пассажирского железнодорожного транспорта

Плановая программа	Результат проведения
<p>I этап (2001-2002 гг.)</p> <p>Подготовка законодательных и иных нормативно-правовых актов и методических документов, необходимых для реализации структурной реформы. Создание холдинга ОАО «РЖД».</p>	<p>I этап (2001-2003 гг.)</p> <p>Проведена инвентаризация предприятий. Разработаны проекты: «Закон о железнодорожном транспорте», «Устав железнодорожного транспорта», «Закон об особенностях управления и распоряжения имуществом железнодорожного транспорта».</p>
<p>II этап (2003-2005 гг.)</p> <p>Проект создания акционерных обществ на базе собственности структурных подразделений холдинга ОАО «РЖД». Проект создания условий конкурентоспособности компаний в сфере пассажирских перевозок.</p>	<p>II этап (2003-2005 гг.)</p> <p>Либерализация тарифов на проезд пассажиров в купейных вагонах и вагонах «СВ».</p>
<p>Продолжение таблицы 1.1</p> <p>III этап (2006-2010 гг.)</p> <p>Проект создания ОАО «Федеральная пассажирская компания». Открытие рынка продаж акций дочерних обществ холдинга ОАО «РЖД» частным собственникам с целью привлечения инвестиций в железнодорожную инфраструктуру.</p>	<p>III этап (2006-2010 гг.)</p> <p>1 июля 2006 г. в качестве дочернего филиала холдинга ОАО «РЖД» создана Федеральная пассажирская дирекция (ФПД), в собственность которой передаются пассажирские вагоны и инфраструктура пассажирского вагонного хозяйства.</p> <p>В декабре 2009 г. учреждается ОАО «Федеральная пассажирская компания», на базе ФПД. Образована новая дочерняя структура холдинга ОАО «РЖД»</p>

В результате при реформировании пассажирской отрасли Федеральная пассажирская компания (далее АО «ФПК») приобрела пассажирский подвижной со-

став с истекающим сроком службы, советские объекты пассажирской инфраструктуры и пассажирских обустройств, изношенные основные фонды. Данные аспекты ограничивали возможности АО «ФПК» по повышению клиентоориентированности в обслуживании пассажиров в поездах межрегионального и дальнего следования.

После проведенного реформирования дочерние подразделения, в том числе АО «ФПК», оказались в новом организационном сегменте. Вместо распорядительного взаимодействия между хозяйствующими субъектами пришли хозяйственные отношения. Так же АО «ФПК» постепенно отдавала второстепенные виды технологического процесса железнодорожной пассажирской отрасли частным компаниям посредством аутсорсинга [17].

Результатом проведенного реформирования железнодорожной пассажирской отрасли организационно-управленческая структура АО «ФПК» приняла следующий вид (рисунок 1.2) и включала в себя: аппарат управления и 13 региональных филиалов. Региональные филиалы подразделялись на: 22 пассажирских вагонных депо, 33 вагонных участка, 11 железнодорожных агентств, центр по организации перевозок транспортных средств. Отдельным сегментом был выделен Вагонный участок центрального направления, который относился к Московскому филиалу АО «ФПК».

В результате реструктуризации и организационных изменений в пассажирской отрасли сформированная организационная производственная структура позволила повысить управляемость компании АО «ФПК», а так же перейти на уровень получения прибыли в железнодорожной пассажирской отрасли. Оптимизация структуры управления произошло за счет структурирования и передачи непрофильных видов деятельности АО «ФПК» посредством аутсорсинга, увеличения производственных мощностей отдельных структур компании, а так же усиления договорных и рыночных механизмов взаимодействия [8].

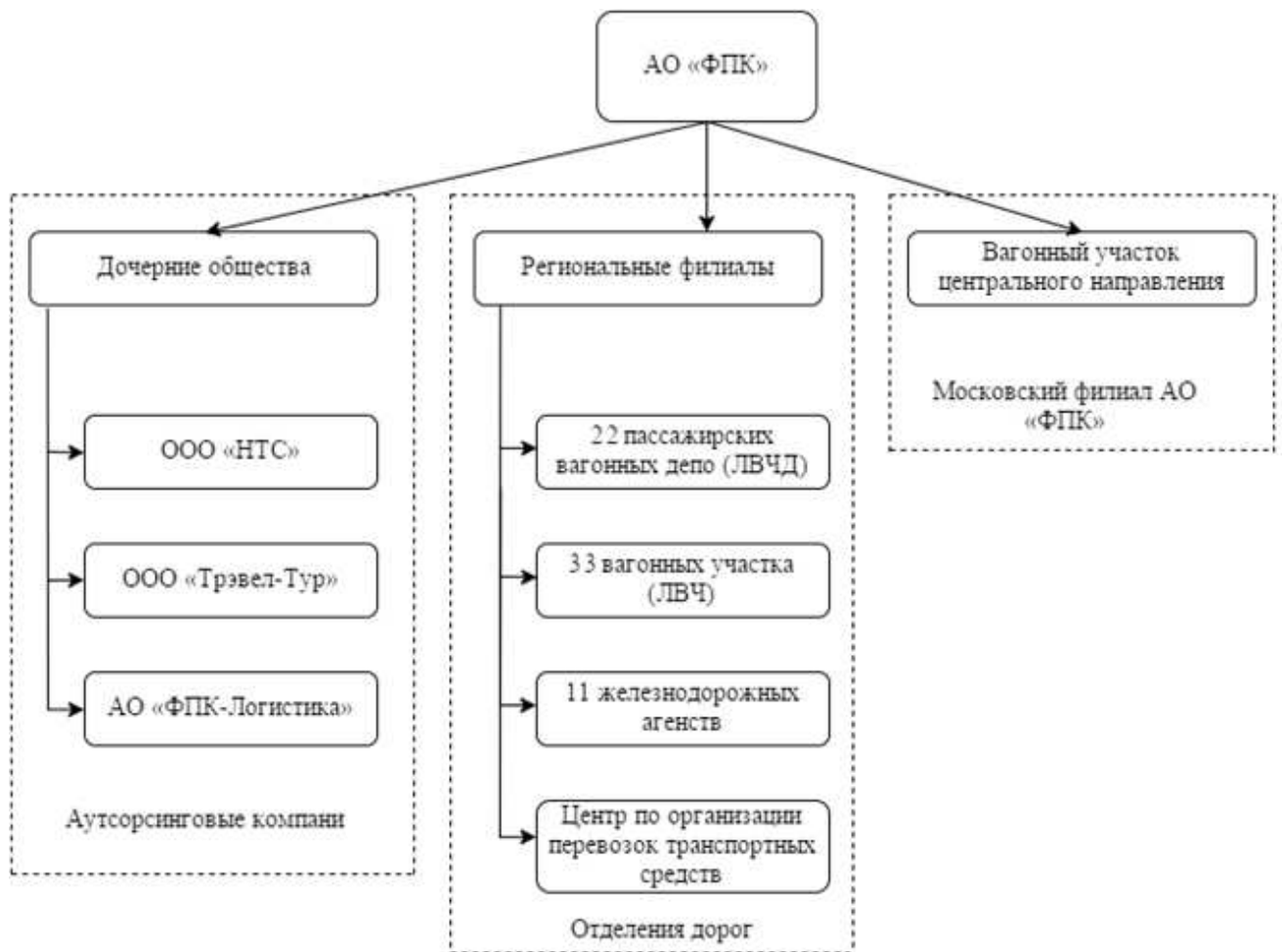


Рисунок 1.2 – Организационная структура ОА «ФПК»

«Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года», а именно бизнес-блок «Пассажирские перевозки и сервис» определяет стратегическое развитие скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта. В свою очередь для создания высокоскоростных магистралей потребуется высокоэффективная система технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава.

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года описывает утвержденный проект по реализации следующих приоритетных проектов высокоскоростных магистралей в направлениях: «Москва – Санкт-Петербург», «Москва – Казань – Екатеринбург», «Москва – Ростов-на-Дону – Ад-



лер». Численность проживающих, в планируемых линиях высокоскоростных магистралей более 100 млн. человек. [9, 10].

В настоящее время у ОАО «РЖД» имеется достаточный опыт сотрудничества с мировыми производителями высокоскоростного подвижного состава. На железных дорогах России эксплуатируется высокоскоростной поезд Сапсан, скоростной электропоезд Ласточка производства Siemens, скоростной поезд Allegro производства компании Alstom, а так же подписано сотрудничество с фирмой Talgo на поставку скоростного поезда Стриж.

В условиях рыночных хозяйственных отношений предприятий успех в конкурентной среде и устойчивое состояние транспортных компаний должно реализовываться при снижении уровня издержек в компании. Снижение издержек обеспечит дополнительный источник прибыли компании, как следствие, и увеличение капитала, направляемого на модернизацию и расширение инфраструктуры, техническое перевооружение производства [11, 12].

Развитие скоростного и высокоскоростного движения в Российской Федерации, согласно Указа Президента имеет общегосударственное значение, так как обеспечивает укрепление социально-территориальной целостности как отдельных регионов, так и государства в целом; реализация транспортной доступности и увеличение мобильности населения [11]. Скоростные и высокоскоростные электрифицированные магистрали имеются в Японии, Франции, Германии, Испании, Великобритании, Италии, Швеции, Финляндии, США, Республике Корея.

Глобальная цель реформирования в структуре железнодорожного пассажирского транспорта – это реализация экономического роста, обеспечений в реализации условий для привлечения частных инвестиций. Развитие железнодорожной пассажирской транспортной отрасли невозможно без введения современных производственных и цифровых технологий. Данная реформа включает в себя:

- модернизацию существующего пассажирского подвижного состава;
- обновление пассажирского подвижного состава;

- введение современных технологий производства, автоматизация и цифровизация пассажирской отрасли;
- клиентоориентированность пассажирской компании;
- поддержание высокого уровня безопасности движения поездов [10].

## **1.2. Анализ системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов в России**

В 1946 г. принято смелое по тому времени и, как показало время, оправдавшее себя решение – введена система ремонта вагонов по «Техническому состоянию». В этом случае решение о постановке в ремонт того или иного объема принималось работниками ремонтных предприятий по каждому вагону в зависимости от его фактического технического состояния. Данная стратегия ремонта пассажирского подвижного состава просуществовала до 1950 г. [13].

В 1951 г. пассажирская отрасль отказалась от существовавшего технологического процесса по постановке пассажирских вагонов в ремонт по их фактическому техническому состоянию. После проведения организационно-управленческих и производственных изменений система технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов состояла из следующих элементов:

- технический осмотр и обслуживание в пути их следования;
- периодические технические ревизии наиболее ответственных узлов пассажирских вагонов (буксовый узел, колёсная пара, тормозное оборудование и т. д.);
- текущий ремонт пассажирских вагонов;
- годовой ремонт (ГР);
- средний ремонт (СР);
- капитальный ремонт (КР).

Виды ремонта пассажирских вагонов с 1951 г. [13] представлены на рисунке 1.3.

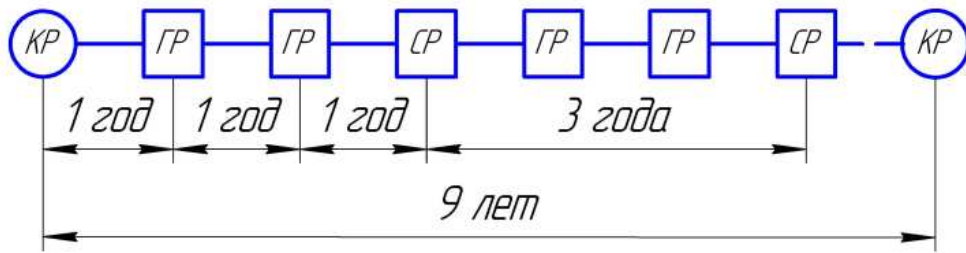


Рисунок 1.3 – Виды ремонта пассажирского вагона с 1951 г.

Согласно приказа Министерства путей сообщения (далее – МПС) от 3 июля 1960 г. № 32Ц («О мерах по дальнейшему улучшению текущего содержания вагонов и усилению работы ПТО») и приказа МПС от 29 июля 1961 г. № 40Ц («О мерах по улучшению организации и качества ремонта вагонов») произошёл следующий этап развития в системе технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов. Данными нормативными документами руководствовались в вагонных депо и других отраслевых подразделениях пассажирской отрасли.

С введением в силу приказа МПС от 29 июля 1961 г. № 40Ц в системе ремонта пассажирских вагонов произошли следующие изменения:

- вместо трёх плановых периодических видов ремонта (годового, среднего и капитального) было оставлено два (годовой и капитальный);
- годовой ремонт пассажирских вагонов стал называться деповским ремонтом (ДР);
- капитальный ремонт пассажирских вагонов стал называться заводским ремонтом (ЗР);
- установлен определённый промежуток времени между деповским и заводским ремонтом.

Виды ремонта пассажирских вагонов с 1961 г. представлены на рисунке 1.4 и имеет обозначения:

- ДР – деповской ремонт;
- ЗР – заводской ремонт.

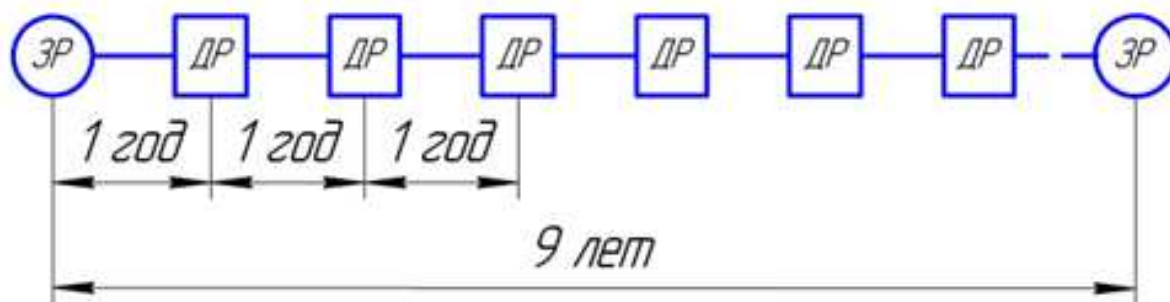


Рисунок 1.4 – Виды ремонта пассажирского вагона с 1961 г.

По мере совершенствования конструкции пассажирского подвижного состава система технического обслуживания и ремонта систематически корректировалась, изменялись периоды проведения ТО и Р, а так же объёмы производимых работы. Данный процесс продолжается непрерывно по мере создания новых средств технической диагностики и введения в эксплуатацию современного пассажирского подвижного состава [14, 15].

В 1985 г. структурные подразделения по ремонту, техническому обслуживанию и экипировке пассажирского подвижного состава, находящиеся ранее в составе служб вагонного хозяйства и департамента вагонного хозяйства, путем реформирования переданы в организационную структуру службы пассажирских сообщений [16].

Основные особенности технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов заключаются в следующем:

- пассажирские вагоны после выполненного рейса возвращаются на станцию формирования;
- в пути следования состав пассажирского поезда сопровождает бригада проводников, под руководством начальника пассажирского поезда;
- каждый пассажирский вагон оборудован встроенными устройствами и системами диагностики, а так же средствами пожаротушения;
- в связи с сезонными изменениями объема перевозок пассажиров вагоны могут находиться в отстое по несколько месяцев;

– необходимо производить экипировку состава пассажирского поезда при подготовке в рейс;

– сложность при реализации технологического процесса по техническому обслуживанию и ремонту составляют электрооборудование вагона и систем жизнеобеспечения.

В соответствии с приказом МПС СССР от 19.03.1982 г. № 8Ц до апреля 1997 г. пассажирские вагоны направлялись в ремонт по календарному признаку. Приказом министра путей сообщения № 9Ц от 4 апреля 1997 г. была введена новая система технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов. Приказом Минтранса Российской Федерации от 13 января 2011 г. № 15 «О внесении изменений в приказ МПС Российской Федерации от 4 апреля 1997 г. № 9Ц» [17] были уточнены и внесены изменения в части периодичности и сроков проведения для пассажирского подвижного состава технического обслуживания и ремонта.

Анализ этапов изменения видов технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Анализ этапов изменения работ по техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов

Года	Вид ТО и Р	Периодичность	Место проведения
1946-1950 гг	В соответствии с техническим состоянием ПС	в зависимости от его фактического технического состояния	Депо
1951-1960 гг	Технический осмотр и обслуживание вагонов Текущий ремонт Годовой ремонт	Осмотр на ПТО и в пути следования  По факту выявления отказов Ежегодно	ПТО  ПТО Депо

Продолжение таблицы 1.2

Года	Вид ТО и Р	Периодичность	Место проведения
	Средний ремонт Капитальный ремонт	Раз в 3 года Каждые 9 лет	Депо Депо
1961-1985 гг	Технический осмотр и обслуживание вагонов Деповской ремонт Заводской ремонт	Осмотр на ПТО и в пути следования Ежегодно Каждые 9 лет	ПТО Депо Заводы
1985-1997 гг	Подразделения по ремонту и ТО, входящие по управленческой структуре в составе служб вагонного хозяйства и департамента вагонного хозяйства, переданы в службу пассажирских сообщений		
04.04.1997 по настоящее время	Техническое обслуживание ТО-1	В пунктах формирования, ежедневно в пути следования	ПТС
	Техническое обслуживание ТО-2	Перед началом летних и зимних перевозок	ПТС
	Техническое обслуживание ТО-3	Установлена периодичность по календарному признаку или по пробегу	Депо
	Текущий ремонт ТР (ТОР и ТБР) (введен приказом)	По факту выявления отказов	ПТС, депо
	Деповской ремонт ДР	Установлена периодичность по календарному признаку или по пробегу	Депо
	Капитальный ремонт первого объема КР-1	Установлена периодичность по календарному признаку	Депо
	Капитальный ремонт второго объема КР-2	Установлена периодичность по календарному признаку	Завод изготовитель, депо
	КР повышенного объема с модернизацией КРМ (введен приказом)	Установлена периодичность по календарному признаку	Завод изготовитель
	КВР	Установлена периодичность по календарному признаку	Завод изготовитель

В действующей системе технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов можно выделить ряд проблем:

- технологическая недооснащенность ремонтной базы для производства ТО и Р современного подвижного состава;
- отсутствие материально-технического обеспечения для ремонта современного пассажирского подвижного состава;
- наработка подвижного состава на отказ не исключает вероятность внепланового отказа, а так же внеплановых видов ремонта;
- не учтены конструктивные особенности пассажирского подвижного состава в организации уровней технического обслуживания;
- отсутствует возможность прогнозирования уровня готовности в зависимости от уровня пассажиропотоков, интенсивности отказов.

Основная проблема заключалась в действующей инфраструктуре по техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов. Пассажирская инфраструктура не обеспечивала должным образом производство технического обслуживания и ремонта. В настоящее время система технического обслуживания и ремонта не предоставляет возможность оперативно производить оценку эксплуатационной и технической готовности пассажирских вагонов.

Дальнейшее развитие системы технического обслуживания и ремонта в настоящее время является жизненно необходимым для пассажирской инфраструктуры и обеспечения безопасности движения. Реализация сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов позволит:

- технически обоснованно определять сроки и содержание проведения ремонтных работ;
- прогнозировать оптимальные сроки проведения ремонтных работ, а так же прогнозировать загруженность ремонтной базы;
- оптимизировать эффективность управления организацией сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов.

### **1.3 Система технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов за рубежом**

В большинстве стран Европы, а также США, Канаде технического обслуживание и ремонт пассажирского подвижного состава производится сторонними компаниями.

Современный подвижной состав является технически сложным. Изготовители предлагают компаниям-операторам услуги по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов в процессе эксплуатации.

Сервисное техническое обслуживание и ремонт на договорных основах создал основополагающие факторы конкуренции железнодорожного транспортного рынка в части проведения технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов. В ряде стран Евросоюза, а так же Соединенных Штатах Америки, Канаде, приватизация и дерегулирование организации технического обслуживания и ремонта в пассажирской железнодорожной отрасли вынуждают как действующих, так и новых операторов услуг по проведению технического обслуживания и ремонта для поддержания работоспособного состояния подвижного состава иметь соответствующую компетенцию в области технического обслуживания и ремонта.

Компания Siemens Transportation Systems обеспечивает сервисное техническое обслуживание и ремонт в странах Европейского союза в специализированных депо. В октябре 2004 г. компания Siemens Transportation Systems подписала долгосрочный договор на проведение технического обслуживания и ремонта до 2023 г. поездов Heathrow Express и Heathrow Connect.

Для того, что бы сократить время нахождения пассажирского подвижного состава в депо компаний Siemens Transportation Systems принята концепция из автомобильного спорта pit-stop для быстрого определения неисправностей и выполнения комплекса необходимых ремонтных работ, оптимально приспособленных к условиям работы депо.



Согласно принятой Siemens Transportation Systems стратегии полной ответственности за техническое состояние пассажирских вагонов. Работы по проведению сервисного технического обслуживания и ремонта осуществляются по неизменной, согласно заключенного договора стоимости работа. В стоимость производимых работ, так же включена стоимость замены запасных частей. Данный факт связан с рисками для компании, однако, в свою очередь, предоставляет возможность собственнику пассажирского подвижного состава запланировать затраты на весь жизненный цикл эксплуатации подвижного состава. Интерес к сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов собственного изготовления, скоростных и высокоскоростных пассажирских поездов на британском рынке[19].

Аналогично примером сервисного технического обслуживания и ремонта является компания Alston Transport, осуществляя деятельность в Дублине (Ирландия) в части технического обслуживания и ремонта вагонов трамвая. В апреле 2002 г. компания Alston Transport посредством проведения реформирования пассажирской отрасли учредила в Ирландии специализированную производственную инфраструктуру, для обеспечения сервисного обслуживания поездов трамвая в течение жизненного цикла поездов. Контракт на был заключен со специализированной компанией-оператором Connex [20].

Контракт включает в себя: ежедневный осмотр, обмывку и очистку поездов, плановый и внеплановый виды ремонта. В Ирландии виды производимых работ в компании Alston Transport относится капитальный ремонт с модернизацией подвижного состава собственной постройки в Северной Америке.

Примером использования сервисного технического обслуживания и ремонта в Испании является сервисная компания Nertus. Приведенная выше компания является первым примером государственно-частного партнерства в Испании, в которой международная компания и национальный оператор, контролируемый государством объединили свои усилия по созданию сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов [21].

Как показывает зарубежная практика, в последнее время совершаются изменения в договорных отношениях, заключаемые специализированными компаниями на техническое обслуживание и ремонт. Договорные отношения, связанные с обеспечением заданных параметров и объемом услуг на протяжении всего жизненного цикла подвижного состава. Принятый относительно недавно термин MRO (maintenance, repair, overhaul – техническое обслуживание, ремонт, капитальный ремонт/модернизация) обеспечивает плановую техническую готовность пассажирского подвижного состава к эксплуатации, а так же обеспечение проведения плановых видов ремонта в установленные контрактом сроки. Договор определяет точные сроки проведения работ и детально описывает зону ответственности каждого субъекта договора.

Договора по типу MRO традиционно планировались на основе плановой периодичности осмотра и ремонта пассажирского подвижного состава различного объема. В настоящее время на современном подвижном составе все меньше внимания требуется уделять механической части и все больше трудозатрат уделяется электронному оборудованию подвижного состава. Однако, как показывает мировой опыт, в среднем до 40% времени уходит на устранение неисправностей подвижного состава, а не на плановое техническое обслуживание и ремонт.

Опыт зарубежных железнодорожных пассажирских транспортных компаний, показал, что основное внимание в управлении жизненным циклом пассажирских вагонов направлено на отслеживания технического функционирования пассажирского подвижного состава в эксплуатации. Изготовитель пассажирских вагонов дают гарантию не на оговоренный период времени, а на весь жизненный цикл. Данный подход в техническом обслуживании и ремонте включает: отлаженную логистику и гибкость в решении организационных задач по составлению планов технического обслуживания и ремонта в течение всего жизненного цикла пассажирских вагонов.

Открытие рынка услуг по техническому обслуживанию привлекательно с точки зрения повышения прибыльности этой деятельности. Конкуренция – это

хороший стимул для повышения эффективности работы, а контракты со сторонними организациями – это еще и способ проявить собственные способности на рынке. Количественную оценку либерализации железнодорожной системы в ЕС провёл К. Кирхнер в 2002, 2004, 2007 и 2011 гг. [21].

В странах мира достигли обусловленного баланса между государственным и частным секторами, а так же установили положения, гарантирующие высокий уровень технического обслуживания и ремонта, безопасность движения и определение поставщика услуг (оператора). Основным критерием в выборе поставщика услуг (оператора) является показатель исправности пассажирского подвижного состава, т.е. интенсивность отказов подвижного состава, после проведения технического обслуживания или ремонта в сервисном центре.

В таблице 1.3 представлены принципы организационно-управленческого функционирования различных моделей обслуживания и ремонта пассажирских вагонов мира, с учетом структуры собственности и конкуренции в секторе. Рассмотренные методы функционирования доказали свою эффективность в ряде зарубежных стран на протяжении нескольких десятилетий реализации принятых видов конкуренции.

Таблица 1.3 – Методы функционирования моделей ТО и Р

Страна	Инфраструктура	Оператор	Вид конкуренции
Китай, Индия	Государственная	Государство	Межотраслевая
США, Канада	Частная	Смешанная форма собственности	Межотраслевая и внутриотраслевая
Европейский союз	Смешанная форма собственности	Смешанная форма собственности	Межотраслевая и внутриотраслевая

Структурированные данные о практике использования основных методов регулирования технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава в зарубежных странах представлена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные методы регулирования в зарубежных странах

Направление регулирования	Вид регулирования	Страна
1	2	3
Регулирование деятельности частных перевозчиков	– выдача лицензий	Большинство стран Европы, США
	– заключение контрактов	Почти все страны
Виды контрактов с перевозчиками	– контракты на управление	США, Франция
	– контракты по себестоимости	США, Великобритания
	– контракт «издержки плюс»	США
	– контракт «полные издержки плюс стимулы»	США
	– концессии	Швеция, Нидерланды
Наличие гибкой тарифной политики	– билеты действием на несколько часов, дней, поездок, на группу	Европа, США
	– система трансфера	США
	– высокий размер штрафа за безбилетный проезд	США, Европа
Контроль за растущей автомобилизацией	– введение платных дорог	США, Европа

Анализируя приведенные примеры организации системы технического обслуживания и ремонта пассажирских составов, используемые за рубежом, позволяет сделать вывод, о большой адаптивности системы к многообразным условиям эксплуатации подвижного состава.

Сервисное техническое обслуживание и ремонт обеспечивает:

- контрактные взаимоотношения между производителем пассажирского подвижного состава и собственником;
- конкуренцию на рынке услуг по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов;
- прогнозную оценку функционирования системы, влияющую на принятие управленческих решений при эксплуатации пассажирского подвижного состава;
- информационное управление данной системой.

Модель сервисного технического обслуживания и ремонта позволит стать инструментом для достижения поставленных целей Стратегий развития. Сервисное техническое обслуживание и ремонт пассажирского подвижного состава – это комплекс организационных и технических мероприятий, осуществляемых специализированными организациями (заводом-изготовителем) железнодорожного подвижного состава или его составных частей для обеспечения эксплуатации и ремонта железнодорожного подвижного состава [20, 21].

### **Выводы по первой главе**

1. В результате проведенного системного анализа существующей системы организации технического обслуживания и ремонта выявлены изменения в пассажирской инфраструктуре. На современном этапе развития пассажирской инфраструктуры, а так же роста количества современного пассажирского подвижного состава в России необходим аппарат для определения оптимальной организационной структуры предприятий в условиях проведения сервисного технического обслуживания и ремонта.

2. Рассмотрена организационная структура сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава в странах Евросоюза, США и Канады. Предлагается глобальный вид сервиса при технической эксплуатации и ремонте пассажирских вагонов.

3. Формирование научного обеспечения управления техническим обслуживанием и ремонтом заключается в разработке и применении цифровой модели производственного процесса сервисного технического обслуживания и ремонта. Это позволит адаптировать переход технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава к сервисному ТО и Р. Всесторонняя оценка производственных возможностей реализации модели, позволит рационально спланировать и организовать систему сервисного технического обслуживания и ремонта. Поэтому создание цифровой модели позволит обеспечить точность прогнозных оценок параметров эксплуатации и ремонта, обеспечивая эффективность управления жизненным циклом пассажирского подвижного состава в целом.

## **2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРВИСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПАССАЖИРСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Исследования в области организации содержания вагонов и вагоноремонтного комплекса [22–26] установили фундаментальные закономерности, основанные на моделировании систем и процессов, обуславливающие возможность поиска решения данной задачи.

Проводимые исследования в области сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов связаны с развитием промышленной сферы и роста рыночного потенциала. Это связано с повышением производительности пассажирского подвижного состава за счет увеличения времени безотказной работы, с параллельным сокращением инвестиционных затрат.

### **2.1. Функциональная архитектура цифровой модели сервисного технического обслуживания и ремонта**

В настоящее время развитие производственных процессов связаны с появлением и развитием цифровых технологий, специализированных виртуальных платформ и программ, которые подталкивают к изменению структуры и организации производства в целом. Организации как частного, так и государственного сектора предпринимают попытки исследования передовых технологий и внедрения их в производственный процесс. Данные исследования связаны с изменением бизнес-операций компаний, в частности внося изменения в производственные процессы, структуру и концепции управления предприятиями. Данные изменения в первую очередь влияют на организационную структуру предприятий.

Исследование, интеграция и эксплуатация современных цифровых технологий в производственных процессах становится актуальной задачей для развития

предприятий. Для обеспечения перехода и внедрения цифровых технологий применим термин «Цифровая трансформация».

Цифровая трансформация – это процесс, охватывающий переход от традиционной формы организации производства к созданию цифровой модели различных производственных процессов.

Влияние цифровой трансформации в организации производственных процессов при проведении технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов позволит определить динамику изменения структуры производства, а также способность адаптации существующей системы к цифровизации процессов.

Способность организации или производственной структуры принять стратегию цифровой трансформации зависят от конкурентоспособности предприятия, а также её технической и технологической готовности. Исследования S.J. Andriole [27] утверждает, что цифровые технологии и их внедрение являются ключевой движущей силой развития предприятий.

Основываясь на эволюции информационно-коммуникационных технологий – переход к «цифровой экономике» получена взаимосвязь через реальные и виртуальные объекты и процессы [28]. Цифровая трансформация обеспечит беспрепятственный обмен информацией, возможность быстрой её обработки и как следствие – возможность принятия управленческих решений позволит организациям соответствовать быстро развивающимся технологиям в глобальном рынке.

По мере развития цифровых технологий, создание современных подходов проектирования цифровых производств, развитие методов проектирования цифровой трансформации позволяют создавать переход существующих предприятий из офлайн-среды в онлайн. Данное развитие приводит к созданию новой формы деятельности производственных структур в виде цифровых моделей предприятий. Введем понятие цифровой модели предприятия.

Цифровая модель предприятия – это цифровое описание организационной структуры предприятия с детальным воссозданием технологического процесса,



позволяющее контролировать и оценивать производственные процессы в режиме реального времени.

Цифровая модель предприятия по проведению сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов должна включать в себя:

- цифровой двойник пассажирского подвижного состава;
- цифровой двойник технологического процесса проведения технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов;
- цифровой двойник структурного подразделения на полигоне железной дороги;
- цифровой двойник управления, включающий анализ жизненного цикла и эксплуатационных данных пассажирского подвижного состава.

Цифровая модель сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов как трансформация стратегии от диагностической к прогнозирующей. Моделирование служит фундаментальной отправной точкой в управлении жизненным циклом пассажирского подвижного состава.

На концептуальном уровне фундаментальные аспекты цифровой модели сервисного обслуживания для прогнозирования будущих событий и составления оптимальных планов с учетом многомодальности и структурной неоднородности данных в виртуальных сетях.

Создание специализированной цифровой платформы для беспрепятственного обмена информацией, возможности быстрой ее обработки и как следствие – возможность принятия управленческого решения позволит организациям соответствовать быстро развивающимся технологиям в глобальном рынке.

Одно из решений данной задачи – сервисное техническое обслуживание и ремонт пассажирских вагонов на основе создания цифровой модели с целью многоцелевого подхода оптимизации и принятия управленческих решений. Как следствие необходима проработка функциональной архитектуры цифровой модели предприятия.

Описание функциональной архитектуры цифровой модели сервисного технического обслуживания и ремонта служит представлено на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Функциональность цифровой модели сервисного технического обслуживания и ремонта

Трехуровневая архитектура цифровой модели представлена следующим образом:

1. Уровень предприятия: необходим для сбора данных от пограничных узлов через активы, датчики и шлюзы, о загрузке производственных подразделений, уровень запаса запасных частей, технологическая нагрузка на предприятии. Информация формируется в базе данных (управление базой данных).

2. Уровень платформы СТОиР: получает, обрабатывает и пересылает команды управления с уровня предприятия на уровень собственника, производя расчеты в соответствии с запросами собственника. Данный уровень выполняет вычисления согласно заложенному алгоритму, а так же помощь в принятии

управленческих решений для собственника подвижного состава. Так же производится мониторинг данных, аналитика активов.

3. Уровень собственника: реализует приложения домена, через систему для принятия управленческих решений и предоставляет конечным пользователям интерфейсы для реализации функциональных возможностей (управление подвижным составом, управление цепью поставок подвижного состава на техническое обслуживание и ремонт, планирование ресурсов, планирование инвестиционных вложений).

Функциональные домены сгруппированы следующим образом:

1. Сеть предприятий: объединяет исполнительные механизмы, устройства, системы управления и активы с шлюзом, который соединяет с другими сетями (сервисными предприятиями) и позволяет передавать данные и управлять потоком между ними.

2. Доступ в сеть: обеспечивает связь для потоков данных и управления между сетью предприятий и уровнем платформы СТОиР;

3. Сервисная сеть (облако): обеспечивает подключение (обычно с использованием протоколов безопасности транспортного уровня) между службами платформы СТОиР и уровнями собственника подвижного состава.

Цифровая модель так же включает в себя следующие положения:

– облако общего пользования: включает в себя компоненты, необходимые для интеграции производственных процессов корпоративного уровня (моделирование процессов, анализ данных, планирование производственной деятельности);

– частное облако: представляет собой основной функционал, включающий в себя управление и сохранение эксплуатационных и сервисных данных, адаптацию запланированных мероприятий к событиям, происходящим в реальном времени на производстве, а так же помощь в принятии управленческих решений в производственных процессах.

## **2.2. Методологические основы формирования сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава**

Пассажирский вагон обладает рядом специфических технических характеристик, основанных на оригинальных конструктивных и технологических решениях. Последствия отказа пассажирского подвижного состава вызывают незапланированный простой, вызывая как следствие: снижение производительности, безопасности движения и качества обслуживания, а так же финансовые потери.

Система сервисного технического обслуживания и ремонта железнодорожного подвижного состава – это комплекс организационных, технических и инженерных мероприятий, повышающая эффективность пассажирского комплекса, которые осуществляются производителем, либо частной компанией-оператором по доверенности, с целью обеспечения стабильности работы в течение всего срока эксплуатации пассажирского вагона [29]. Научное обеспечение в настоящее время не обеспечивает возможность прогнозирования уровня готовности при установленных лимитах финансирования, уровня пассажиропотоков, интенсивности отказов.

Существующие методики оценки жизненного цикла пассажирского подвижного состава [30, 31], а так же отсутствие моделей (аналитических, имитационных) технического обслуживания и ремонта не обеспечивают возможности связывать такие факторы как: временные простои подвижного состава, интенсивность отказов и восстановления. В следствии чего, не предоставляется возможность получить точные прогнозные оценки жизненного цикла пассажирского подвижного состава. Имеющиеся модели и методики управления запасными частями подвижного состава по определению оптимального уровня материальных средств не имеют общей связи в одну комплексную модель системы по оценке жизненного цикла.

Средством повышения эффективности пассажирского подвижного состава является переход к сервисному обслуживанию, с учетом необходимости поддер-

жания определенного уровня готовности подвижного состава, обеспечивающее получение точных оценок потребного технического обслуживания и ремонта и объемов финансирования.

Для оптимизации предлагается проводить моделирование системы, которая подразумевает имитацию сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава. Таким образом, созданная симуляция представляет собой цифровую модель предприятия, позволяющую многократно проигрывать различные производственные сценарии, облегчая оценку и прогнозирование системы сервисного технического обслуживания и ремонта.

Математическое моделирование позволяет решать задачи различной сложности, обеспечивая многообразие технологического процесса с различным количеством элементов рассматриваемой модели, включая функциональные зависимости и эффективно применяется в задачах исследования систем сложной структуры для поиска оптимального решения [32–34].

Зарубежные ученые в основе модели планирования технического обслуживания используется вероятность отказов технических средств в определенный момент времени. Модель строится на: планировании производственной мощности, закупке запасных частей, определении интервала технического обслуживания и ремонта. Исследования Pierskalla и Voelker [35], Osaki и Nakagawa [36], Sherif и Smith [37], Valdez-Flores и Feldman [38], Cho и Parlar [39] проводились с целью поиска оптимальных технологических и производственных ресурсов, направленные на поддержание пассажирских вагонов в технически исправном состоянии. В том числе, исследования проводились с целью определения обоснованного технически и экономически оптимальной организационно-управленческой структуры организации производства. Зарубежные ученые выделяют традиционные методы по решению проблем через линейное и динамическое программирование, стохастические модели и анализ текущих значений.

Campbell [40] в своих исследованиях неоднократно утверждает, что нет наилучшего технического обслуживания пассажирских вагонов. Разработка и

наладка оптимальной стратегии технического обслуживания позволят рационально распределять технологические ресурсы, в зависимости от текущей ситуации в отрасли. Исходя из анализа, вышеперечисленных исследований следует вывод о том, что организация технического обслуживания и ремонта в плане организационно-управленческих решений должна быть гибкой и изменяться, подстраиваясь под новые условия развития отрасли [40].

Ученые в России уделяют в своих научных работах основываются на реализации математических методов для решения поставленных задач в организации и управления техническим обслуживанием и ремонтом подвижного состава. Широкое применение статистических методов с привлечением математического аппарата теории массового обслуживания, теории случайных процессов, по размещению вагоноремонтных предприятий на сети железных дорог, отражены в работах В.В. Цыганова, Н. Ф. Сириной, М.М. Болотина [24, 33].

Одним из эффективных направлений в решении организации технического обслуживания и ремонта в современных условиях являются статистические методы с привлечением математического аппарата теории массового обслуживания, а так же метод сетевого планирования управления, основанный на теории графов. В основу закладываются математический аппарат состояния пассажирского вагона в системе технического обслуживания и ремонта, так как он в большей степени определяет содержание системы сервисного обслуживания и результат [41, 42], так как эксплуатация пассажирского подвижного состава по своей продолжительности является важной стадией жизненного цикла.

Метод сетевого планирования и управления, основанный на применении теории графов получил массовое использование в тех сферах производственной деятельности, которые напрямую связаны с планированием, организацией и контролем состава сложных комбинированных работ. Сетевое планирование – это совокупность методов, использующих сетевую модель, как основную форму представления информации об исследуемом (управляемом) комплексе работ.

Разработка модели сервисного технического обслуживания и ремонта достигается путем решения следующих задач:

- условия эксплуатации пассажирского подвижного состава, в течении всего жизненного цикла;
- определение методов и технологий выполнения сервисного технического обслуживания и ремонта подвижного состава с оценкой трудоемкости и продолжительности производимых работ;
- определение формы, объемов, условий постоянного сервисного технического обслуживания и ремонта подвижного состава, а так же содержание «послепроизводственного обеспечения» деятельности компаний-операторов после прекращения гарантийного обслуживания;
- разработка критериев оценки результативности разработанной системы в части выполнения заданных эксплуатационно-технических характеристик, на основе жизненного цикла пассажирского подвижного состава.

Разработка модели сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов основана на рассмотрении деятельности системы как самостоятельных организационно-структурных подразделений, взаимосвязанных между собой. Описание функционирования подсистем внутри подразделений, а так же структура их взаимодействий рассматривается как системный подход, который позволит детально описать, как функционирует предприятие [43–45].

Планирование организации цифрового производства по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов включает в себя разработку стратегии по планированию объемов производимых работ с подвижным составом, а так же мониторинг производительности на предприятии (группе предприятий). Особенностью формирования предлагаемой стратегии заключается в разработке целостной системы управленческих решений с учётом производственных возможностей предприятия (группы предприятий).

Представление стратегии структуры сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава представлена на рисунке 2.2.

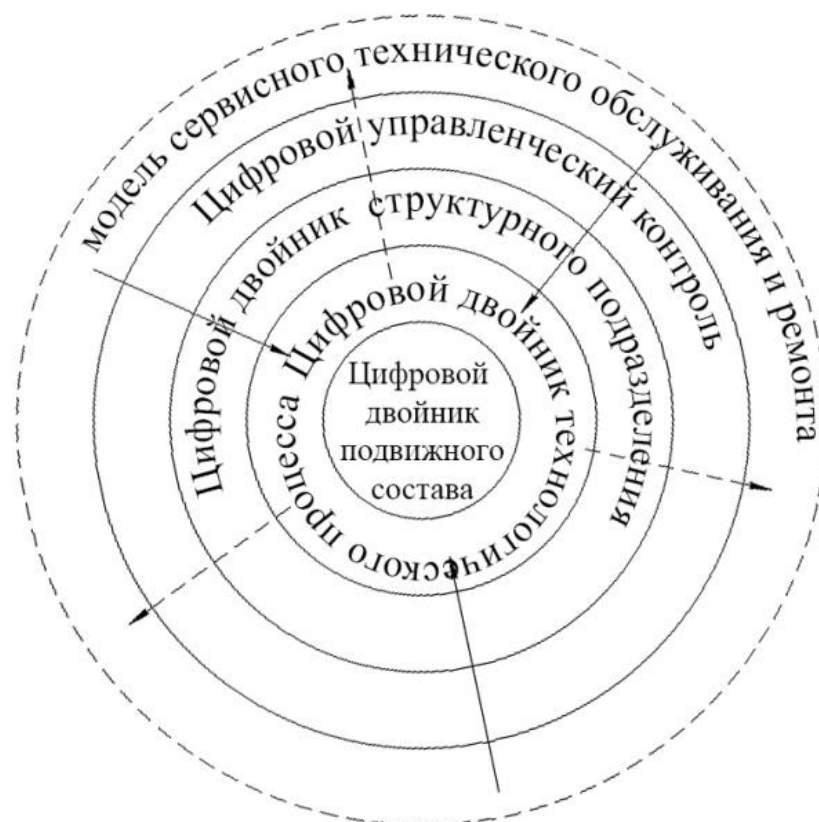


Рисунок 2.2 – Структура сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава

В результате представленной группировки составляющих структуру сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава, являются сегменты, состоящие из четырех уровней. Потoki информации между сегментами входящие и исходящие реализовываются посредством управленческого контроля.

1. Ядром разрабатываемой модели, и первым уровнем является «Цифровой двойник подвижного состава». Данный сегмент включает в себя цифровую копию жизненного цикла пассажирского подвижного состава.

Ядро включает в себя совокупность последовательно реализуемых процессов при эксплуатации пассажирского подвижного состава, а так же установленные к нему требования по сроку эксплуатации, включая виды регламентируемых профилактических и ремонтных работ.



Информационное взаимодействие с сегментами другого уровня в течение жизненного цикла пассажирского подвижного состава, регламентируется нормативно-технической документацией завода-изготовителя, с целью оптимизации планирования и управления в период эксплуатации.

2. Вторым сегментом разрабатываемой модели является «Цифровой двойник технологического процесса». Данный сегмент представляет собой виртуальную копию технологического процесса.

Сегмент «Цифровой двойник технологического процесса» описывает технологический процесс. Данный сегмент зависит от типа эксплуатируемого пассажирского подвижного состава, а так же требований, предъявляемых к нему заводом-изготовителем.

3. Третий сегмент – «Цифровой двойник структурного подразделения». Данный сегмент представляет собой копию структурного подразделения на полигоне железной дороги, либо сервисного центра.

Данный сегмент виртуально описывает полный производственный цикл структурного подразделения. Сегмент включает в себя: структурную организационную сеть на полигоне железной дороги, логистику подачи пассажирского подвижного состава в плановые и неплановые виды ремонта, с целью оптимизации загрузки производственных мощностей структурной организационной сети.

4. Четвертый сегмент – «Цифровой управленческий контроль». Цифровой управленческий аппарат разрабатываемой модели является сложной структурой. Данный сегмент проводит оценку входящей и исходящей информации между сегментами. Данная информация (поток отказов пассажирского подвижного состава, местоположение подвижного состава, производственная мощность организационной сети/предприятия, финансовые потоки и т.д.) оцениваются, производится выбор оптимального варианта в каждом рассматриваемом варианте событий и производится постановка управленческих решений. В данном сегменте производится постоянный контроль и анализ данных, формируется база данных

на каждый пассажирский подвижной состав с целью прогнозной оценки по эксплуатации определенного состава поезда.

Модель сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава включает в себя множество сложных вопросов. Задача сервисного технического обслуживания и ремонта состоит в поддержании пассажирского подвижного состава в исправном работоспособном состоянии при минимальных инвестиционных вложениях.

### **2.3. Математическая модель сервисного технического обслуживания и ремонта**

Стратегия клиентоориентированного подхода подразумевает предоставление к перевозкам технически исправного пассажирского подвижного состава. Выполнение качественного технического обслуживания и ремонта современного подвижного состава напрямую влияет на качество предоставляемых услуг, а также удовлетворенность пассажиров. Использование высокоскоростного транспорта увеличивает конкурентоспособность железнодорожного транспорта и соответственно привлекает новый пассажиропоток.

Увеличение эффективности управления технологическим процессом технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов может быть достигнут путем организации работы сервисного обслуживания.

Математическое обеспечение – это совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач рациональной организации технологических процессов.

Математическое моделирование технологических процессов ставит своей целью получение данных о «качестве» процесса без трудоемких экспериментальных исследований методом проб и ошибок, на большом массиве условий экспе-

римента. Важнейшая часть математической модели – наличие условий, которые должны соблюдаться в ходе решения задачи.

Среди множества методов математического моделирования можно выделить следующие Марковские процессы, интенсивно используемые для описания динамических и стохастических характеристик процессов эксплуатации [46–48]. Тем не менее, данные модели не способны достаточно точно отразить широкий круг вопросов с соответствующими случайными распределениями. Неэкспоненциальное временное распределение между дискретными состояниями системы не могут быть смоделированы. Вместо этого, экспоненциальное распределение с одинаковым средним значением могут быть использованы для аппроксимации неэкспоненциальности с распределением времени в системе.

Рассматривая систему сервисного технического обслуживания и ремонта, состоящую более чем из одного блока получим стохастически независимую друг от друга. Тогда оптимальное решение для сервисного технического обслуживания или сервисного ремонта не будет являться оптимальным для всей рассматриваемой системы. Сложность системы, состоящей из нескольких блоков, ставит задачу разработки математической модели в рамках Марковской цепочки для принятия управленческих решений. В вагонном хозяйстве широко применялись статистические методы с привлечением математического аппарата теории массового обслуживания [49–51].

Процесс организации производственных процессов можно представить как метод сетевого планирования и управления, основанную на теории графов. Использование и реализация теории графов предоставляет возможность визуализировать процесс планирования и управления в производственной деятельности, обеспечивая в свою очередь минимальные трудозатраты при составлении графоаналитической модели.

Графоаналитическое представление процесса планирования и управления технологическими процессами представляет собой сетевое планирование. Сетевое планирование имеет весьма обширное распространение в производственных сфе-

рах деятельности. Данный аспект позволяет спланировать производственную структуру, а так же контролировать комплекс производимых работ.

Сетевое планирование представляет собой совокупность методов, использующих графоаналитическую визуализацию процесса, как основную форму представления информации о проектируемом производственном процессе.

Сетевое планирование производственных процессов визуализируется на основе специального ориентированного графа событий производственного процесса (комплекса работ). В общем виде сетевая графоаналитическая модель представлена как сетевая структура комплекса работ [52–54].

Основными элементами сетевого графика являются:

- состояние пассажирского вагона в соответствии с теорией надежности, обозначены вершинами –  $\circ$ ;
- возможность перехода из одного технического состояния пассажирского вагона в другой, изображены дугами –  $\rightarrow$ .

Пассажирские вагоны в ходе эксплуатации расходуют свой технический ресурс и переходят в неисправное, неработоспособное или предельное технические состояния. Технические состояния пассажирского вагона в системе технического обслуживания и ремонта представлены в виде графоаналитической модели (рисунок 2.3). Система сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов представляет собой взаимодействие пассажирского вагона и системы обслуживания. В соответствии с теорией надежности пассажирские вагоны имеют следующие виды состояний, используемые в графоаналитической модели:

- $S_0$  – исправное работоспособное;
- $S_1$  – неисправное работоспособное;
- $S_2$  – неработоспособное неисправное;
- $S_3$  – предельное, восстанавливаемое при текущем ремонте;
- $S_4$  – предельное, восстанавливаемое при ДР или КР;
- $S_5$  – предельное не восстанавливаемое;
- $P_i$  – вероятность состояний вагона.

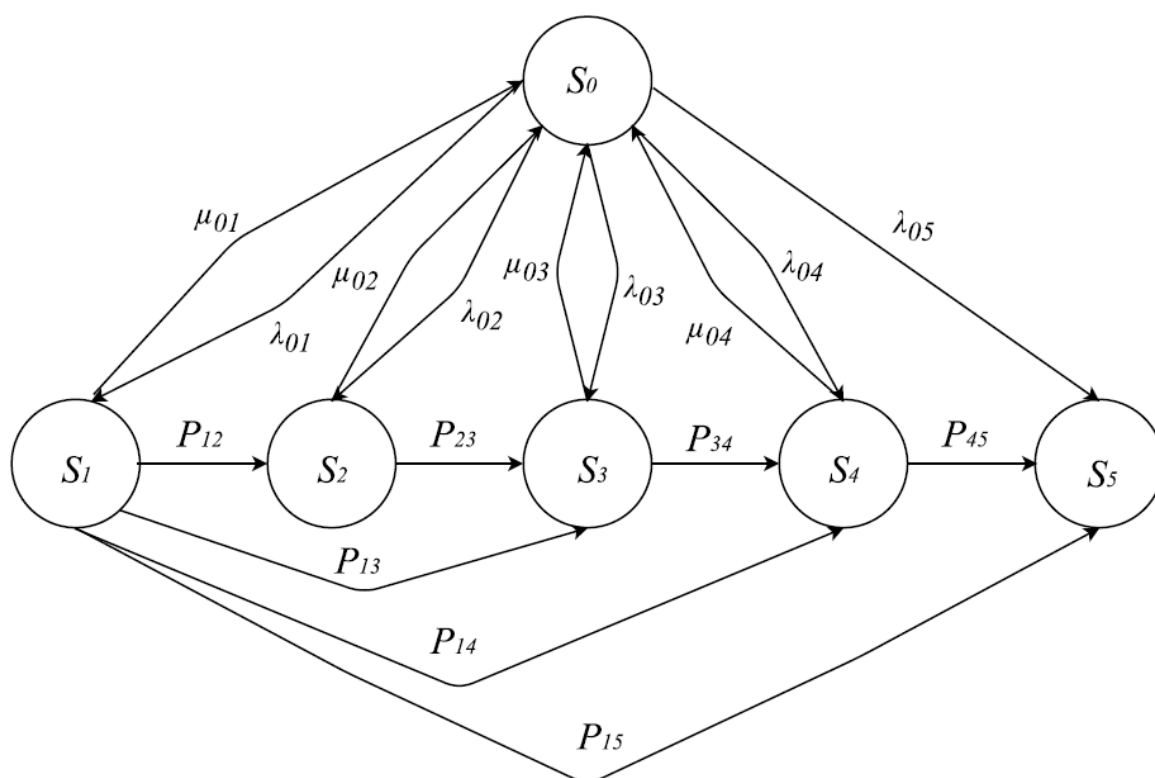


Рисунок 2.3 – Графоаналитическая модель состояний пассажирского вагона в системе сервисного технического обслуживания и ремонта

Поддержание пассажирского вагона в работоспособном состоянии включает в себя как материальных и трудовых ресурсов. Переход вагона из одного состояния в другой происходит под действием определенных факторов в ходе эксплуатации.

Так как в определенный момент времени  $T$  эксплуатируется большое количество пассажирских вагонов, а отказы технических средств представляют собой случайные события в соответствии с теорией вероятности, то для описания системы сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов целесообразно применять систему массового обслуживания. С одной стороны система массового обслуживания позволит визуализировать процесс эксплуатации пассажирских вагонов, с другой ее параметры могут быть определены по статистическим данным. В описанной графоаналитической модели переход из одного состояния в другой зависит от воздействия внешней среды в период эксплуата-

ции, с учетом вероятности нахождения пассажирского вагона в определенном состоянии системы.

На графе обозначены:  $\lambda$  – интенсивность отказов,  $\mu$  – интенсивность восстановления. Интенсивность подачи неисправных вагонов зависит от следующих факторов: результатов диагностики подвижного состава; техническое обслуживание и ремонт, выполняемый компанией-собственником; техническое обслуживание и ремонт, выполняемый компанией-изготовителем (компанией-оператором).

Интенсивность отказов пассажирских вагонов зависит от:

- результатов диагностики в период эксплуатации;
- качества и периодичности проводимых ремонтных работ;
- от предприятия, выполнявшего ремонтные работы.

Введем параметр  $\alpha$ , характеризующий часть пассажирских вагонов, ремонт которых производит завод-изготовитель. Тогда интенсивность отказов, подлежащих ремонту заводом-изготовителем, зависит от общего количества пассажирских вагонов, ремонтируемых заводом примет вид:

$$\lambda_S = (1 - \alpha) \cdot \lambda, \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  – доля пассажирских вагонов, ремонтируемых заводом-изготовителем;

$\lambda$  – общая интенсивность отказов пассажирских вагонов.

Поток пассажирских вагонов, подлежащих ремонту компанией-изготовителем,  $\lambda_S$  является сложным и включает в себя два потока:

1 – поток, определяемый отказами;

2 – поток пассажирских вагонов, направляемый в ремонт по истечении межремонтного срока службы.

Исходя из этого, функция интенсивности представляет собой импульсную функцию с параметрами  $\eta$  и  $\tau$ .

$$\eta \cdot \delta(t - k\tau), \quad (2.2)$$

где  $\eta$  – доля пассажирских вагонов, подлежащих капитальному (деповскому) ремонту заводом-изготовителем;

$\tau$  – периодичность выхода пассажирских вагонов на капитальный ремонт.

Таким образом, интенсивность потока пассажирских вагонов, подлежащих ремонту заводом-изготовителем определяется как

$$\lambda_5(t) = \alpha \cdot \lambda + \eta \cdot \delta(t - k\tau), \quad (2.3)$$

$$(k=1,2,\dots).$$

В соответствии с графом состояний (рисунок 2.3) выпишем систему уравнений для пассажирских вагонов, находящихся в различных состояниях.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dn_0(t)}{dt} = -\lambda_{01}n_0(t) + \mu_{10}n_1(t) - \lambda_{02}n_0(t) + \mu_{20}n_2(t) - \lambda_{03}n_0(t) + \mu_{30}n_3(t) - \\ -\lambda_{04}n_0(t) + \mu_{40}n_4(t) - \lambda_{05}n_0(t); n_0(0) = N_0; \\ \frac{dn_1(t)}{dt} = \lambda_{01}n_0(t) - \mu_{10}n_1(t); n_1(0) = N_1; \\ \frac{dn_2(t)}{dt} = \lambda_{02}n_0(t) - \mu_{20}n_2(t); n_2(0) = N_2; \\ \frac{dn_3(t)}{dt} = \lambda_{03}n_0(t) - \mu_{30}n_3(t); n_3(0) = N_3; \\ \frac{dn_4(t)}{dt} = \lambda_{04}n_0(t) - \mu_{40}n_4(t); n_4(0) = N_4; \\ \frac{dn_5(t)}{dt} = \lambda_{05}n_0(t); n_5(0) = N_5; \\ n_0(t) + n_1(t) + n_2(t) + n_3(t) + n_4(t) + n_5(t) = N(t). \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Система уравнений (2.4) по своей составляющей не имеет внешних входящих потоков интенсивности отказов и восстановления. В следствии чего, данная система уравнений является замкнутой, в которой общее количество пассажир-

ских вагонов  $N(t)$ , в описанных технических состояниях, согласно графоаналитической модели, является постоянной величиной.

Далее разработанную систему дифференциальных уравнений (2.4) представим в виде дискретного процесса с интервалом дискретизации  $\Delta t$ , необходимый для обеспечения условий расчетной точности. Учитывая, что наименьший период отчетности вагоноремонтных предприятий составляет один месяц, целесообразно принять  $\Delta t = 1$  мес.

$$t = 1, 2, \dots, T$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = n(t) - n(t-1), \quad (2.5)$$

В результате получаем систему разностных уравнений (2.4) дискретного процесса

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1(t + \Delta t) = \lambda_{01} \Delta t \cdot n_0(t) - \mu_{10} \Delta t \cdot n_1(t); n_1(0) = N_1; \\ \frac{dn_2(t)}{dt} = \lambda_{02} \Delta t \cdot n_0(t) - \mu_{20} \Delta t \cdot n_2(t); n_2(0) = N_2; \\ \frac{dn_3(t)}{dt} = \lambda_{03} \Delta t \cdot n_0(t) - \mu_{30} \Delta t \cdot n_3(t); n_3(0) = N_3; \\ \frac{dn_4(t)}{dt} = \lambda_{04} \Delta t \cdot n_0(t) - \mu_{40} \Delta t \cdot n_4(t); n_4(0) = N_4; \\ \frac{dn_5(t)}{dt} = \lambda_{05} \Delta t \cdot n_0(t); n_5(0) = N_5; \\ n_0(t) + n_1(t) + n_2(t) + n_3(t) + n_4(t) + n_5(t) = N(t). \end{array} \right. \quad (2.6)$$

где  $\lambda \Delta t$  и  $\mu \Delta t$  – вероятность перехода из одного технического состояния пассажирского вагона в другое за промежуток времени  $\Delta t$ .



При этом интенсивность отказов ( $\lambda$ ) определяется по статистике отказов пассажирского подвижного состава по следующей формуле

$$\lambda = \frac{n(t) - n(t-1)}{N - n(t-1)}. \quad (2.7)$$

Динамика вероятностей  $P_k(t)$  состояний в разработанной графоаналитической модели описывается системой дифференциальных уравнений (формула 2.8). Расчеты динамики вероятности состояний графоаналитической модели технических состояний пассажирского вагона приведены в приложении А.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_k}{dt} = -(\lambda + k\mu)P_k + \lambda P_{k-1} + (k+1)\mu P_{k+1} \\ \quad \quad \quad 0 \leq k \leq n \\ \frac{dP_k}{dt} = -(\lambda + k\mu)P_k + \lambda P_{k-1} + n\mu P_{k+1} \\ \quad \quad \quad 0 \leq k \leq s \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Для наиболее оптимального варианта описание математическим аппаратом графоаналитической модели включены следующие потоки информации: поток заявок (интенсивность отказов, плановые виды ремонта пассажирских вагонов); поток обслуженных заявок (интенсивность восстановления пассажирских вагонов). С целью дальнейшей верификации математической модели, а так же для обеспечения точности производимых вычислений, будет использоваться статистическая набор данных по отказам пассажирских вагонов.

Интенсивность ремонта пассажирских вагонов заводом-изготовителем  $\mu_s$  зависит от времени технического обслуживания единицы подвижного состава и определяется как

$$\mu_s = \frac{\Delta u}{n_n(t) \cdot \left( \Delta t + \frac{2d}{v} \right)}, \quad (2.9)$$

где  $\Delta u$  – объем произведенного ремонта компанией-изготовителем за время  $\Delta t$ ;

$\frac{2d}{v}$  – время, затраченное на доставку и обратно к месту эксплуатации.

Так как интенсивность отказов  $\lambda$  определяется по статистическим данным, иногда определить их точные и достоверные значения является затруднительным в виду отсутствия полной исходной информации. В этом случае представим интенсивность отказов  $\lambda$  в виде ограниченных интервалов неопределенности  $[\lambda_i] = [\underline{\lambda}_i | \lambda_i \leq \lambda \leq \bar{\lambda}_i]$ , которые задаются верхней и нижней границей интенсивности отказов (рисунок 2.4). Середину интервала  $[\lambda_i]$  определим по формуле:

$$mid[\lambda_i] = \frac{(\underline{\lambda}_i + \bar{\lambda}_i)}{2}, \quad (2.10)$$

Сам интервал  $\Delta_i$  рассчитывается как разность верхней и нижней границ интервала (рисунок 2.4).

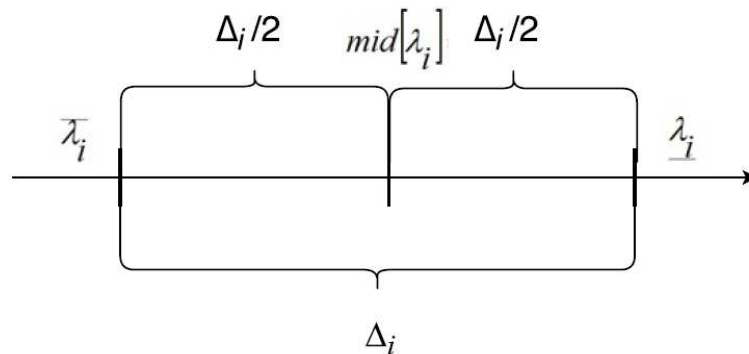


Рисунок 2.4 – Интервальный параметр  $[\lambda_i]$  на числовой прямой

Параметры ошибок в исходных данных могут колебаться в широких пределах. Неопределенность исходных данных может иметь различные источники и природу возникновения. Использование интервального метода даст ясность в области неопределенности и предоставит основание сделать заключение о целесообразности сервисного технического обслуживания пассажирского подвижного состава.

Представляя интенсивность отказов  $\lambda_i$  в виде  $[\lambda_i] = [\underline{\lambda}_i, \overline{\lambda}_i]$ , система дифференциальных уравнений (2.11) дополняется системой интервальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} [n_0(t)] = (1 - [\lambda_{01}\Delta t])n_0(t-1) + \mu_{10}\Delta t \cdot n_0(t-1) - [\lambda_{02}\Delta t]n_0(t-1) + \\ + \mu_{20}\Delta t \cdot n_2(t-1) - [\lambda_{03}\Delta t]n_0(t-1) + \mu_{30}\Delta t \cdot n_3(t-1) - [\lambda_{04}\Delta t]n_0(t-1) + \\ + \mu_{40}\Delta t \cdot n_4(t-1) - [\lambda_{05}\Delta t]n_0(t-1); n_0(0) = N_0; \\ [n_1(t)] = (1 + [\lambda_{01}\Delta t])n_0(t-1) - \mu_{10}\Delta t \cdot n_1(t-1); n_1(0) = N_1; \\ [n_2(t)] = (1 + [\lambda_{02}\Delta t])n_0(t-1) - \mu_{20}\Delta t \cdot n_2(t-1); n_2(0) = N_2; \\ [n_3(t)] = (1 + [\lambda_{03}\Delta t])n_0(t-1) - \mu_{30}\Delta t \cdot n_3(t-1); n_3(0) = N_3; \\ [n_4(t)] = (1 + [\lambda_{04}\Delta t])n_0(t-1) - \mu_{40}\Delta t \cdot n_4(t-1); n_4(0) = N_4; \\ [n_5(t)] = (1 + [\lambda_{05}\Delta t])n_0(t-1); n_5(0) = N_5; \\ [n_0(t)] + [n_1(t)] + [n_2(t)] + [n_3(t)] + [n_4(t)] + [n_5(t)] = [N(t)]. \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Полученная система уравнений позволит проводить анализ в условиях неопределенности данных в рассматриваемый период времени. В рассматриваемом случае интенсивность восстановления пассажирского подвижного состава представляет собой разрывную функцию (рисунок 2.5). В этом случае процесс сервисного обслуживания носит нестационарный и колебательных характер, который в большей степени влияет на показатели эффективности обслуживания.

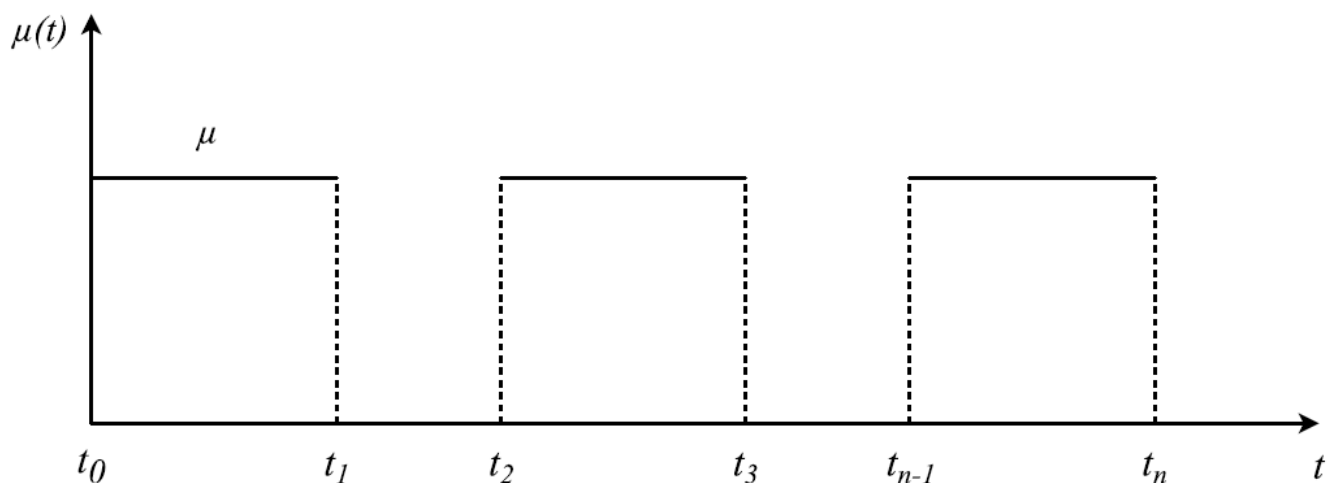


Рисунок 2.5 – График импульсной функции интенсивности восстановления

Функция интенсивности восстановления примет вид:

$$\mu(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\bar{T}_p} \\ t > t_{\min} \end{cases} \quad (2.12)$$

где  $t_{\min}$  – минимальное время ремонта по определенному типу;

$\bar{T}_p$  – среднее время ремонта;

$\beta$  – коэффициент увеличения интенсивности восстановления ( $\beta \geq 1$ ).

Минимальное время ремонта определяется типом неисправности пассажирского подвижного состава. Коэффициент увеличения интенсивности восстановления зависит не только от типа неисправности, но и от условий проведения ремонта подвижного состава.

Для расчетов нестационарных потоков интенсивность отказов и интенсивность восстановления усредняются на интервале времени  $T$ , характеризующее условия работы системы массового обслуживания с учетом внешних факторов. В данном случае в системе дифференциальных уравнений (2.11) используются средние значения интенсивности отказов и интенсивности восстановления.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda(t) dt. \quad (2.13)$$

$$\bar{\mu} = \frac{1}{T} \int_0^T \mu(t) dt. \quad (2.14)$$

Разработанная математическая модель представляет интерес тем, что для нее существует стационарное решение описанной системы дифференциальных уравнений (2.7) [92].

В настоящее время инструменты планирования являются статическими [55, 56]. Они не учитывают динамическую информацию в процессе жизненного цикла подвижного состава. Средства планирования в основном представляют собой копию руководства по организации технического обслуживания и ремонта [57–59].

Сервисное техническое обслуживание и ремонт пассажирского подвижного состава ведет к эволюции и трансформации стратегий от диагностических к прогнозирующим и предписывающим видам ТО и Р. На концептуальном уровне разработаны фундаментальные аспекты модели сервисного обслуживания для прогнозирования будущих событий и составления оптимальных планов с учетом многомодальности и структурной неоднородности данных [60, 61].

Модель сервисного технического обслуживания представлена как система с  $n$  компонентами. Время моделирования дискретизируется с помощью времени выборки  $\varepsilon$ . Модель рассматривается на каждую дату проверки  $T_n = k\tau$ , где  $k \in N$  (количеству подвижного состава);  $\tau$  – период оценки системы.

Износ компонентов подвижного состава представим в виде физической переменной  $W_i$  с  $i = \{1, \dots, n\}$ . Предположим, что на каждую дату проверки  $T_n$  уровня износа компонентов описывается гамма-процессом. Данный тип описывает постоянный и монотонный износ. Гамма функция принимает вид:

$$\gamma = \int_0^{+\infty} u^{q-1} \exp(-u) du. \quad (2.15)$$

Вероятность отказа определяется по формулам:

$$P_i(t) = P(W_i(t) \geq W_{ip}). \quad (2.16)$$

$$P_i(t) = \frac{\gamma(\alpha t, \beta(W_{ip}) - W_i(0))}{\gamma(\alpha t)}. \quad (2.17)$$

Каждая стоимость замены и установки рассматривается как комбинация фиксированной стоимости замены  $C_3$  и стоимости обслуживания  $C_o$ . Стоимость замены включает в себя стоимость простоя подвижного состава, а так же производственные потери за время ремонта  $T_p$ , тогда

$$C_o = C_{oi}, \forall t < T_p. \quad (2.18)$$

Определим, что количество  $m$  операций  $i$  по техническому обслуживанию и ремонту поддерживаются в индивидуальное, оптимальное время  $\theta_i$  на конечном временном интервале. Затраты на обслуживание состава поезда  $J_i$  будет представлять собой сумму затрат  $C_3$  и  $C_o$ .

$$J_i = \sum_{j=1}^u C_o(\theta_i) + m \cdot C_3, \quad (2.19)$$

Предположим, что существует группирующая структура проведения технического обслуживания и ремонта, тогда затраты примут вид

$$J_i = \sum_{j=1}^u \sum_{i \in J} (t'_j) C_o(\theta_i) + m \cdot C_3, \quad (2.20)$$

где  $t'_j$  – оптимальная дата проведения ТО и Р.

Представленная модель основана на обновлении функции вероятности отказа на интервале времени  $T_n$ . Модель позволит определять оптимальные даты проведения плановых видов работ.

Определив  $\mathcal{G}'_i$  оптимальный срок эксплуатации подвижного состава. На временной диаграмме планирования предполагается, что решение является стационарным,  $\mathcal{G}'_i$  представляет собой дату, при которой средняя стоимость проведения технического обслуживания или ремонта подвижного состава в единицу времени будет минимальной (рисунок 2.6).

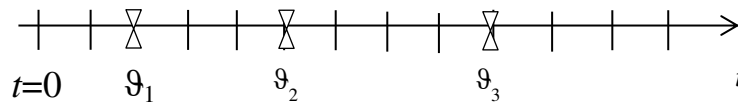


Рисунок 2.6 – Даты проведения ТО и Р на временной диаграмме

Средняя стоимость оптимального проведения ТО и Р определяется по формуле

$$\bar{C} = \frac{C_s + C_o + b_i \cdot (1 - \Pi^{t-1} P_i(W_i))}{1 + \sum_j^t \Pi^{t-2} P_i(W_i)} \quad (2.21)$$

$$\frac{d\bar{C}}{dt} (\mathcal{G}'_i | W_i) = 0$$

Горизонт планирования (рисунок 2.7) определяется в соответствии с датой проверки  $T_n$  и оптимальными данными обслуживания  $\mathcal{G}'_i$  на интервале от 1 до  $n$ . При определении  $n$  компонентов системы учитываются для принятия управленческих решений по проведению ТО и Р.  $ГП = \left[ 0, \max_{i \in (1, \dots, n)} \mathcal{G}'_i \right]$

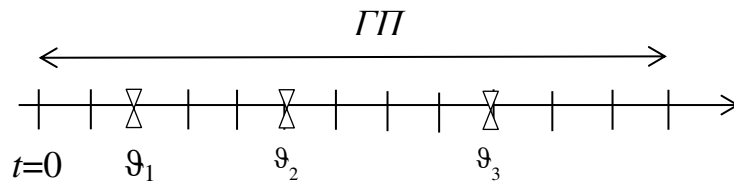


Рисунок 2.7 – Определение горизонта планирования

Смоделируем стоимость обслуживания при помощи стохастического моделирования. Данные гамма-процесса моделирования с фиксированными параметрами подвижного состава приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры моделирования

Номер итерации	Компонент $i$	$a_i$	$\beta_i$	$Var_i$	$W_i$	$C_o$	$C_3$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	100	80	980
	2	1,5	1,5	1	100	80	980
	3	2	2	1	100	80	980
2	1	$2E^{-1}$	$4E^{-1}$	5	100	80	980
	2	$3E^{-1}$	$5E^{-1}$	5	100	80	980
	3	$4E^{-1}$	$6E^{-1}$	5	100	80	980
3	1	$1E^{-1}$	$1E^{-1}$	10	100	80	980
	2	$15E^{-1}$	$15E^{-1}$	10	100	80	980
	3	$2E^{-1}$	$2E^{-1}$	10	100	80	980
4	1	$5E^{-2}$	$15E^{-2}$	20	100	80	980
	2	$15E^{-2}$	$25E^{-2}$	20	100	80	980
	3	$2E^{-2}$	$3E^{-2}$	20	100	80	980

На рисунке 2.8 представлены смоделированные траектории средних затрат на обслуживание за единицу времени.



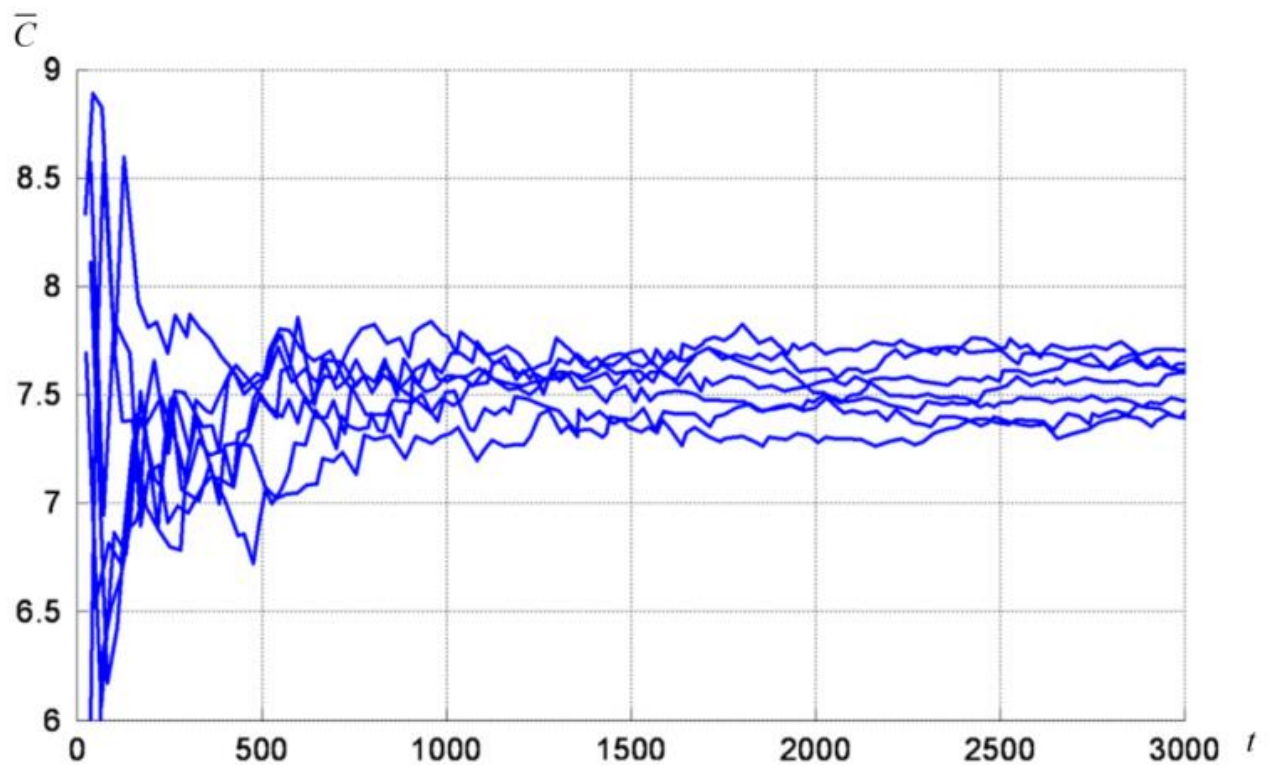


Рисунок 2.8 – Средняя стоимость затрат на техническое обслуживание и ремонт

Рассмотрим затраты, необходимые для проведения мероприятий ремонта пассажирских вагонов. Включая во внимание, то, что стоимость ремонта компанией-изготовителем включает в себя стоимость доставки неисправного пассажирского вагона на завод (сервисный центр) и обратно, то тогда затраты на ремонт будут определяться по формуле

$$C_3(t) = (2 \cdot d \cdot c_d + c_3) \cdot n_3(t), \quad (2.22)$$

где  $c_d$  – стоимость доставки неисправного пассажирского вагона;

$d$  – расстояние между заводом и местом эксплуатации;

$c_3$  – средняя стоимость ремонта одного пассажирского вагона.

Затраты на выполнение ремонта заводом-изготовителем  $C_1(t)$  определяется по формуле

$$C_1(t) = c_1 \cdot \min(n_2(t)), \quad (2.23)$$

где  $c_1$  - стоимость ремонта неисправного пассажирского вагона.

Следовательно полные затраты на ремонт пассажирских вагонов за время  $T$  определяется по формуле

$$C_p(T) = (2 \cdot d \cdot c_d + c_3) \cdot n_3(t) + (2 \cdot d \cdot c_d + c_4) \cdot n_4(t) + c_1 \cdot n_1(t) + c_2 \cdot n_2(t) + c_5 \cdot n_5(t). \quad (2.24)$$

Описываемая модель дает возможность проводить анализ влияния основных параметров системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов:

– коэффициент исправности, за время  $T$ ;

$$\overline{K_H} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_H(t), \quad (2.25)$$

где  $T$  – расчетный период эксплуатации.

$$K_H(t) = \frac{n_0(t)}{N}. \quad (2.26)$$

– удельные затраты на ремонт пассажирских вагонов

$$\overline{C_3} = \frac{C_p(T)}{N \cdot T}. \quad (2.27)$$

Таким образом, полученная модель устанавливает зависимость между входными параметрами (интенсивностью отказов, интенсивностью ремонта, расстоянием между сервисным центром и местом эксплуатации) и выходными показателями, характеризующие исправность парка (рисунок 2.9).

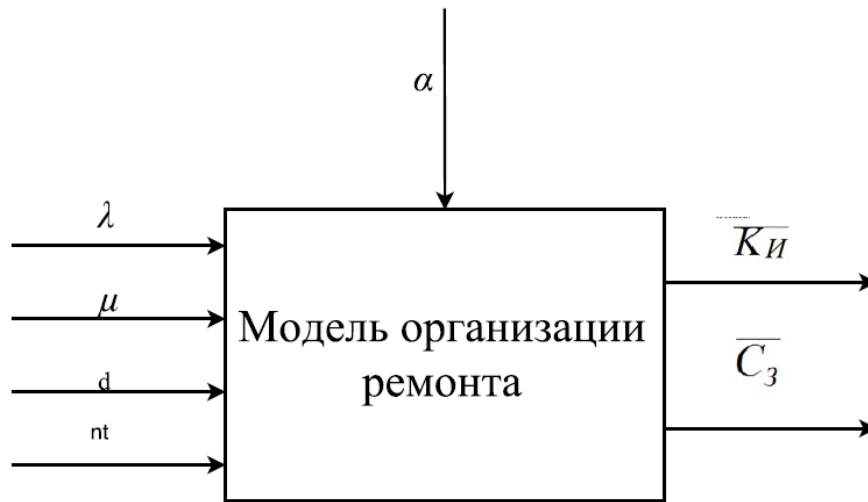


Рисунок 2.9 – Обобщенная схема модели

Правила технической эксплуатации железных дорог устанавливают классификацию пассажирских поездов по дальности маршрута следования на: пригородные (до 150 км), местные (до 700 км) и дальние (свыше 700 км).

В результате выполненных расчетов математической модели получены следующие зависимости (рисунки 2.10-2.13):

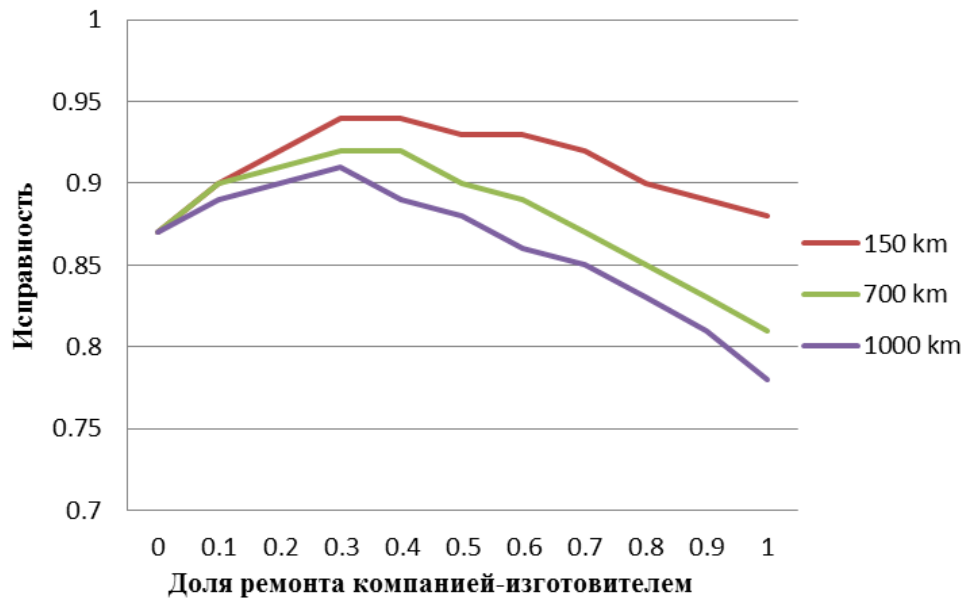


Рисунок 2.10 – Характеристика показателя исправности при  $\alpha$  от 0 до 1 и  $d$  при 150, 700, 1000 км

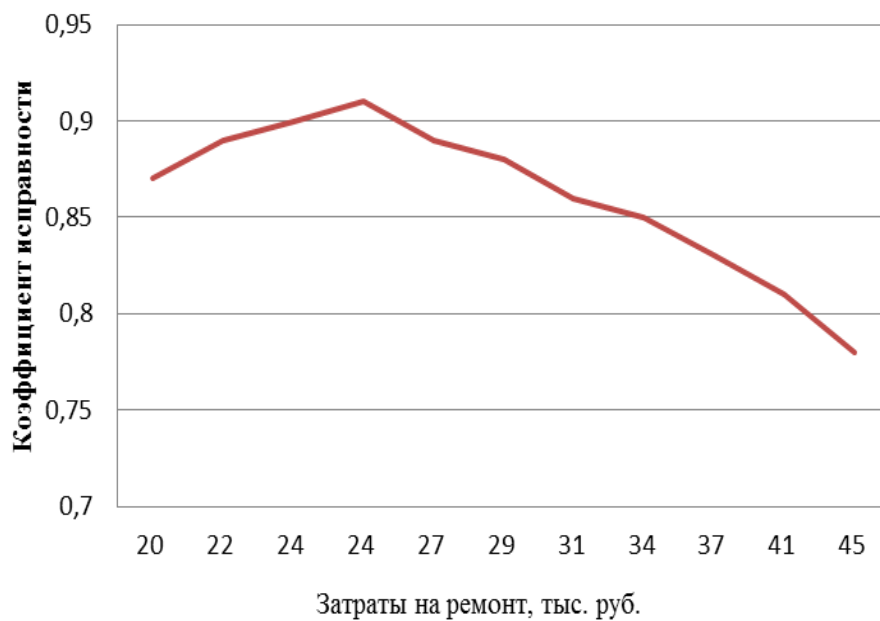


Рисунок 2.11 – Показатель исправности и затрат



Рисунок 2.12 – Динамика исправности подвижного состава



Рисунок 2.13 – Зависимость коэффициента исправности от величины интервала неопределенности интенсивности отказов

Численные результаты разработанной математической модели на основе графоаналитической модели показывают, что условие обеспечения заданного уровня готовности пассажирского вагона к эксплуатации зависит от времени  $T$ .

Зависимость каждого компонента рассматривается на горизонте планирования технического состояния пассажирского вагона. Данная мера может использоваться в качестве индикатора для принятия управленческих решений в течение жизненного цикла пассажирских вагонов. Динамика зависимости стоимостных затрат между компонентами необходима для интеграции для ранжирования работ по проведению сервисного технического обслуживания и ремонта.

### **Выводы по второй главе**

1. Для использования цифровых технологий в производственных процессах по техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов введены термины: «Цифровая трансформация» и «Цифровая модель предприятия». Определены основные составляющие цифровой модели предприятия.

2. Графоаналитический подход визуализации технического состояния пассажирского вагона позволяет осуществлять оценку производственных возможностей реализации модели сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов, позволяющую рационально спланировать и организовать систему сервисного технического обслуживания и ремонта.

3. Разработанная математическая модель сервисного технического обслуживания и ремонта позволяет выполнять оптимизацию сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов путем рационального территориального распределения предприятий с учетом загруженности производственных мощностей структурных подразделений на полигоне железной дороги.

4. Разработанная математическая модель верифицирована. В качестве верификации осуществлен математический стохастический расчет проведения сервисного технического обслуживания и ремонта в заданном горизонте планирования.

### **3. ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СЕТИ СЕРВИСНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА НА ПОЛИГОНЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

#### **3.1. Разработка информационного взаимодействия при проведении сервисного технического обслуживания и ремонта**

Особенностью разрабатываемой модели является подробная детализация процессов, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом пассажирского подвижного состава. Разработка информационного взаимодействия при проведении сервисного технического обслуживания и ремонта, позволит оценить показатели эффективности работы предприятий. Формализованная запись модели сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов представляет собой:

$$M(K_{\Gamma}, \Psi) = C_0, \quad (3.1)$$

где  $K_{\Gamma}$  – коэффициент готовности пассажирского подвижного состава;

$\Psi$  – модель, описывающая систему сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов;

$C_0$  – стоимость проведения технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов.

Техническое обслуживание и ремонт находится в прямой зависимости от типа пассажирского вагона, эксплуатируемые в различных регионах страны и в различных обстоятельствах (параметры системы технического обслуживания и ремонта, материально-технического снабжения, интенсивность отказов, наработка на отказ и т.д.) [62–65], при которых приводятся к минимуму совокупные затраты определяют функцию цели.

Постановка задачи принимает вид

$$M((K_{\Gamma}, L, P_m, T, V, P_t) + C_{\text{пр}}) \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

где  $L$  – расположение сервисного центра;

$P_m$  – поставщики расходных материалов;

$T$  – способы транспортировки;

$V$  – вид пассажирского подвижного состава;

$P_t$  – статистические данные пассажиропотока.

$C_{\text{пр}}$  – стоимость пассажирского подвижного состава.

Предлагаемая функция цели по организации сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов установит связь посредством требуемой готовности подвижного состава и необходимыми для этого затратами в период эксплуатации подвижного состава. Предлагаемая структура представлена на рисунке 3.1.

Объем исходных данных сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава имеет сложную структуру и достаточно велик, в их качестве используются [87-89]:

- статистические данные об интенсивности отказов узлов и частей пассажирского подвижного состава;

- данные, содержащие сведения о видах технического обслуживания и ремонта, а так же информацию о распределении уровня и вида работ.





Рисунок 3.1– Структура сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава

Информационное взаимодействие при проведении сервисного технического обслуживания и ремонта (рисунок 3.2) включает в себя: базу данных собственни-



Тип пассажирского вагона определяет характеристики подвижного состава и составом работ, согласно нормативно-технической документации.

Пассажирский подвижной состав характеризуется: назначенным сроком службы, средней наработкой на отказ, ремонтпригодностью пассажирского вагона.

Во время эксплуатации пассажирского подвижного состава, расходуется его ресурс. В случае нарушения функционирования пассажирского подвижного состава возникает отказ.

Для устранения, а так же предотвращения возникновения отказа производится технологические работы и операции с пассажирским вагоном. Каждый вид работ характеризуется трудоемкостью выполнения, продолжительностью определенных видов работ и периодичностью технического обслуживания и ремонта подвижного состава.

Организация сервисного технического обслуживания и ремонта реализуется при наличии заданных ресурсов, таких как: инфраструктура, оборудование, инструменты, комплектующие изделия и материалы. Расходуемые материалы, напрямую связаны со сроком хранения, сроком гарантийного обслуживания.

## 2. Система сервисного технического обслуживания и ремонта.

Для поддержания пассажирского подвижного состава в исправном работоспособном состоянии проводится работы по техническому обслуживанию и ремонту. С целью достижения высокой организационной эффективности технического обслуживания и ремонта, необходима определенная стратегия, правила организации и управления работами, определение состава выполняемых работ. В рамках системы представим схему взаимодействия завода-изготовителя, компании владельца и сервисного центра (рисунок 3.3).

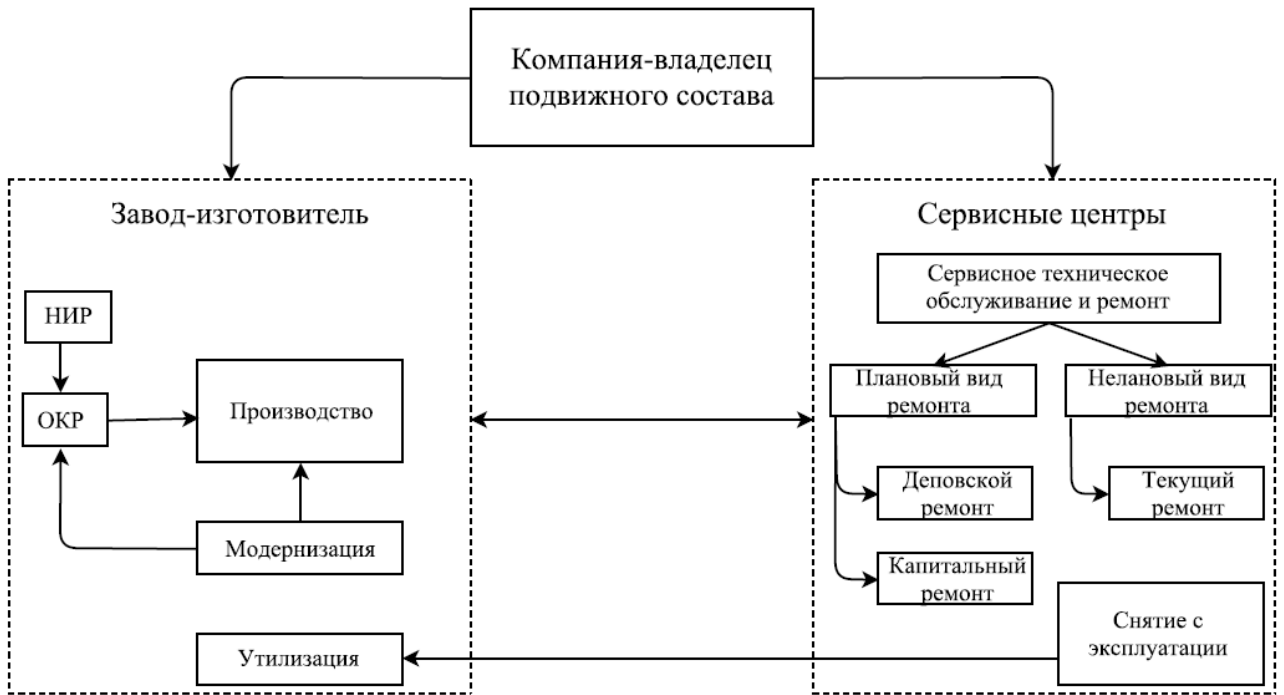


Рисунок 3.3 – Структурная схема взаимодействия

Формирование сервисных центров характеризуется возможностью организации различных уровней ремонта для различного типа подвижного состава, производственной мощностью, технико-экономическими показателями выполнения технического обслуживания и ремонта.

Создание системы сервисного технического обслуживания и ремонта является сложной задачей, так как требует решения взаимосвязанных подзадач, таких как определение рационального распределения работ, создание необходимых ремонтных подразделений, обучение кадров.

### 3. Геопространственные данные и транспортная сеть.

Немаловажным фактором, для обеспечения исправного работоспособного состояния пассажирского подвижного состава, является географическое расположение сервисных центров.

Для этого в предлагаемую структуру возможен ввод информации о расстоянии между сервисным центром и местом расположения подвижного состава, длительность и стоимость транспортировки. Данная информация учитывается при моделировании процессов сервисного технического обслуживания и ремонта.

Таким образом, предлагаемая информационная структура сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов и реализующий ее комплекс моделирования позволит определить пути эффективного решения множества задач, связанных с определением рационального распределения работ по участникам процесса.

### **3.2 Формирование цифровой модели организационной сети на полигоне железной дороги**

Крупные социально-экономические системы, в большинстве случаев функционируют в качестве динамической организационной сети, сталкивающиеся с рядом факторов. Для стабильной и эффективной работы на рынке неотъемлемой частью формирования организационной сети является ее проработка. В условиях рыночных отношений, правильно спланированный процесс организации сети сервисного технического обслуживания и ремонта является залогом ее жизнеспособности.

Таким образом, в настоящем исследовании рассматриваются сервисные центры в составе сети инфраструктуры СТО и Р для определения параметров стратегического планирования реализации сети. Для систематизации проводимых мероприятий по СТО и Р используем гибкие подходы к разработке и реализации организационной сети сервисного технического обслуживания и ремонта.

Постепенный переход традиционного производства по проведению ТО и Р к производителям пассажирского подвижного состава, которые ориентированы на собственника подвижного состава становятся необходимыми. Для поддержки данных изменений и обеспечения основы реализации сети сервисного ТО и Р, планирование, проектирование и моделирование должны быть интегрированы.

Суть сервисного технического обслуживания и ремонта ориентирована на весь жизненный цикл [86] пассажирского подвижного состава. В соответствии с PSS представим схему реализации организационной сети СТО и Р на ограничен-

ном количестве площадок по изготовлению подвижного состава. Услуги по проведению сервисного технического обслуживания и ремонта производятся по месту нахождения пассажирского подвижного состава сервисными службами производителя или его филиалами. Таким образом представим в качестве ядра (интегратора) сети СТО и Р сам пассажирский подвижной состав (владелец подвижного состава), связанный с производителем и его филиалами множественными взаимосвязями.

Модель взаимодействия и управления – это комплекс процессов прогнозирования, планирования проведения работ в целях эффективной эксплуатации пассажирского подвижного состава [66–69]. Прогнозирование предоставляет возможность проведения анализа технического состояния пассажирского подвижного состава с учетом оценки возможности развития потенциала сервисного технического обслуживания и ремонта с прогнозированием сроков и темпов производимых работ. Планирование сочетает определение плановых видов ремонта, а так внеплановых видов ремонта, которые возникают при эксплуатации пассажирского подвижного состава.

Сложность пассажирской транспортной инфраструктуры и ее объектов принципиально исключает возможность работы в полностью автоматическом режиме. Иными словами, эффективно управлять такой системой лишь с привлечением математического моделирования невозможно, требуются поиск и разработка новых подходов, в том числе с использованием цифровизации производственных процессов. Используя современные возможности цифрового моделирования производственных систем, которые наряду с точными математическими моделями предоставляют возможность обеспечения цифрового двойника разрабатываемой производственной структуры.

Для того, что бы цифровая модель сервисного технического обслуживания и ремонта была эффективной и определяла постоянный контроль сотрудничества участников системы необходимо цифровое объединение виртуальной корпора-

тивной сетью. Цифровое объединение позволит разрабатываемой модели быть гибкой для определения потребной производственной мощности сети.

Иерархическое представление (рисунок 3.4) включает в себя три уровня. На первом уровне расположено регулирование развития сервисного технического обслуживания и ремонта. Первый уровень представлен как «Корпоративное управление». Второй уровень объединяет «Оперативное управление сервисным техническим обслуживанием и ремонтом» и состоит из управляющего органа и исполнителей. На третьем уровне находятся потребители услуг (подвижной состав).

Корпоративное управление выполняет функцию регулирования использования инфраструктуры процедурами выделения ресурсов  $Q_s$  и стратегического прогнозирования  $I_s$  при согласовании с заводом -изготовителем и собственником пассажирского подвижного состава (финансирование, обслуживающий персонал, материально-техническое снабжение и т.д.).

На рисунке 3.4 приняты следующие обозначения:

$\pi$  – планирование (план  $x_t$ );

$Q$  – регулирование (ресурс  $u_t$ ,  $u \in U \subset R^e$ );

$I$  – прогнозная оценка оперативного управления  $a_t$ ;

$f$  – стимулирование оперативного управления (стимул  $\phi_t$ );

$y_t$  – выходной показатель выполнения плана работ;

$\xi$  – влияние внешней среды (стохастическая помеха  $\xi \in \Theta \subset R^s$ );

$\lambda$  – интенсивность отказов пассажирского подвижного состава;

$\mu$  – интенсивность восстановления пассажирского подвижного состава.

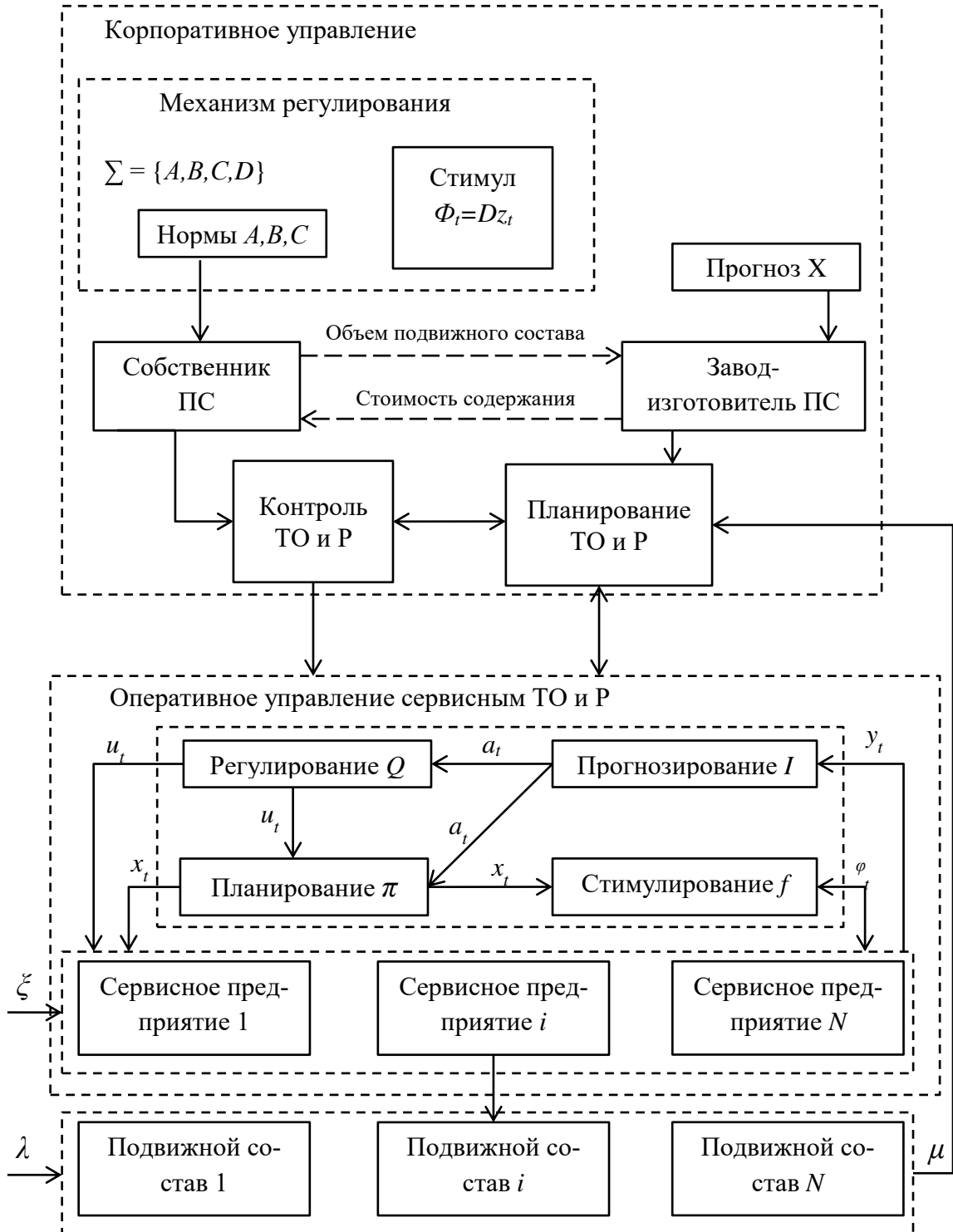


Рисунок 3.4 – Иерархическое представление сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава

Структура сервисного технического обслуживания и ремонта функционирует в периоде времени  $t$ ,  $t = 0, 1 \dots$  после того как в сервисные предприятия по



техническому обслуживанию и ремонту направляются запросы собственника пассажирского подвижного состава: план (или норматив)  $x_t$  и ресурс  $u_t$  (например запрашиваемый определенный вид технического обслуживания и ремонта). Совместно с поступлением запроса собственника пассажирского подвижного состава на структуру воздействует внешняя среда в виде стохастической помехи  $\xi_t$  (спрос на пассажирские перевозки, пассажиропоток, сезонность, регион эксплуатации, состояние инфраструктуры на полигоне железной дороги). Данная информация поступает как собственнику пассажирского подвижного состава, так и сервисным предприятиям

Таким образом, сервисное ТО и Р становится известным множеством  $Y(u_t, \xi_t)$  и она выбирает выход  $y \in Y(u_t, \xi_t)$ . Собственник пассажирского подвижного состава оценивает время ремонта в сервисном предприятии  $y_t$  и определяет оценку выхода  $a_{t+1}$  за промежуток времени  $t+1$ .

Сопоставляя фактическую интенсивность восстановления  $y_t$  с запланированным  $x_t$  сервисные предприятия определяют стимул (например, время проведения технического обслуживания и ремонта, повышение интенсивности восстановления пассажирского подвижного состава, премию сотрудникам, модернизацию производственных позиций предприятия):

$$\varphi_t = f(x_t, y_t), \quad \varphi_t \in R^1, \quad f \in C^1, \quad (3.3)$$

где  $f$  – функция стимулирования.

В рассматриваемый период времени  $t$  функционирование системы заканчивается, наступает новый период планирования  $t+1$  и т.д.

Задачей оптимизации процесса в каждом рассматриваемом периоде времени является максимизация целевой функции всей системы сервисного технического обслуживания и ремонта  $\psi(x_t, u_t, y_t)$ , которая зависит от ресурсов, планов и выхо-

дов системы с учетом неопределенности потенциала и выхода

$$R(\Sigma) = \min_{\xi \in \Theta} \min_{y \in R(\Sigma(p))} \psi(x_i, u_i, y_i).$$

Анализ содействует реализации следующих механизмов воздействия [90] на структуру: жесткое регламентирование взаимодействия, гибкое реагирование и установление в зоне границ ответственности [70–73].

Таким образом, при выполнении условия для всестороннего развития сервисного технического обслуживания и ремонта достаточно создать равные условия всем взаимодействующим участникам рассматриваемой системы.

Основой формирования организационной сети сервисного технического обслуживания и ремонта является договорное объединение компаний вокруг интегратора сети с делегированием функционирования сети по организационным, координационным и экономическим факторам воздействия на участников. Нормативно-правовой документацией формируемой сети будут являться договорные обязательства холдингов.

Формирование системы сервисного технического обслуживания и ремонта предполагает адаптацию уже существующей системы ТО и Р с учетом особых характеристик технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава. Организационное описание взаимодействия региональных предприятий, а так же объем производимых услуг может отличаться, в зависимости от типа предприятия.

Операционная структура взаимодействия участников процесса представлена на рисунке 3.5, представляющая участвующие субъекты и их информационную зависимость. В описываемой структуре выделены основные участники процесса:

1. Собственник подвижного состава, контролирующий ежедневный пробег пассажирского подвижного состава, а так же сроки проведения сервисного технического обслуживания и ремонта, на основании программы, предоставленной заводом-изготовителем.

2. Менеджер инфраструктуры. Предоставляет услуги по составлению расписания движения для планирования маршрута передвижения подвижного со-

става до места проведения работ и обратно в регламентированный промежуток времени, а так же осуществляет контроль движения по сети железных дорог.

3. Завод-изготовитель / сервисные предприятия. Формируют программу проведения сервисного технического обслуживания и ремонта на основании регламента работ, а так же, информации о ежедневном пробеге подвижного состава.

4. Ситуационный центр. Осуществляет контроль движения поездов в режиме реального времени, и при возникновении внештатных аварийных ситуаций организует оперативное взаимодействие связанных служб.

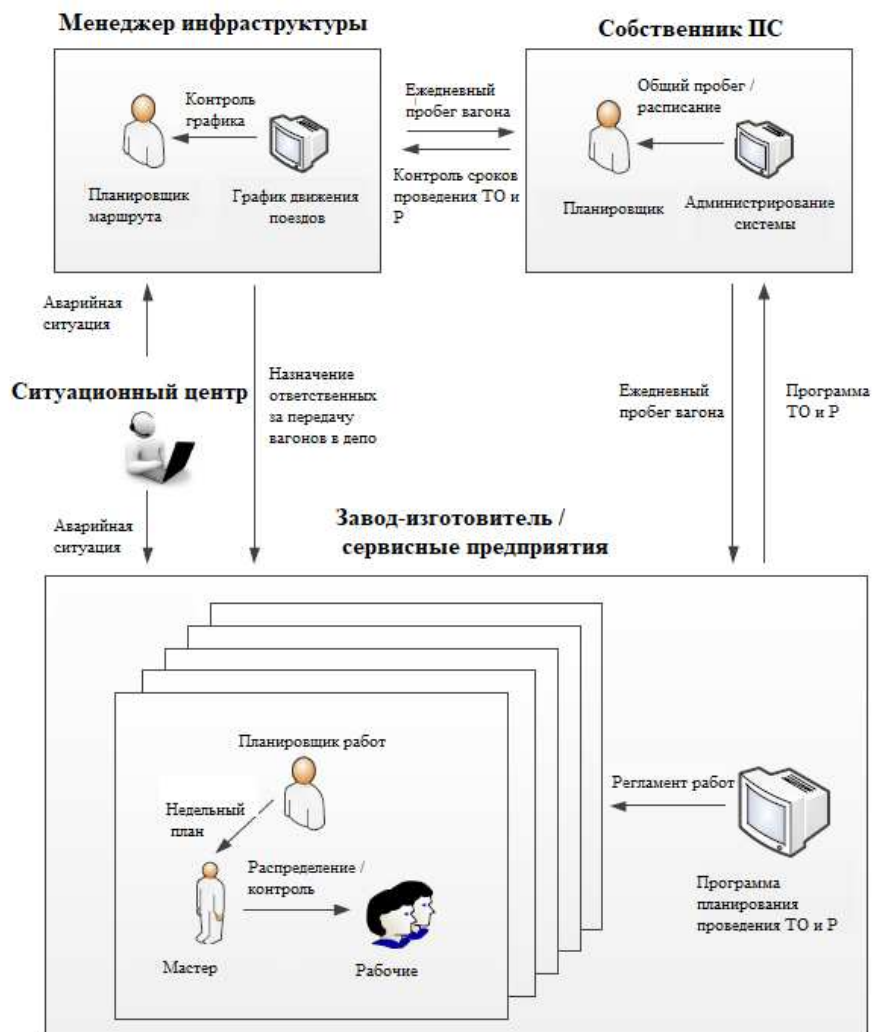


Рисунок 3.5 – Операционная структура взаимодействия участников процесса

Модель сервисного технического обслуживания и ремонта учитывает переход от действующей системы ТО и Р в современных условиях эксплуатации пас-

сажирского подвижного состава. Важным элементом системы является разделение проводимых работ, а так же планирование проведения ТО и Р на основании данных, полученных от собственника подвижного состава. Структурированное описание рассматриваемой модели сервисного ТО и Р обеспечивает основу для реализации.

Исследование сложных структурных систем бизнес-моделей, рассмотрения их структур, оценки сценариев функционирования с наличием неопределенности и динамики основано на цифровом моделировании. Цифровое моделирование предоставит оценку влияния исходных параметров на результат моделирования с использованием стратегии поиска наилучшего варианта модели в целях принятия управленческого решения. Цифровое моделирование производственных процессов позволят установить оперативную взаимосвязь участников процесса при выполнении сервисного технического обслуживания и ремонта, с учетом распределения зоны ответственности

Организация сервисного технического обслуживания и ремонта основана на концепции модульности и разделением бизнес-ограничений [74–76]. Составы пассажирских поездов в зависимости от сезонности и пика перевозок перестраиваются, находятся в пути следования или на путях отстоя. Данная характеристика подвижного состава соответствует агентной модели, подходящую, для решения проблемы создания цифровой платформы.

Создание цифровой модели позволит выполнять исследования различных сценариев эксплуатации пассажирского подвижного состава в открытой распределенной системе с поддержкой принятия управленческих решений. Цифровая модель в полной мере способна реализовать модульный подход структуры для виртуального воссоздания интерактивных правил взаимодействия участников на протяжении жизненного цикла пассажирского подвижного состава. Взаимодействие участников в сервисном техническом обслуживании и ремонте приведено на схеме (Рисунок 3.6).

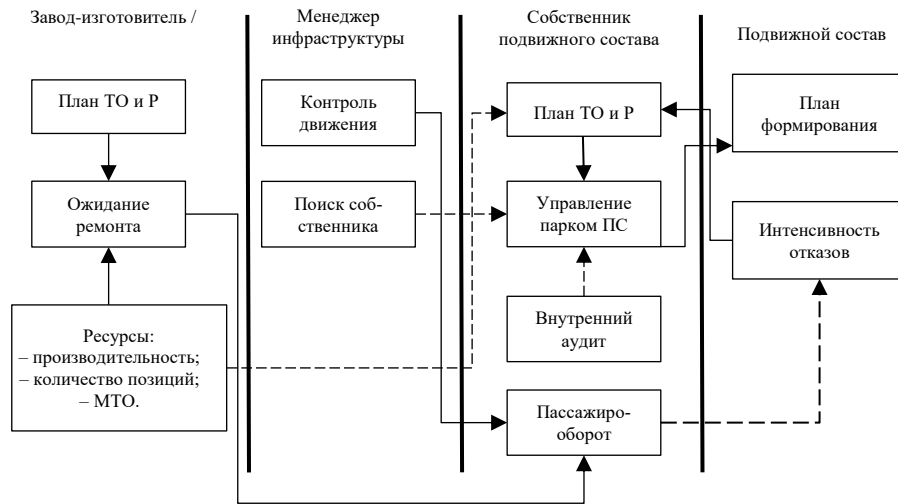


Рисунок 3.6 – Схема взаимодействия агентов имитационной модели

Цифровая модель сервисного технического обслуживания и ремонта создается на основе цифрового описания:

- подвижного состава;
- собственника подвижного состава;
- менеджера инфраструктуры;
- завода-изготовителя / сервисного предприятия.

Использование цифрового описания необходимо для представления реальных решений в управлении, понимании транспортного процесса в пассажирских перевозках.

Цифровое описание физического объекта пассажирского подвижного состава формируется на географической информационной системе с открытым информационным кодом OpenStreetMap, визуализирующая пространственное представление. В целях отслеживания причинно-следственной связи в цифровой модели каждый пассажирских подвижной состав работает независимо друг от друга. Так же цифровое описание включает в себя совокупность последовательно реализуемых процессов при эксплуатации пассажирского подвижного состава, а так же установленные к нему требования по сроку эксплуатации, включая виды работ по техническому обслуживанию и ремонту. Специфические характеристики эксплу-

атации пассажирского подвижного состава описываются несколькими параметрами (состояние местоположения, расписание движения поездов, графоаналитическая модель состояние пассажирского подвижного состава).

Цифровое описание собственника пассажирского подвижного состава основано на формировании планирования и проведения сервисного технического обслуживания и ремонта. Планирование проведения сервисного технического обслуживания и ремонта основано на интенсивности отказов пассажирского подвижного состава, связанные с обеспечением пассажирских перевозок с учетом фактического пассажиропотока. Данные пассажиропотока обеспечиваются в зависимости от покупательской способности, а так же в зависимости от сезонности выполняемых перевозок.

Цифровое описание менеджера инфраструктуры обеспечивает контроль графика движения пассажирских поездов. А так же обеспечивает планирование маршрута движения пассажирских поездов при направлении вагонов в ремонт. Цифровое описание менеджера инфраструктуры обеспечит: оперативную и прозрачную подготовку приказа (наряда) на отправление вагонов в ремонт; контроль передачи с путей станции на пути примыкания сервисного предприятия. После выполнения плановых и неплановых видов работ с пассажирским подвижным составом оперативно подготавливается приказ (наряд) на отправление вагона с предприятия собственнику, согласовывается дата выставления вагонов с сервисного предприятия с контролем нахождения подвижного состава в пути следования.

Цифровое описание завода-изготовителя / сервисного предприятия описывает производственный цикл работ структурного подразделения на полигоне железной дороги. Кроме того цифровое описание позволит оперативно подготавливать и согласовывать с менеджером инфраструктуры заявки на отправку пассажирских вагонов собственнику.

Различия производимых работ между предприятиями обусловлено их дифференциацией. Для определения закономерности организационного формирова-

ния сервисных предприятий необходимо разделение зоны ответственности по проводимым работам в течение всего жизненного цикла пассажирского подвижного состава.

По результатам цифрового описания и разделения сервисных предприятий по типам производимых услуг и работ будет возможность сформировать организационную структуру сервисного технического обслуживания и ремонта, характерную для различных производственных сценариев.

### **3.3 Сервисное техническое обслуживание и ремонт в среде цифрового моделирования AnyLogic**

Изучение сложных систем требует виртуального, абстрактного представления системы с помощью цифровой модели. Цифровая модель создается копией реальной системы, но формируется со ссылкой на некоторые аспекты. Это относится к понятию абстракции и определяет тот факт, что цифровая модель всегда адаптирована для предоставления ответов на конкретные задачи, для принятия управленческих решений. По этой причине разрабатываемая цифровая модель является упрощением реальности, чтобы обеспечить аргументированную основу, которая позволит понять рассматриваемую задачу.

Цифровая модель по сути является моделью, которая проигрывает множество сценариев изменений. Цифровая модель – это набор правил описанные математическим аппаратом, согласно которым система переходит из одного технического состояния в другое, а так же описывает технологический процесс. Правила задаются с помощью дифференциальных уравнений, диаграмм состояний. Выходные данные цифровой модели позволяют анализировать поведение системы в заданных параметрах.

Создание цифровой модели осуществляется с применением аппарата системной динамики моделирования. Данный аппарат включает в себя как дискрет-

но-событийное так и агентное моделирование в среде AnyLogic. Системная динамика – это подход моделирования, методы и инструменты которого позволяют понять структуру и динамику проектируемой цифровой модели. Системная динамика предполагает высокий уровень абстракции и возможна в использовании для стратегического моделирования системы.

На рисунке 3.7 представлена общая архитектура и компоненты цифровой модели сервисного технического обслуживания и ремонта, состоящая из:

- параметров управления базой данных;
- аналитических инструментов моделирования;
- компонентов цифровой модели;
- панель инструментов для мониторинга и поддержки принятия управленческих решений.

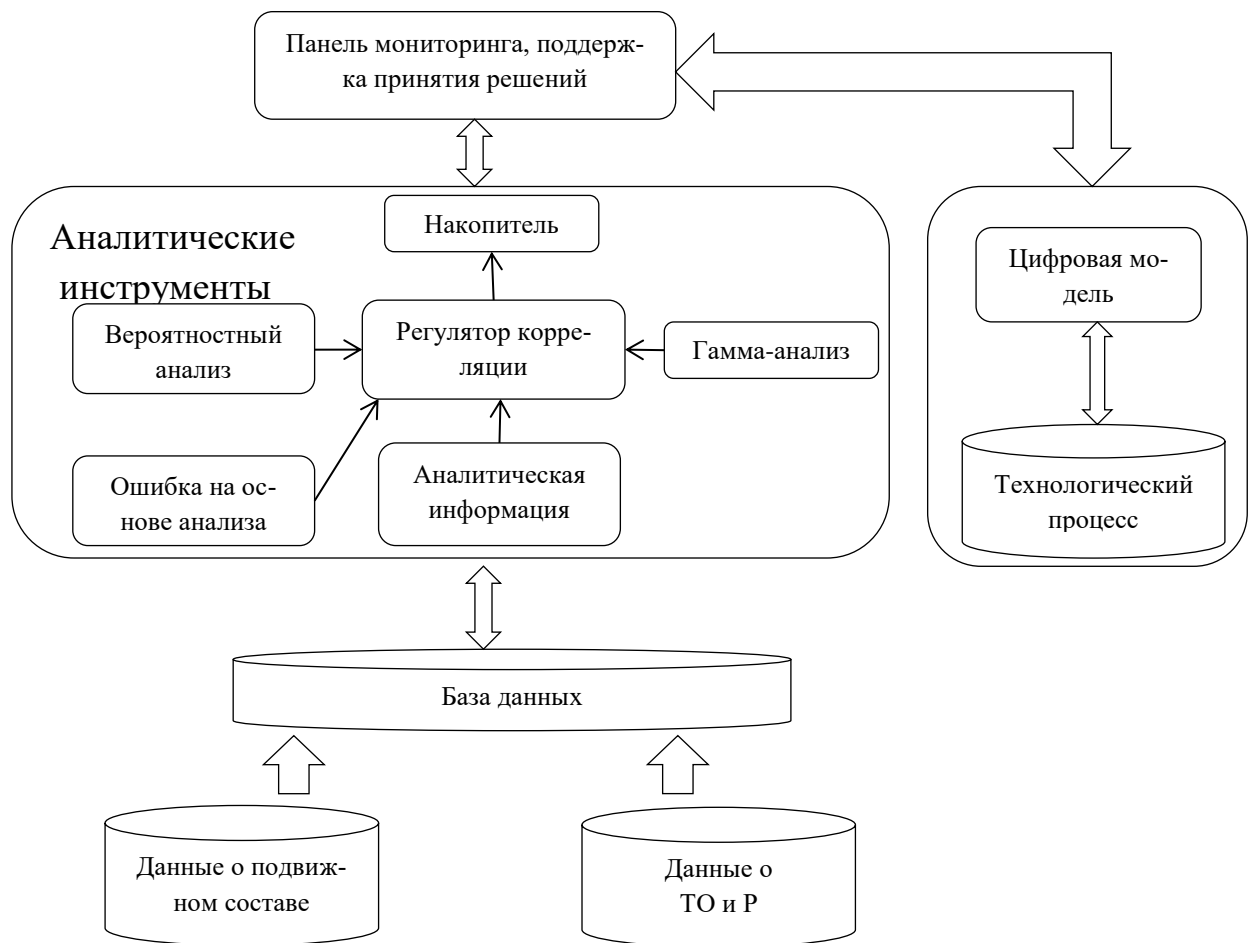


Рисунок 3.7 – Общая архитектура цифровой модели



Цифровая модель представляет собой объектно-ориентированную структуру, разработанную на основе гибридного подхода (дискретно-событийного) в AnyLogic. Цифровая модель описывает характеристики пассажирского подвижного состава.

Цифровое моделирование включает в себя представление разрабатываемой модели в виде процесса, то есть последовательности операций, выполняемых с пассажирским подвижным составом. Цифровая модель задается графически с помощью диаграммы технологического процесса, блоки которой представляют собой отдельные операции.

Цифровая модель представляет собой альтернативный взгляд на поведение моделируемой системы. Структура цифровой модели может быть описана не только графически, но и с помощью заданного сценария. Поведение пассажирского подвижного состава может быть задано различными действиями при наступлении определенных событий в течении его жизненного цикла.

Для выбора подходящей стратегии необходимо учитывать неметрические факторы (безопасность движения, качество обслуживания пассажиров, пассажиропоток, загруженность предприятий) и метрические факторы (стоимость технического обслуживания и ремонта, стоимость запасных частей, интенсивность отказов). Оптимальная стратегия сервисного технического обслуживания и ремонта определит баланс между стоимостью и качеством производимых работ, для обеспечения безопасности движения пассажирских поездов.

Основой цифрового моделирования является концепция входящих заявок, под которыми принимается пассажирский подвижной состав, поступающий на техническое обслуживание или ремонт.

Цифровое моделирование позволяет описать дискретную систему процесса в форме нескольких подсистем, задаваемыми математическим аппаратом рассматриваемой системы. Каждый компонент проектируемой модели [77-81] взаимодействуют между собой, образуя тем самым внешнюю среду цифровой модели.

Цифровое моделирование обладает автономным поведением, принимающий решения в соответствии с установленным набором ограничений и правил. Поведение компонентов системы связаны в цифровой модели с другими взаимодействующими компонентами. Алгоритм поведения цифровой модели описывается графом состояний пассажирского подвижного состава в моделируемой системе сервисного технического обслуживания и ремонта. Таким образом, формализация дискретной системы цифрового моделирования [83] представлена на рисунке 3.8.

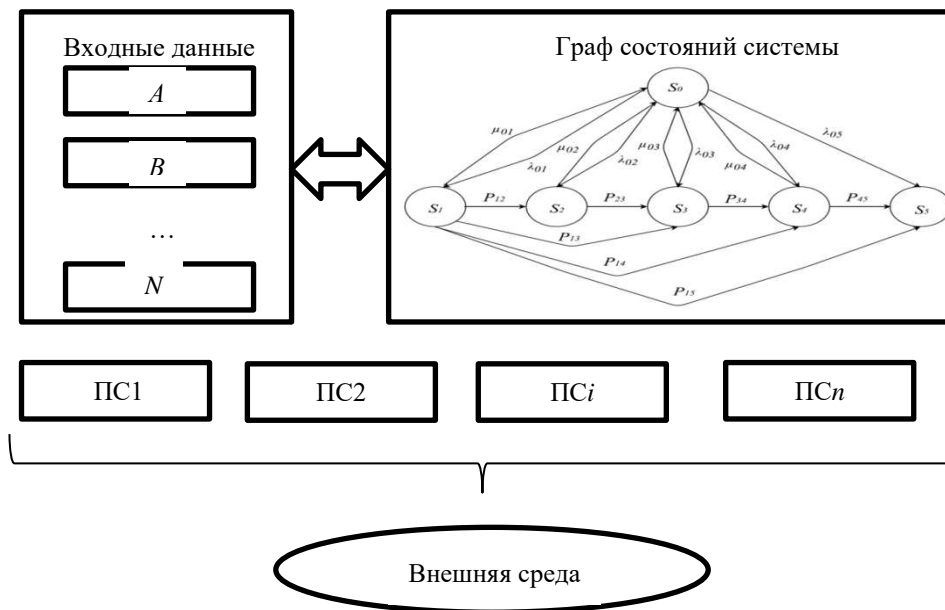


Рисунок 3.8 – Формализация дискретной системы цифрового моделирования

Граф состояний системы представляет собой ориентированный граф  $G = (S, P)$ , в котором: вершины  $S$  – это состояния агента, дуги  $P$  – это вероятность событий, которые переводят агента из одного состояния в другой.

В разрабатываемой цифровой модели [84] компоненты рассматриваются как модуль моделирования системы, контролирующий процесс (рисунок 3.9). Компоненты производят анализ цифровой модели во времени и получают обратную связь от результатов моделирования. Затем производится контроль ввода исходных данных для постановки задачи цифрового моделирования при создании эксперимента. Структура взаимодействует с процессом моделирования, используя

итерацию «поведение-ограничения-эксперимент», что бы задать соответствующие неопределенности и допущения, принимаемые в процессе цифрового моделирования [85].

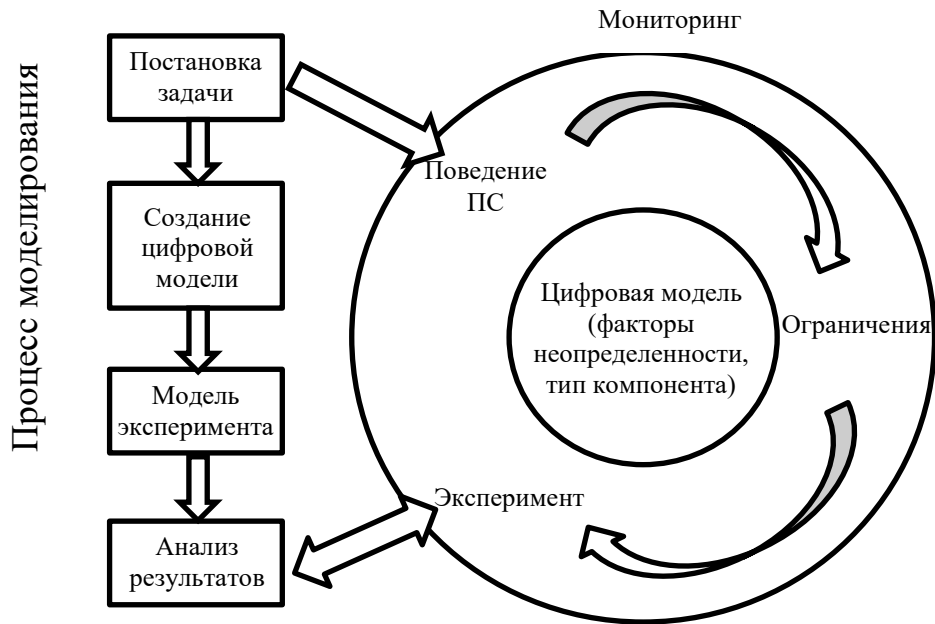


Рисунок 3.9 – Структура цифрового моделирования

Что бы изменить пространство неопределенности агент выбирает ряд экспериментов, сгенерированных из исходной модели поведения агента, группирует схожие модельные поведения, показывая результаты поведения модели проектирования в целом.

Целью подхода является цифровое моделирование экспериментальной среды, которая представляет собой фактическую организацию. Для достижения поставленной цели цифровая модель реагирует на различные входные данные в соответствии с реальной ситуацией. Цифровая модель отображает динамические характеристики дискретных событий.

Разработка цифровой модели представляет собой формулирование и концептуализацию рассматриваемой системы. Ориентированный на результат подход моделирования представляет собой процесс перехода от одной итерации к другой, позволяющий производить анализ. Анализ выходных данных итераций представ-

ляет оценку комплексной модели, количественно определяя детали и параметры модели.

Разработанный алгоритм цифрового моделирования системы сервисного технического обслуживания и ремонта (рисунок 3.10), в интервале времени моделирования  $T$  реализует процесс синтеза процесса. С учетом допущений принимаем, что цифровая система производит произвольную проверку в промежутке временного интервала  $\Delta t$ . Отказы пассажирских вагонов в период эксплуатации характеризуется случайной последовательностью, следовательно проверка система носит случайный характер.

Алгоритм моделирования состоит из последовательных элементов и этапов.

Первый этап. Элементы 2–3, 8–9, обеспечивает реализацию цифрового моделирования системы. В период первого этапа цифрового моделирования обеспечивается нахождение оптимальных характеристик системы.

Второй этап. Элементы 3–8, обеспечивают реализацию работы цифровой модели в промежуточный этап моделирования. На данном этапе производится многократный расчет разработанной математической модели, позволяющий после обработки оценивать полученные характеристики.

Третий этап. Элемент 7, является контрольных этапом в расчете математической модели. Данный этап производит проверку расчетов в случайный момент времени в интервале цифрового моделирования на интервале времени  $T$ .

Четвертый этап. Элемент 10, проверяет соответствие полученных оценок элементов системы сервисного технического обслуживания и ремонта, а так же рассматривает найден ли наилучший вариант системы.

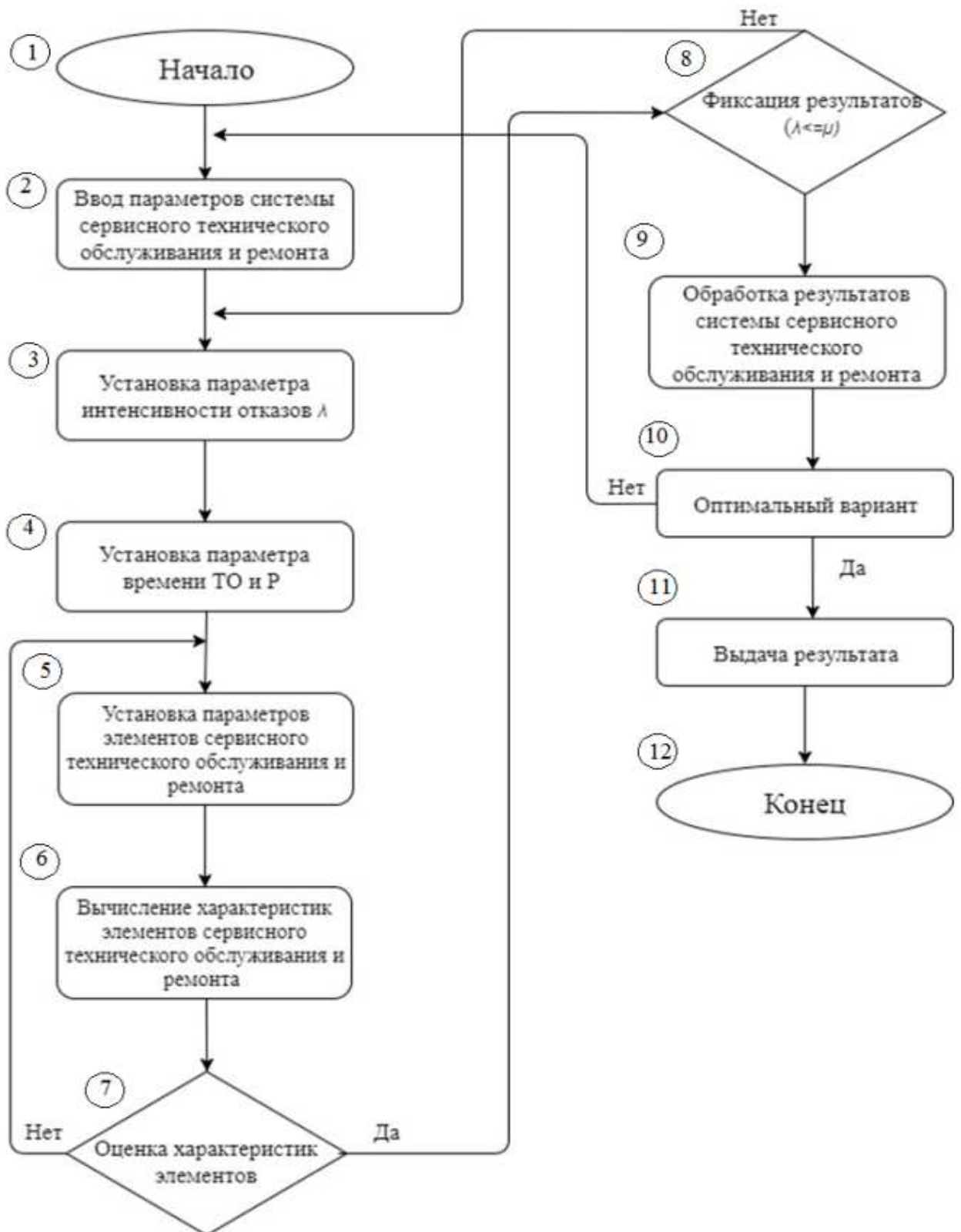


Рисунок 3.10 – Алгоритм моделирования

Формирование алгоритма цифрового моделирования характеризуется возможностью организации уровней ремонта и технического обслуживания в соответствии с нормативно-технической документацией в системе технического обслуживания и ремонта, требуемой производственной мощностью предприятий инфраструктуры, технико-экономическими показателями выполнения технического обслуживания и ремонта.

Разработанный алгоритм с учетом реализован в среде цифрового моделирования AnyLogic (рисунок 3.11).

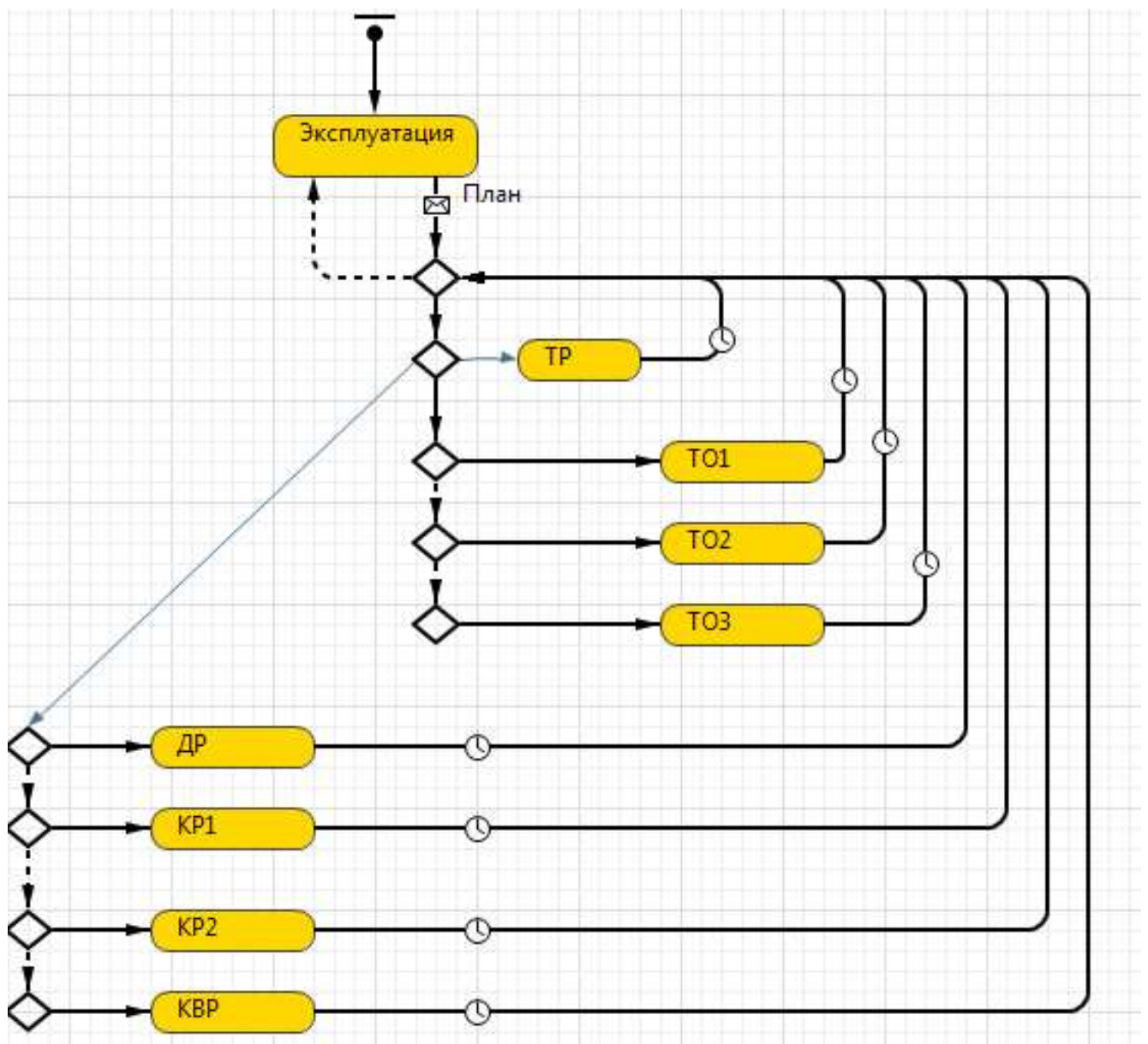


Рисунок 3.11 – Блок-схема цифровой модели сервисного ТО и Р

Реализация разработанного алгоритма в среде цифрового моделирования AnyLogic состоит из следующих этапов. Решение каждого этапа зависит от исходных данных, которые задаются в модели. На первом этапе создания модели вводились несколько классов агентов из библиотеки моделирования процесса, диаграмма состояний и элементы системной динамики цифрового моделирования.

В данном случае под агентом принимаем эксплуатируемый пассажирский подвижной состав. Цифровое моделирование системы сервисного обслуживания пассажирского подвижного состава не может существовать без задания алгоритма, выполняющего обработку данных и вычислений. Вторым этапом создания модели служит структурированная блок-схема цифровой модели.

Созданная блок-схема представляет собой функцию, передающую пассажирский подвижной состав на техническое обслуживание и ремонт. Диаграмма состояний «Operational» задает поведение агента. Передача подвижного состава на техническое обслуживание происходит после получения сообщения «weekPlanReceived», удовлетворяющего заданным параметрам. Далее происходит ветвление и передача на требуемое техническое обслуживание или ремонт. Проведение как плановых так и неплановых видов технического обслуживания и ремонта производится в соответствии с утвержденной нормативно-технической документацией. Нормативно-техническая документация может отличаться в зависимости от модели пассажирского вагона и года его выпуска.

Каждый вид обслуживания или ремонта происходит в свой период времени, через который подвижной состав будет обслужен и возвращен в эксплуатацию [91, 93]. Разработанный алгоритм системы основан на графоаналитической модели системы (рисунок 3.12).

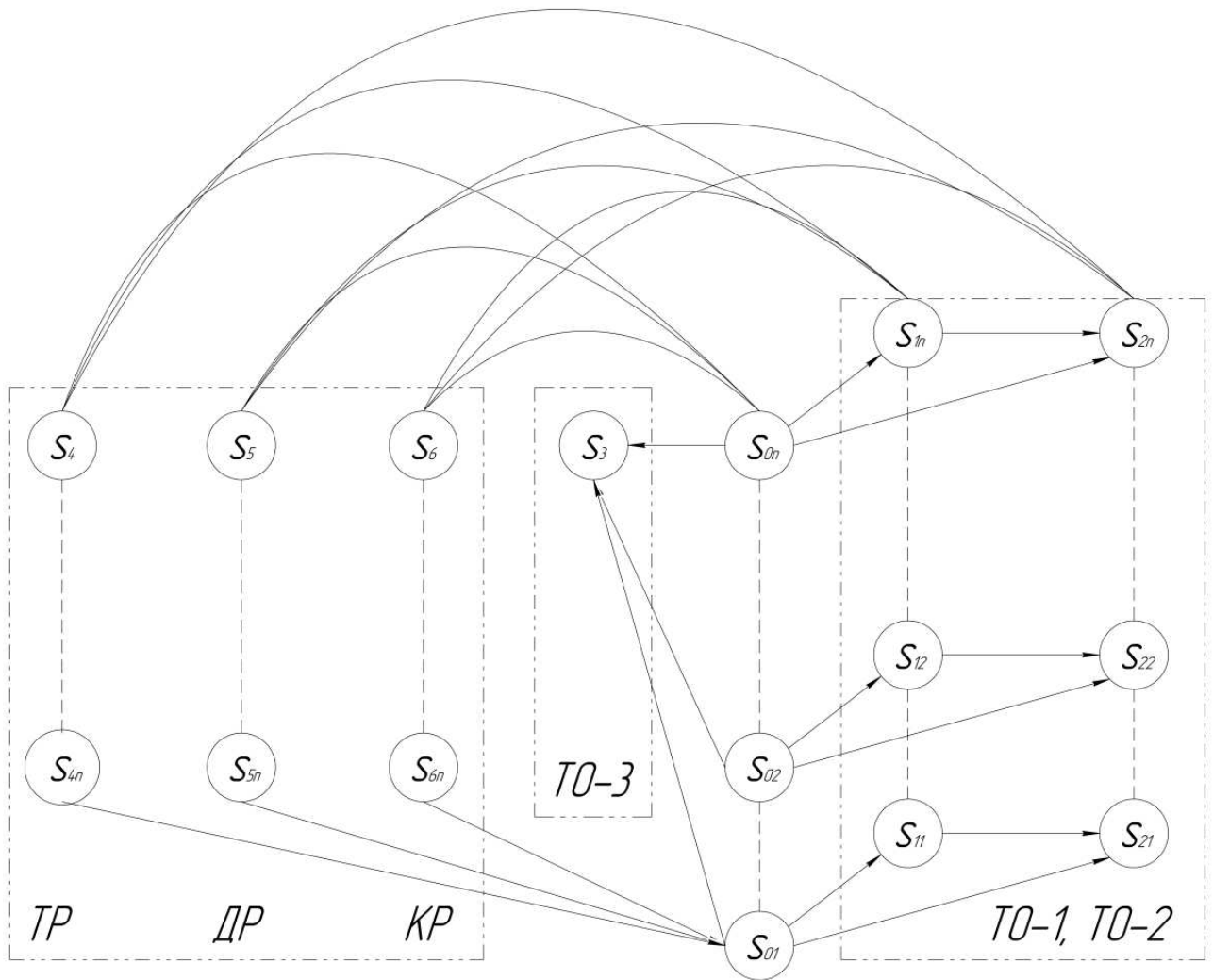


Рисунок 3.12 – Графоаналитическая модель системы в системе цифрового моделирования

Интерфейс эксперимента «Планирование сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов» (рисунок 3.13) включает в себя элементы управления для ввода значений параметров. Основными параметрами будут являться: пробег вагона, календарная продолжительность межремонтного периода, а так же возможность изменения времени простоя при техническом обслуживании в зависимости от типа подвижного состава [94–96].



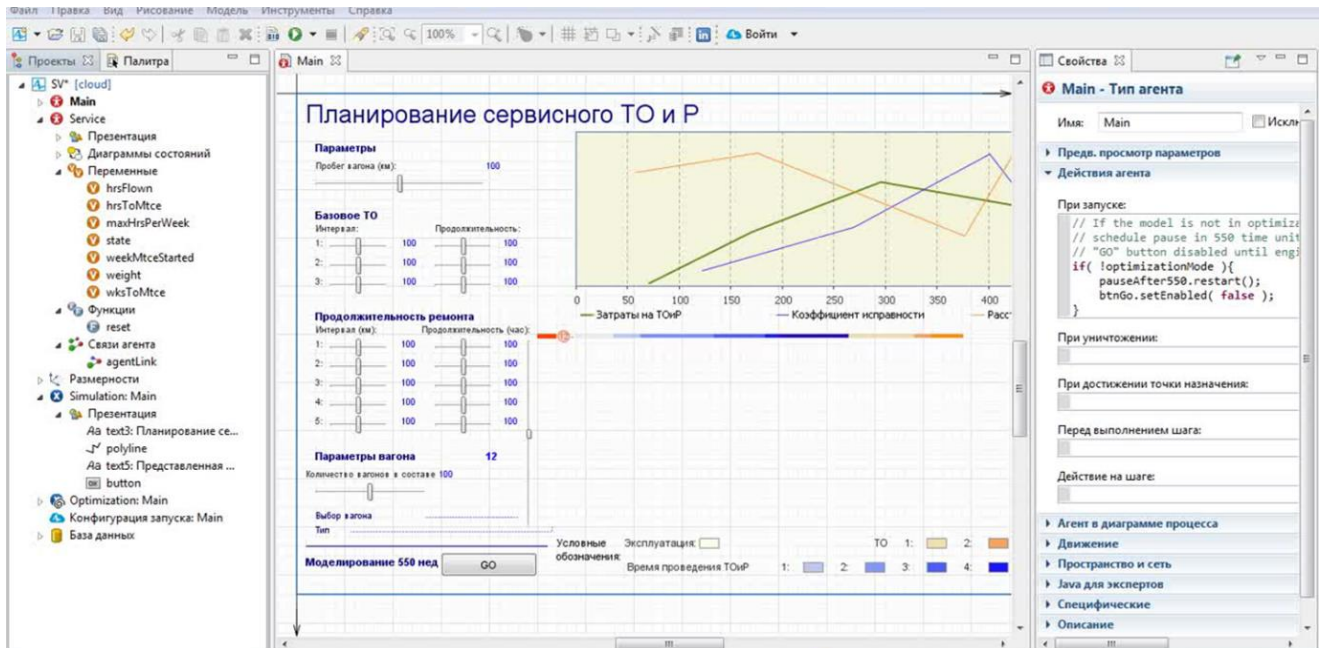


Рисунок 3.13 – Интерфейс эксперимента «Планирование сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов»

Разработанная цифровая модель производственного предприятия предоставляет возможность планирования и управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом. Позволяя проводить анализ развития сервисного обслуживания на сети железных дорог. Изменяя исходные данные модели можно проследить динамику изменений в процессе моделирования [97–98].

Варьирование межремонтного пробега и временной составляющей технического обслуживания и ремонта в модели позволяет сравнивать изменения при различных значениях. Так же обеспечивается возможность оценить влияние каждого параметра на поведение модели. Как следствие, результатом моделирования является информация, необходимая для составления прогнозной оценки функционирования системы, что в свою очередь влияет на принятие управленческих решений [99–101].

Сервисные центры обеспечат проведение, как технического обслуживания, так и ремонт пассажирского подвижного состава. Работы в сервисном центре осуществляются производителем пассажирского подвижного состава, либо част-

ной компанией-оператором по доверенности производителя. Данные мероприятия позволят обеспечить стабильность исправного работоспособного состояния подвижного состава.

В результате моделирования получен график (рисунок 3.14) изменения коэффициента исправности подвижного состава, уровень затрат на проведение технического обслуживания и ремонта, а также указывается среднее расстояние до сервисного центра от места эксплуатации подвижного состава.



Рисунок 3.14 – Результаты цифрового моделирования

В данной цифровой модели интенсивность восстановления является постоянной и характеризуется средним временем восстановления. Текущий ремонт в модели учитывается в произвольный момент времени, задаваемый функцией вероятности в блок-схеме системы.

### Выводы по 3 главе

1. Цифровое описание технологических производственных процессов по проведению технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов с учетом разделения работ предоставила возможность сформировать организационную структуру сервисного технического обслуживания и ремонта, характерную для различных производственных сценариев.

2. Графоаналитическая модель технических состояний пассажирского вагона в системе цифрового моделирования позволяет реализовать цифровую модель производственных процессов и определить множество возможных вариантов реализации и развития системы сервисного технического обслуживания и ремонта при минимальных затратах.

3. Цифровая модель организационной структуры сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов на полигоне железной дороги позволит оценить материальную составляющую эффективности их работы. В короткие сроки возможна оценка вводимых изменений, их влияние на систему сервисного технического обслуживания и ремонта, а так же определение рационального распределения по видам производимых работ, как ремонта, так и технического обслуживания пассажирского подвижного состава.

4. Варьирование межремонтного пробега, временной составляющей, интенсивности отказов, сезонности эксплуатации пассажирских вагонов в цифровой модели организационной сети сервисного технического обслуживания и ремонта позволяет сравнивать изменения при различных производственных сценариях.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 4.1 Основные показатели управления эффективностью сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов

С использованием разработанной цифровой модели исследована организация сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава. Разработанная цифровая модель позволяет прогнозировать множество вариантов реализации системы в зависимости от: интенсивности отказов подвижного состава, времени на проведение технического обслуживания и ремонта, пассажиропотока, финансового обеспечения предприятия. Позволит в минимальные сроки проводить численный мониторинг для принятия управленческих решений.

Одним из вопросов планирования сервисного технического обслуживания и ремонта является территориальное местоположение объектов инфраструктуры (сервисных центров).

Для оценки эффективности работы стратегии сервисного технического обслуживания и ремонта в долгосрочной перспективе учитывалась динамика развития высокоскоростного сообщения, показатели пассажирооборота, а так же интенсивность отказов подвижного состава.

Комплексная оценка потенциального расположения сервисных центров представляет собой совокупность факторов показателей: пассажирооборота ( $F_{pass}$ ), динамика развития ( $F_{dev}$ ), инфраструктура и географические факторы ( $F_{geo}$ ).

$$K = \{F_{pass}, F_{dev}, F_{geo}\} \rightarrow \max \quad (4.1)$$

Чем выше комплексная оценка, тем привлекательнее месторасположение сервисного центра для проведения ТО и Р.

Определение факторов производится как отношение разницы между максимальным значением оценки и оценкой субъекта в группе факторов ( $\Psi_{pass}, \Psi_{dev}, \Psi_{geo}$ ) по формулам

$$F_{pass}^i = 1 - \frac{\psi_{max} \cdot \psi_{pass}}{\psi_{max} \cdot \psi_{min}}, \quad (4.2)$$

$$F_{dev}^i = 1 - \frac{\psi_{max} \cdot \psi_{dev}}{\psi_{max} \cdot \psi_{min}}, \quad (4.3)$$

$$F_{geo}^i = 1 - \frac{\psi_{max} \cdot \psi_{geo}}{\psi_{max} \cdot \psi_{min}}. \quad (4.4)$$

Диаграмма факторов приведена на рисунке 4.1.

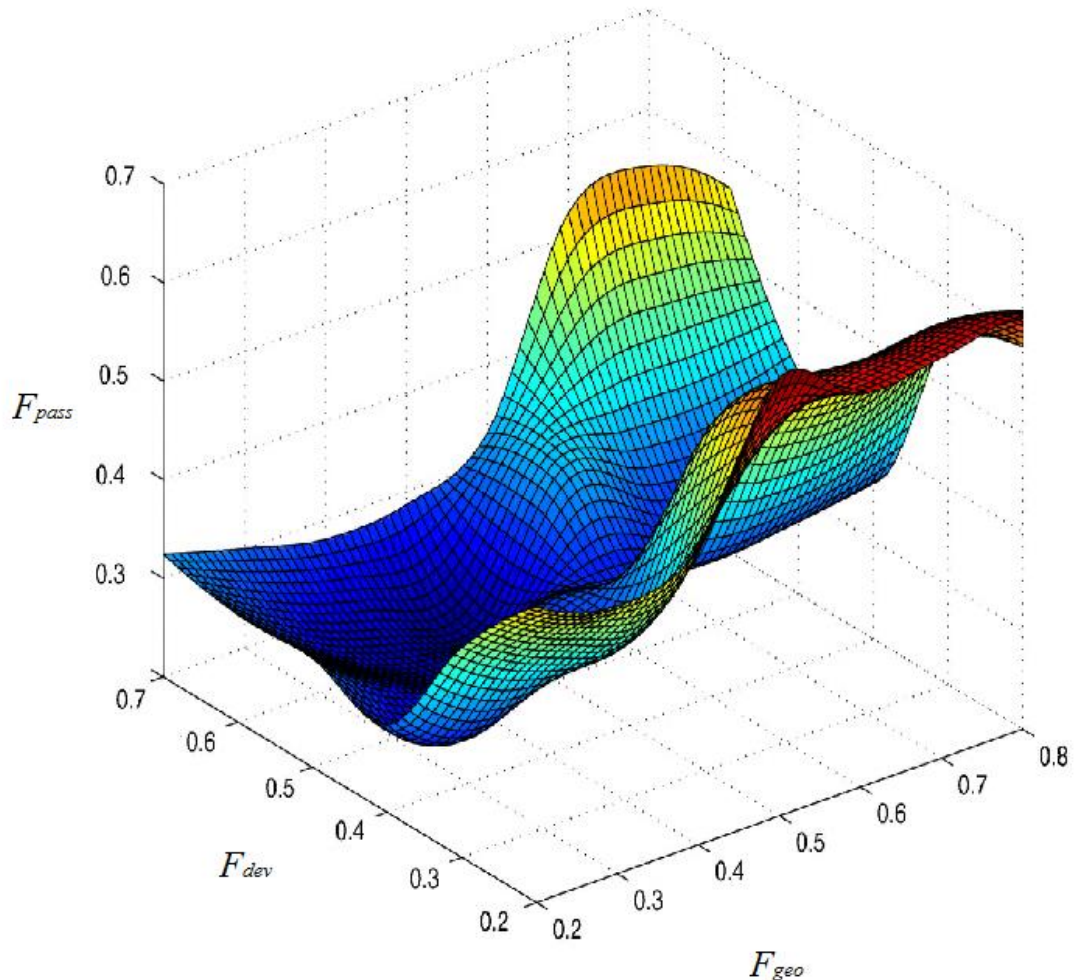


Рисунок 4.1 – Диаграмма факторов определения местоположения СЦ  
Второй целью предлагаемой стратегии сервисного технического обслужи-

вания и ремонта заключается в совокупном учете в процессе принятия управленческих решений прогнозной работоспособности объектов и системы, а так же экономических зависимостей между компонентами. Для этого предлагается двух-уровневый процесс принятия управленческих решений, как на системном, так и на компонентном уровне (рисунок 4.2).

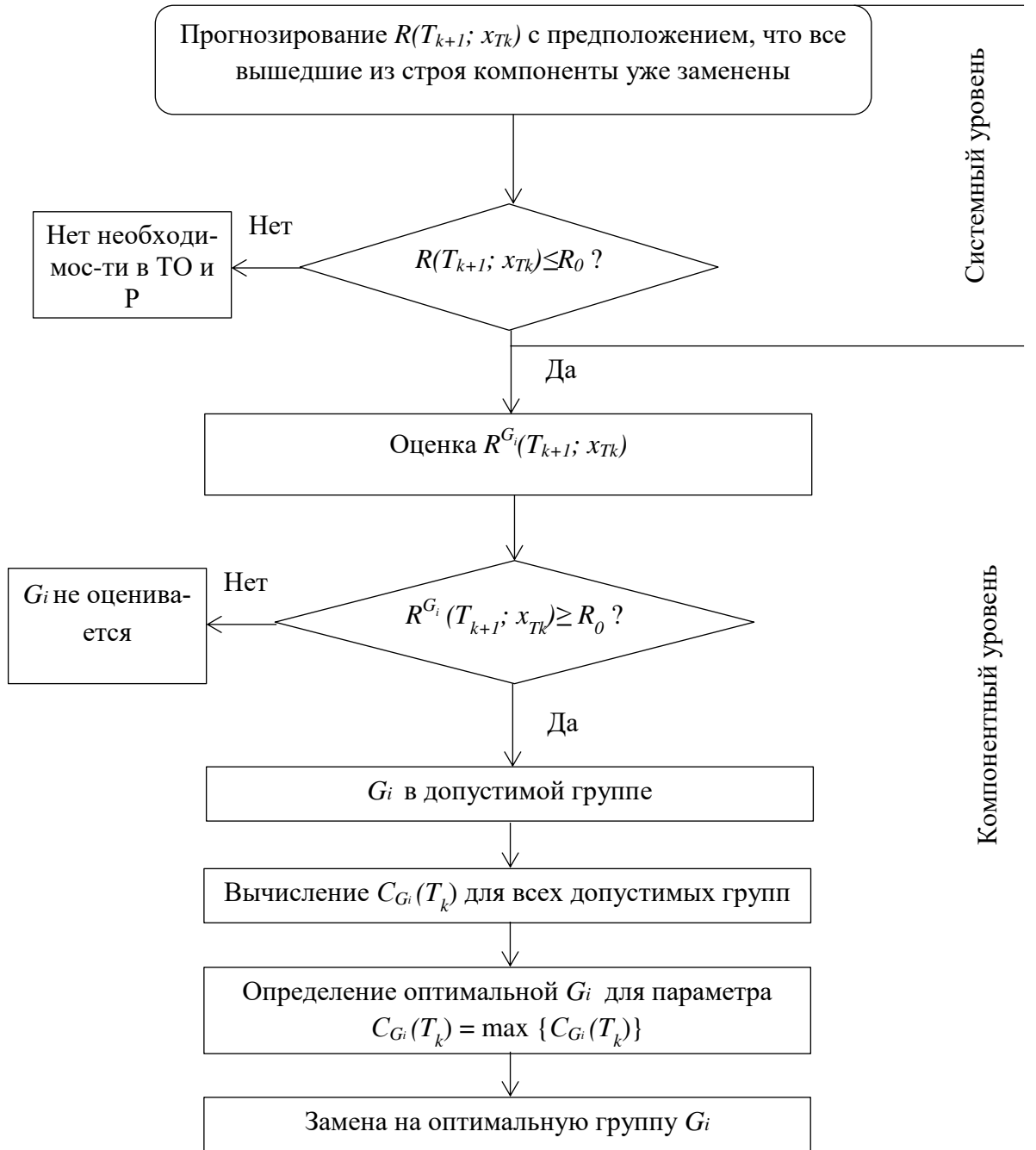


Рисунок 4.2 – Порядок принятия управленческих решений

На системном уровне принятия управленческих решений модель рассматривает пассажирский подвижной состав перед предшествующим периодом осмотра  $R(T_{k+1}; x_{Tk})$ . Во-первых, при прогнозе учитываются все виды отказов, произошедшие с подвижным составом за время  $T$ . Затем производится сравнение коэффициента исправности с пороговым значением  $R_0$  ( $0 < R_0 \leq 1$ ) для запуска расчетов для принятия решения, где  $R_0$  – переменная решения. Если необходимо действие по проведению ТО и Р, то дальнейшее определение алгоритма заключается в нахождении оптимального вида технического обслуживания или ремонта для поддержания пассажирского подвижного состава в исправном работоспособном состоянии.

На компонентном уровне принятия управленческого решения расчет алгоритма основан на факторе улучшения группы на основе производимых затрат на ТО и Р. Данный алгоритм позволяет выбрать определенную группу. Если в момент моделирования  $T_k$  проведение ТО или Р позволят повысить прогнозный коэффициент исправности системы выше  $R_0$ , система проводит внеплановые ТО и Р. Определение оптимального вида заключается в стоимости проводимых работ для конкретного вида подвижного состава. Исходя из множества возможных вариантов определенный вид ТО и Р рассчитывается исходя из следующей зависимости:

$$C_{Gi}(T_k) = \max_{i=1, 2^m-1} \left\{ C_{Gi}(T_k) \mid R^G(T_{k+1}) > R_0 \right\}, \quad (4.5)$$

где  $R^G(T_{k+1})$  – представляет собой прогнозную оценку коэффициента исправности подвижного состава после проведения внепланового вида ТО или Р по заданной группе  $G$ .

Рассматриваемый алгоритм влияет на интервал времени  $T$  проведения технического обслуживания и ремонта, а так же на порог коэффициента исправности подвижного состава.

Для достижения оптимального значения целевой функции модели сервис-

ного технического обслуживания и ремонта предполагается снижение затрат на проведение ТО и Р в течении всего жизненного цикла подвижного состава. Для обеспечения заданной целевой функции в модели реализовано математическое выражение долгосрочных затрат на ТО и Р в единицу времени.

Фактически основной прогноз стоимости жизненного цикла системы сервисного технического обслуживания и ремонта обусловлена последствиями принятия решений, принятых на ранних этапах проектирования. Большое влияние на эффективность системы и стоимость жизненного цикла оказывает влияние отказа на работоспособность. Разработанная методика принятия управленческих решений способна повлиять на необходимые изменения в технической системе.

Сравнивая эффективность технического обслуживания и ремонта существующей системы и предлагаемой стратегии сервисного технического обслуживания и ремонта введен критерий  $CS$ , определяющийся по формуле:

$$CS = \frac{C(T, R_t, R_o) - C(T^s, R_t^s, R_o^s)}{C(T, R_t, R_o)} \cdot 100 \quad (4.6)$$

где  $C(T, R_t, R_o)$  – соответствует затратам существующей политики ТО и Р;

$C(T^s, R_t^s, R_o^s)$  – соответствует затратам предлагаемой стратегии сервисного ТО и Р.

Согласно полученным экспериментальным значениям цифрового моделирования эффективность предлагаемой стратегии сервисного ТО и Р составляет около 29,3 %. Данная эффективность объясняется тем, что стратегия сервисного технического обслуживания влияет на структуру системы проведения ТО и Р, группируя проведение, а так же регулируя периоды проведения ремонта согласно статистики отказов подвижного состава.

По результатам эксперимента (рисунок 4.3) видно, что поверхность органи-



зации проведения ТО и Р имеет выпуклую форму, указывая на глобальное оптимальное решение. Каждый раз, когда интенсивность отказов подвижного состава увеличивается модель реализует улучшение системы посредством проведения внеплановых ТО и Р (рисунок 4.4), добиваясь оптимального баланса системы.

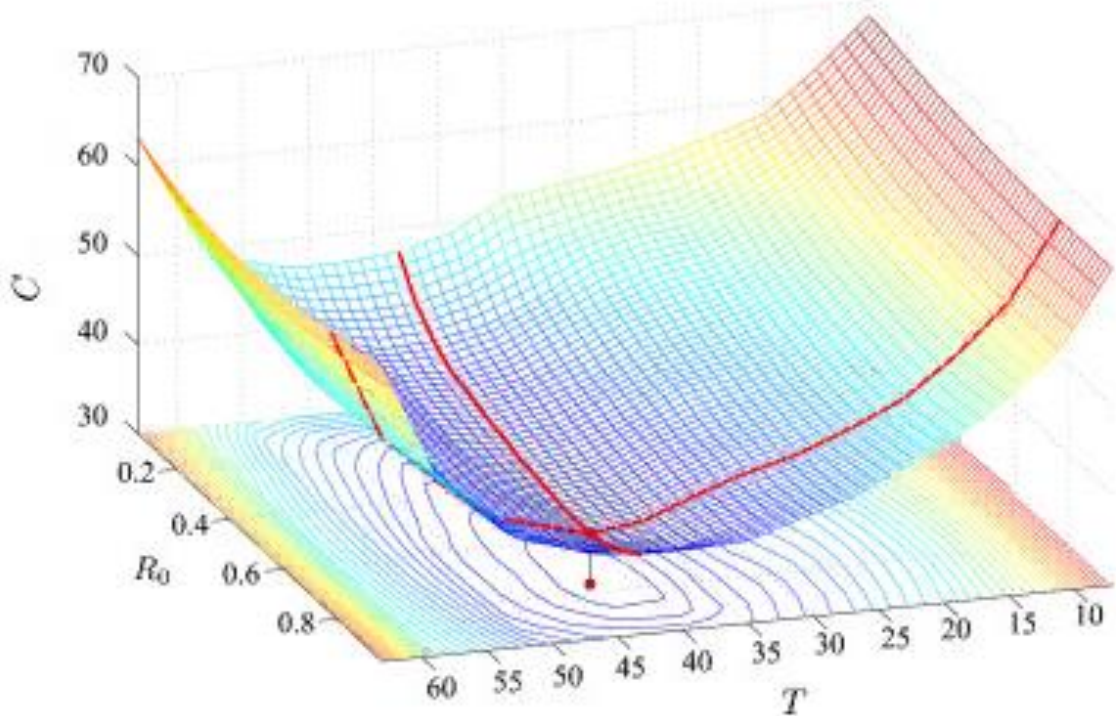


Рисунок 4.3 – Определение оптимальной организации сервисного ТО и Р

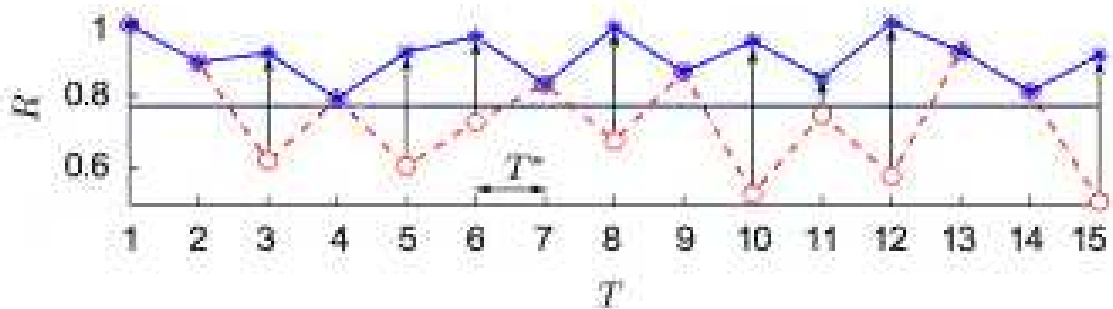


Рисунок 4.4 – Сравнение коэффициента готовности действующей и предлагаемой системы ТО и Р

Одним из достоинств стратегии сервисного технического обслуживания и ремонта является постоянный контроль параметров системы, учет запланированных и неучтенных затрат на проведение ТО и Р, затраты на время простоя по-

движного состава. Стратегия сервисного технического обслуживания и ремонта позволит оперативно принимать управленческие решения, создавая систему более гибкой и эффективной по сравнению с существующей стратегией ТО и Р.

#### **4.2 Влияние сервисного технического обслуживания и ремонта на управление интенсивностью отказов**

Подход цифрового моделирования сервисного технического обслуживания и ремонта основан на воздействии временной составляющей частоты отказов пассажирского подвижного состава. Проектируемая цифровая модель представляет собой минимум два состояния (состояние работы и отказа подвижного состава) с коэффициентом перехода между состояниями. Цифровое моделирование предоставит возможность регулировать влияние технического обслуживания и ремонта на адаптацию скорости перехода между отказами и рабочим состоянием пассажирского подвижного состава.

Техническое обслуживание и ремонт пассажирских вагонов объединяет в себе все виды ТО и Р, которые не допускают сбой работоспособного состояния. Не только виды и задачи технического обслуживания и ремонта, а так же связанный между ними интервал влияет на частоту отказов, но и уровень качества произведенных работ. Предполагается, что после проведения технического обслуживания и ремонта состояние подвижного состава совершенно, т.е. случай отказа минимален.

Сервисное ТО и Р пассажирского подвижного состава ведет к эволюции и трансформации стратегий от диагностических к прогнозирующим и предписывающим видам ТО и Р. На концептуальном уровне разработаны фундаментальные аспекты модели сервисного обслуживания для прогнозирования будущих событий и составления оптимальных планов с учетом многомодальности и структурной неоднородности данных.

Идея сервисного технического обслуживания состоит в том, что бы система проверяла и учитывала информацию об износах и отказах подвижного состава в модели принятия управленческих решений. Модель определяет, какие операции по техническому обслуживанию или ремонту могут быть расширены или отложены.

В существующем техническом обслуживании пассажирского подвижного состава восстановление производят тем элементам, с которыми произошел отказ в работе. Остальные элементы остаются без изменений.

Для оценки адаптивности создаваемой имитационной модели сервисного технического обслуживания необходимо рассмотреть вероятность влияния технического обслуживания на интенсивность отказов.

Вероятность отказов  $P_0, P(t)$  может быть рассчитана с помощью полумарковских цепей. Рассмотрим две модели. Первая модель – с существующим техническим обслуживанием (рисунок 4.5). Вторая модель – с сервисным техническим обслуживанием (рисунок 4.6).

Данные модели реализованы в двух разных полумарковских цепях.

$$\lambda(t) = \lambda_{i-1}(a_s \cdot t_i + t) \quad (4.7)$$

$$t \in (0, t_{i+1} - t_i)$$

$a_s$  представляет влияние сервисного технического обслуживания на частоту отказов подвижного состава и может быть интерпретировано как эффективность сервисного технического обслуживания для снижения частоты отказов.

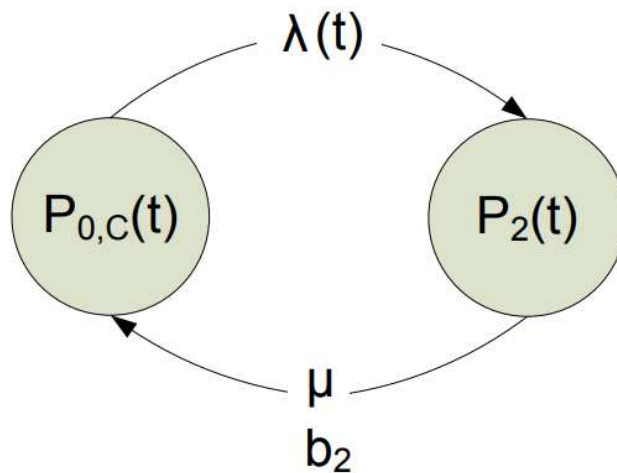


Рисунок 4.5 – Полумарковская цепь технического обслуживания

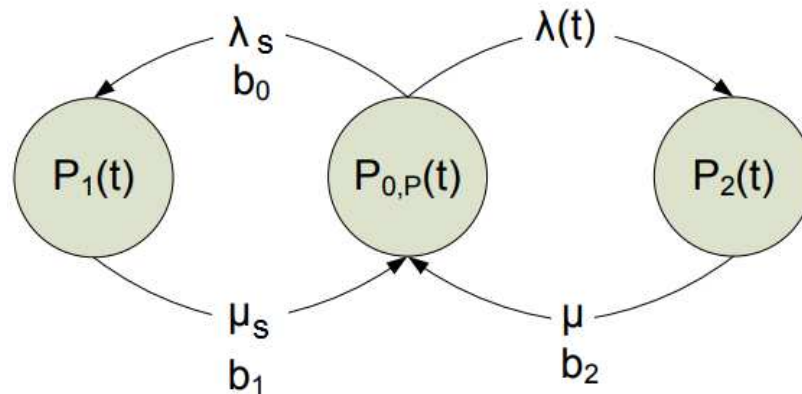


Рисунок 4.6 – Полумарковская цепь технического обслуживания и сервисного технического обслуживания

Данные полумарковские системы реализованы в имитационной среде AnyLogic с целью исследования эффективности сервисного технического обслуживания пассажирского подвижного состава в системах с различной частотой отказов.

В эксперименте сравниваются два имитационных прогона: один с  $b_0 = 0,05$  (с сервисным техническим обслуживанием) и другой с  $b_0 = 0$  (без сервисного технического обслуживания) (рисунки 4.7 и 4.8).

Вероятность перехода из одного состояния в другой заданы уравнения 3.2 и 3.3. Результаты расчетов приведены в приложении Б.

$$P = \frac{1}{T} \int_{T_i} P_{0,C}(t) dt \quad (4.8)$$

$$P_s = \frac{1}{T} \int_{T_i} P_{0,P}(t) dt \quad (4.9)$$

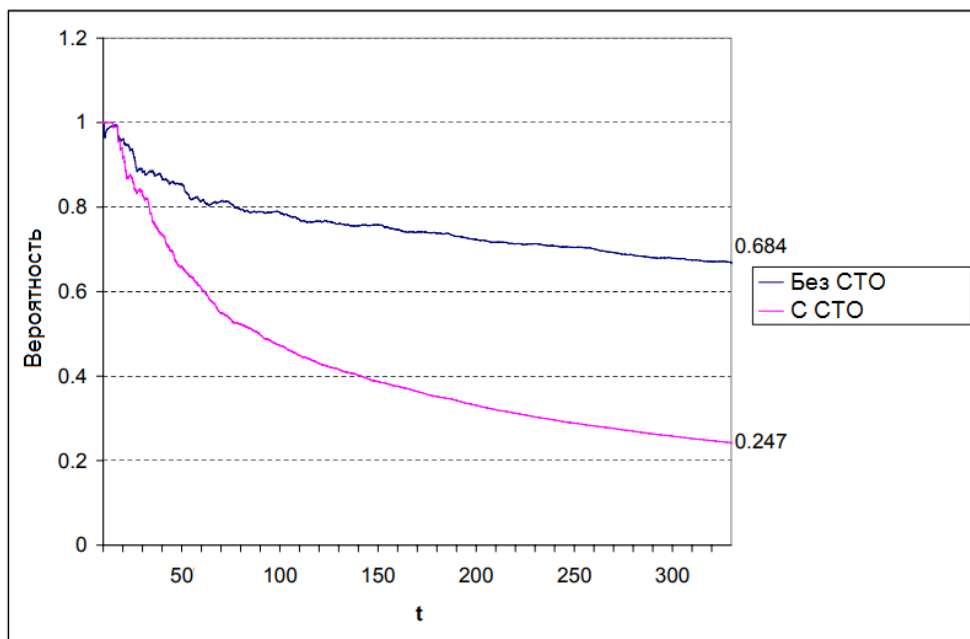


Рисунок 4.7 – Сравнение вероятности отказов с сервисным техническим обслуживанием и без него

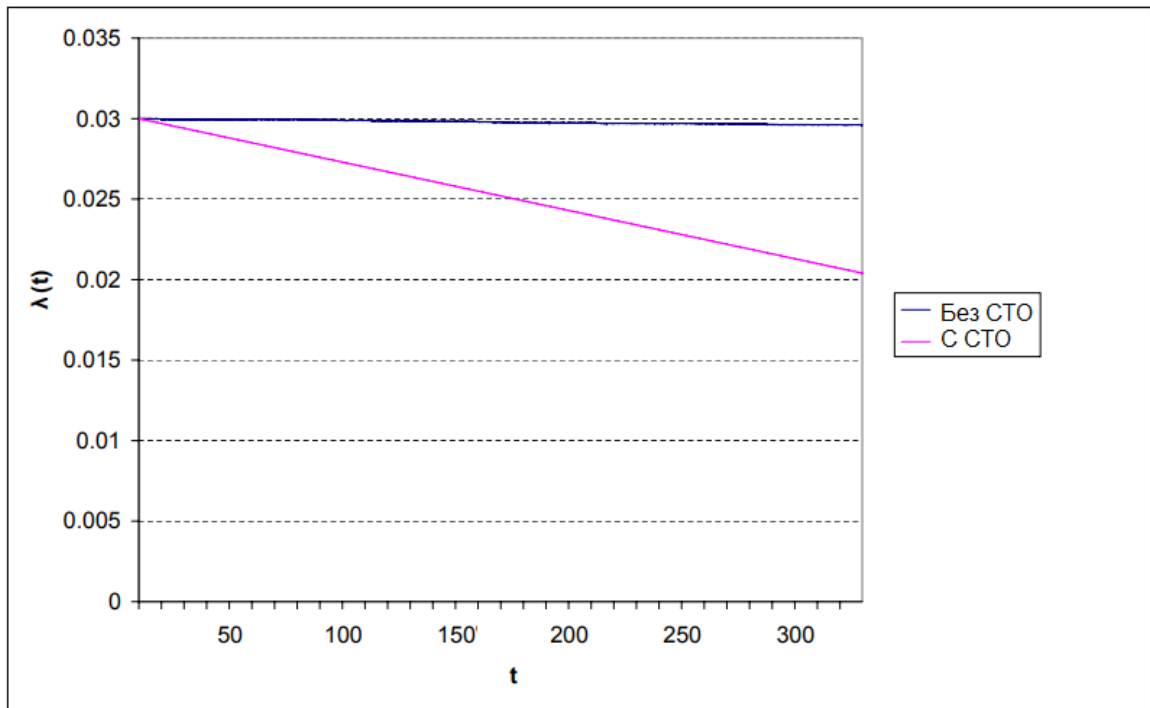


Рисунок 4.8 – Сравнение интенсивности отказов с сервисным техническим обслуживанием и без него

По полученным графикам зависимости можно сделать следующий вывод. Сервисное техническое обслуживание и ремонт оказывает значительное влияние на эффективности системы в отношении долгосрочной эксплуатации пассажирских вагонов

В рассматриваемых системах, характеристики отказа описываются с постоянным отказом. Мероприятия по профилактическому обслуживанию будут вызывать расходы на проведение сервисного технического обслуживания, используя технологические ресурсы предприятия-изготовителя подвижного состава.

Сервисное ТО и Р является перспективной стратегией выбора, если выполняются следующие два условия:

- в условии эксплуатации частота отказов подвижного состава увеличивается в период отсутствия сервисного ТО;
- расходы на сервисное ТО и Р ниже стоимости ремонта пассажирских вагонов.

Цифровое моделирование систем подтверждает, что сервисное техническое обслуживание и ремонт влияет на исправную работоспособность пассажирских вагонов.

### **Выводы по 4 главе**

1. Расчет частоты отказов пассажирских вагонов с использованием полумарковских цепей в цифровой модели позволила определить эффективность предлагаемой системы сервисного технического обслуживания и ремонта с использованием цифровой трансформации.

2. Определены показатели эффективности управления организацией сервисным техническим обслуживанием и ремонтом пассажирского подвижного состава в условиях цифровой трансформации производственных процессов.

3. Согласно полученным экспериментальным значениям цифрового моделирования эффективность предлагаемой стратегии сервисного технического обслуживания и ремонта составляет около 29,3 %.

В результате цифрового моделирования и сравнения вероятности отказов с сервисным ТО и Р – 0,2470; без сервисного ТО и Р – 0,6848.

4. В разработанной цифровой модели сервисного ТО и Р для каждого состояния ПС определено среднее нахождение в определенном состоянии. Закон распределения близок к экспоненциальному, в следствии чего гипотеза о согласии теоретического и эмпирического законов принимаются. т.е оснований отклонить предложенную модель сервисного ТО и Р нет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного системного анализа существующей системы организации технического обслуживания и ремонта выявлены изменения. На современном этапе развития пассажирской инфраструктуры необходим аппарат для определения оптимальной организационной структуры предприятий в условиях проведения сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов.

2. Для изучения цифровых технологий в производственных процессах по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирского подвижного состава введены термины: «Цифровая трансформация» и «Цифровая модель предприятия». Определены основные составляющие цифровой модели производственного процесса предприятия.

3. Предложена графоаналитическая модель технического состояния пассажирского подвижного состава с разделением видов производимых работ сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава по предприятиям полигона железной дороги.

4. В соответствии с графоаналитической моделью технического состояния пассажирского подвижного состава предложена система уравнений для пассажирских вагонов, находящихся в различных состояниях. Математическая модель реализована с использованием интервального метода.

5. Цифровая модель производственного процесса предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов, с учетом оценки вводимых изменений, их влияние на систему сервисного технического обслуживания и ремонта, а так же определение рационального распределения по видам производимых работ, как ремонта, так и технического обслуживания пассажирского подвижного состава.

6. Цифровая модель организационной структуры сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава на полигоне железной дороги предусматривает последовательную реализацию функционирования



системы с учётом влияния внешних факторов. Произведен анализ критериев цифровой трансформации, оптимизация производственных процессов по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирских вагонов.

7. Определены показатели эффективности управления организацией сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов в условиях цифровой трансформации производственных процессов.

8. Согласно полученным экспериментальным значениям цифрового моделирования эффективность предлагаемой стратегии сервисного технического обслуживания и ремонта составляет около 29,3 %.

В результате цифрового моделирования и сравнения вероятности отказов с сервисным ТО и Р – 0,2470; без сервисного ТО и Р – 0,6848.

10. В разработанной цифровой модели сервисного ТО и Р для каждого состояния ПС определено среднее нахождение в определенном состоянии. Закон распределения близок к экспоненциальному, вследствие чего гипотеза о согласии теоретического и эмпирического законов принимаются, т.е оснований отклонить предложенную модель сервисного ТО и Р нет.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 20.05.2020 г.).
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р «Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года» (вместе с «Долгосрочной программой развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года»). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_320741/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_320741/) (дата обращения: 20.05.2020 г.).
3. Голикова, Ю. А. Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта в России // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. – 2015. – № 3. – С. 32-37.
4. Акулов, М.П. Формирование системы управления пассажирским комплексом железных дорог в условиях организационных изменений: дисс. ... канд. экон. наук : 08.00.05 ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова». – Санкт-Петербург, 2016. 162 с.
5. Акулов, М.П. Влияние организационных изменений на систему управления пассажирским комплексом железных дорог // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 3 (44). – С. 5-13.
6. Бессонов, И.В., Ногаев, Д.И. Создание ОАО «ФПК» – обоснованная необходимость // Транспортное дело России. – 2010. – № 11. – С. 117-118.
7. Пехтерев, Ф.С. Стратегические направления развития скоростного и высокоскоростного движения в Российской Федерации // Ж.д. транспорт – 2012. – №7. – С. 17.
8. Банников, Д.А. Анализ применения аутсорсинга в АО «ФПК» при подготовке пассажирских составов в рейс // В сборнике: Инновационные проекты и

технологии машиностроительных производств материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием. С. Г. Шантаренко (отв. редактор). – 2015. – С. 83-88.

9. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р // «КонсультантПлюс»: URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 16.11.2017).

10. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р (с утв. изменениями распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 июня 2014 года № 1032-р.) // «КонсультантПлюс»: URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 16.11.2017).

11. Анисимов, П.С. Вопросы организации высокоскоростного движения // Ж.д. транспорт – 2010. – № 6. – С. 73.

12. Евсеев, Д. Г. Эволюция организации ремонта подвижного состава // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 81-83.

13. История железнодорожного транспорта Советского Союза. Том 3.

14. Бродовский, А. Л. Организация вагонного хозяйства и содержание вагонов. – М.: Трансжелдориздат. – 1947. – 450 с.

15. Бородай, С. М. Система ремонта и повышение работоспособности вагонов // Железнодорожный транспорт: Научно-теоретический технико-экономический журнал – М. : Транспорт. – 1980. – № 4. – С. 59–62.

16. Лапшин, В.Ф., Орлов, М.В. Основы технического обслуживания: Учебное пособие. // Екатеринбург: УрГУПС. – 2006. – 375 с.

17. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 13 января 2011 г. № 15 «О внесении изменений в приказ Министерства путей сообщения Российской Федерации от 4 апреля 1997 г. № 9Ц».

18. Лapidус, Б.М. Методическое обеспечение рыночных механизмов экономического управления на железнодорожном транспорте // Москва: МЦФЭР, 2007. – 160 с.
19. Iwasa, K. Rail International // Transport research. – 2004. – № 8 – pp. 78-84.
20. Leborgne, G. La Vie du Rail International // Transport research. – 2008. – № 4 – pp. 16-19.
21. Kirchner, C. Rail Liberalization Index // IBM Global Business Services, Brussels. Prior issues of this index were prepared in 2002, 2004 and 2007. – 2011. – 356 p.
22. Сирина, Н.Ф., Методологические основы формирования адаптивных механизмов организации вагоноремонтного комплекса: дисс. ... д-ра тех. наук : 05.02.22 // ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения» Екатеринбург. 2009. – 295 с.
23. Сирина, Н.Ф. Моделирование управления вагоноремонтным комплексом // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2009. – С. 12-20.
24. Сирина, Н.Ф., Цыганов, В.В. Адаптивные механизмы оценки и классификации дальновидных систем // Проблемы управления. – 2006. – № 6. – С. 93-95.
25. Устич, П. А. Оценка остаточного срока службы составной части вагона с учетом управляемого риска ее отказа // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 12. – С. 56–59.
26. Устич, П. А. Работоспособность и надежность грузового вагона: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / – Москва. – 1992. – 43 с.
27. Andriole, S.J., Cox, T., Khin, K.M. The innovator's imperative: Rapid technology adoption for digital transformation // CRC Press, Boca Raton. – US. – 2017. – 287 p.
28. Бабушкин, В.М. Некоторые аспекты применения современных информационных систем управления жизненным циклом изделия // Вестник Казан-

ского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2018. – Т. 74. № 1. – С. 92-97.

29. ГОСТ 32884-2014 Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт железнодорожного подвижного состава. Термины и определения.

30. Распоряжение ОАО «Российские железные дороги» от 17.03.2008 № 509р. «О регламенте определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта». URL: <http://docs.cntd.ru/document/902110528> (дата обращения: 20.01.2018).

31. Шикина, Д. И. Оптимизация нормативного срока службы и системы технического обслуживания и ремонта вагона с учетом качества его ремонтов (на примере полувагона): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 // – Москва, 2012. – 24 с.

32. Гурский, Е. П. Совершенствование технического обслуживания грузовых вагонов на основе вероятностного анализа их отказов // Механика. Исследования и инновации. – 2014. – № 10. – С. 48-54.

33. Болотин, М. М., Осинковский, Л. Л. Автоматизация производственных процессов при изготовлении и ремонте вагонов. – М. : Транспорт, 1989. – 206 с.

34. Белов, И.В. Математические методы в планировании на железнодорожном транспорте // – Москва: Транспорт, 1972. – 248 с.

35. Pierskalla, W.J., Voelker, J.A. A survey of maintenance models: The control and surveillance of deteriorating systems // Naval Research Logistics Quarterly. – № 23. – 1976. – pp. 353-388.

36. Osaki, S., Nakagawa, T. Classical Maintenance Models // IEEE Transactions on Reliability. – № 25. – 1976. – pp. 284-287.

37. Sherif, Y.S., Smith, M.L. Optimal maintenance models for systems subject to failure – A Review // Naval Research Logistics Quarterly. – № 28. – 1981. – pp. 47-74.

38. Valdez-Flores, C., Feldman, R.M. A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems // *Naval Research Logistics*. – № 36. – 1989. – pp. 419-446.
39. Cho, D.I., Parlar, M. A survey of maintenance models for multi-unit systems // *European Journal of Operational Research*. – № 51. – 1991. – pp.1-23.
40. Campbell, J.D. *Strategies for Excellence in Maintenance Management // Uptime (Productivity Press)*. Portland. – 1995. – 368 p.
41. Берж, К. Теория графов и ее применения. // М.: Иностранная литература. – 1962. – 319 с.
42. Громов, И. Д. Формирование и оценка организационных сетевых структур с разделенными интересами (на примере холдинга «РЖД»): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22 / Громов Игорь Дмитриевич. – Екатеринбург, 2015. – 20 с.
43. Патюрель, Р. Создание сетевых организационных структур // *Проблемы теории и практики управления*. – 1997. – № 3. – С. 76-81.
44. Евсеев, Д.Г., Щербаков, К.Г. Сервисное обслуживание ТПС с управлением жизненным циклом. // *Мир транспорта*. – 2014. – Т. 12. № 3 (52). – С. 134–139.
45. Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. А.А. Вавилова. – Москва: Машиностроение. – 1983. – 416 с.
46. Вентцель, Е. С. Прикладные задачи теории вероятностей // М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
47. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения // М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 384 с.
48. Артемов А.В. Модель процесса организации сервисного обслуживания и ремонта распределенных стационарных объектов. // *Информационные системы и технологии*. – 2010. – № 2 (58). – С. 14–18.
49. Устич, П. А. Концепция интеллектуального управления / П. А. Устич, А. А. Иванов, В. Б. Митюхин // *Мир транспорта*. – 2008. – № 3. – С. 4–11.

50. Устич, П. А. Управление транспортом на основе математического управления / П. А. Устич // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 7. – С. 39–42.
51. Райков, Г. В. Концепция автоматизированной системы управления вагонным хозяйством / Г. В. Райков, Н. Г. Мартынюк, В. Я. Телишевская // Сер.: Вагоны и вагонное хозяйство. Ремонт вагонов. – ОИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 2003. – Вып. 2–3. – С. 61–68.
52. Сай, В. М. Методология построения сетевых организационных структур на железнодорожном транспорте: дис. д-ра техн. наук : 05.02.22 / Сай В.М. – Екатеринбург, 2003. – 389 с.
53. Сай, В. М. Организационные структуры как мультиоператорные сети. Задачи прочности и устойчивости / В.М. Сай, С.В. Сизый // Транспорт Урала. – № 2(21). – 2009. – С. 5-8.
54. Сай, В. М. Формирование организационных структур управления: Научная монография. - М.: ВИНТИ РАН, 2003. - 437 с.
55. Буткин, М. Г. Комплексная оценка технического состояния грузовых вагонов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Буткин Михаил Геннадьевич. – Екатеринбург, 2000. – 214 с.
56. Козлов, П.А. Организационные подходы и модели оптимизации / П.А. Козлов, И.В. Осокин, В.Ю. Пермикин // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 18-23.
57. Мамаев, Э.А. Моделирование региональных транспортных систем в условиях конкуренции: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01 / Э.А. Мамаев. – М., 2006. – 348 с.
58. Михалевич, В.С. Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования / В.С. Михалевич, В.А. Трубин, Н.З. Шор. – Москва: Наука, 1986. – 260 с.
59. Персианов, В. А. Моделирование транспортных систем / В.А. Персианов, К.Ю. Скалов, Н.С. Усков. – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.

60. Банников, Д.А., Галкин, А.Г., Сирина, Н.Ф. Алгоритм расчета организации сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава. // Транспорт Урала. – 2017. – № 55. – С. 31-35.
61. Bannikov, D.A., Sirina, N.F. Development of innovative railway rolling stock technologies. // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Т. 1115. – pp. 401-407.
62. Эшби, У.Р. Принципы самоорганизации / У.Р. Эшби. - М.: Мир, 1996. - 462 с.
63. Евсеев Д. Г. Эволюция организации ремонта подвижного состава // Наука и техника транспорта. – 2014. –№ 3. – С. 81-83.
64. Устич, П.А. Вагонное хозяйство: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / П.А. Устич, И.И. Хаба, В.А. Ивашов; [ под ред. П.А. Устича ]. – М.: Маршрут, 2003. – 560 с.
65. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретны систем. / Т. И. Алиев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
66. Инженерная логистика: логистически-ориентированное управление жизненным циклом продукции: Учебник для вузов / Под ред. Л.Б. Миротина и И.Н. Омельченко. – М.: Горячая линия – Телеком, – 2011. – 644 с.
67. Мамаев, Э.А. Моделирование региональных транспортных систем в условиях конкуренции: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01 / Э.А. Мамаев. – М., 2006. – 348 с.
68. Петров, М. Б. Методология организации региональной транспортно-портной системы: дис. д-ра техн. наук : 05.22.01 / Петров М. Б.. – М., МИИТ, 2004. – 322 с.
69. Подвербный, В. А. Принятие решений в многокритериальных недетерминированных задачах проектирования железных дорог: дис. д-ра техн. наук : 05.22.06 / Подвербный В.А. – М., 2001. – 420 с.
70. Рахмангулов, А. Н. Методологические основы организации функционирования железнодорожных промышленных транспортно-технологических си-



стем: автореф. дис. ... д-р техн. наук: 05.22.01 / Рахмангулов Александр Нельевич. – Москва, 2013. – 48 с.

71. Сацук, Т. П. Система ключевых показателей результативности в экономике организаций железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 1. – С. 144-148.

72. Рахмангулов, А.Н. Выбор мест для логистических мощностей // Мир транспорта. – 2012. - №1. – С. 84-91.

73. Владимирская, И.П. Метод оптимизации структуры транспортной системы // Мир транспорта. – 2009. – № 2. – С.84-87.

74. Самуйлов, В.М., Петров, А.В., Рахимова, Е.А. Концепция формирования звездообразных сетевых структур в региональных транспортно-логистических системах. // Инновационный транспорт. – 2012. – № 3 (4). – С. 57-61.

75. Самуйлов, В.М., Кириленко, С.В., Каргапольцева, Т.А. Развитие ускоренных пригородных пассажирских перевозок с применением инновационного подвижного состава «Ласточка». // Инновационный транспорт. – 2019. – № 2 (32). – С. 16-22.

76. Crespo Marquez, A., Moreu de Leon, P., Gomez Fernandez, J.F., Parra Marquez, C., Gonzalez, V. The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. Safety, Reliability and Risk Analysis. // Theory, Methods and Applications – Martorell et al. Taylor & Francis Group, London. – 2009. – pp. 669-674.

77. Гончарук, С. М. Принятие решений при проектировании облика и мощности сети железных дорог (системный подход). В 3 ч. Ч. 1. Методология формирования альтернатив облика и мощности сети железных дорог с учетом надежности ее функционирования : монография / С.М. Гончарук, А.В. Гавриленков, В.С. Шварцфельд. – Хабаровск : ДВГУПС, 2003. – 178 с.

78. Шварцфельд, В. С. Принятие решений при проектировании облика и мощности сети железных дорог (системный подход) : монография. В 3-х. Ч. 2.

Поддержка принятия решений по проектированию облика и мощности сети железных дорог на основе геоинформационной аналитической системы / В.С. Шварцфельд, С.М. Гончарук. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2003. – 224 с.

79. Чаринцева, В.А. Управление производительностью: / В.А. Чаринцева; под ред. Ф.И. Парамонова. - М.: ООО фирма «Благовест-В», 2006. - 280 с.

80. Черныш, Е.А. Прогнозирование и планирование в условиях рынка: Учебное пособие. - М.: ПРИОР, 2006. - 176 с.

81. Эшби, У.Р. Принципы самоорганизации / У.Р. Эшби. - М.: Мир, 1996. - 462 с.

82. Templar, R. - The Rules of Management. A Definitive Code for Managerial Success. 2005. - P. 73.

83. VahidJafari-Sadeghi, F., Candelo, E. Jerome Couturier. Exploring the impact of digital transformation on technology entrepreneurship and technological market expansion: The role of technology readiness, exploration and exploitation. // Journal of Business Research. – 2021. – Volume 124. –pp. 100-111

84. Pedonea, G., Mezgara, I. Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready Industry 4.0 technologies. // Journal of Computers in Industry. – 2018. – 195 p.

85. Holmgren, J., Davidsson, P., Persson, J., Ramstedt, L. TAPAS: a multi-agent based model for simulation of transport chains. // Simul Model Pract Theory. – 2012. – № 23. – pp. 1-18.

86. ГОСТ 31539–2012. Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения.

87. Лхамжавын, Болд. Разработка и обоснование сроков службы и системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов (на примере полувагонов Улан-Баторской железной дороги): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Лхамжавын Болд. – Москва, 2009. – 24 с.

88. Мажидов, Ф. А. Оценка остаточного срока службы грузового вагона с учетом его технического состояния: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Мажидов Фируз Абдувахобович. – Москва, 2016. – 162 с.
89. Мартынюк, Н. Г. Этапы разработки и становления АСУ вагонным хозяйством / Н. Г. Мартынюк. – М.: ЦНИИТЭИ МПС, 1997. – 51 с.
90. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М.: МПСИ, 2005. – 583 с.
91. Петров, С. В. Методы обоснования нормативов межремонтной наработки грузовых вагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Петров Сергей Владимирович. – Москва, 2013. – 24 с.
92. Пирогова, И. Н. Математические модели: методические указания / И. Н. Пирогова, П. П. Скачков. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 44 с.
93. Болотин, М. М. Системы автоматизации производства и ремонта вагонов / М. М. Болотин, В. Е. Новиков. – М.: Маршрут, 2004.
94. Bannikov D.A., Sirina N.F. Service maintenance and repair of passenger cars in the concept of digital enterprise. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. – 2020. – pp. 21-28.
95. Alexandrov, A.E., Bannikov, D.A., Sirina N.F. Agent-based modeling of service maintenance and repair of rolling stock // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH – 2019. pp. 12-19.
96. Bannikov, D.A., Sirina N.F., Smolyaninov A.V. Model of the maintenance and repair system in service maintenance management. // Transport Problems. – 2018. – Т. 13. № 3. – С. 5-14.
97. Hai, W., Hai, Y.. Methodological Ridesourcing systems: A framework and review. // Transportation Research. – 2019. – Part B. № 129. – pp. 122–155.

98. Tri, R., Dermawan, W., Reza, A. Design of Self-service Technology for Passenger Shipping Transportation Service System in Indonesia. // *Procedia Manufacturing*. – 2015. – № 4. – pp 402–411.
99. Zheng, H., Rayman-Bacchus, L., Yiming, W.. Self-organization of industrial clustering in a transition economy: A proposed framework and case study evidence from China. // *Research Policy*. – 2011. – № 40. – pp. 1280-1294.
100. Yi, L., Fulong, W. The transformation of regional governance in China: The rescaling of statehood. // *Progress in Planning*. – 2012. – № 78. – pp. 55–99.
101. Treber, S., Breig, R., Kentner, M., Hafner, B. Information Exchange in Global Production Networks: Increasing Transparency by Simulation, Statistical Experiments and Selection of Digitalization Activities. // *Procedia CIRP*. – 2019. – № 84. – pp. 225–230.

**Приложение А. Вероятность перехода состояний пассажирского вагона в системе сервисного технического обслуживания и ремонта**

Таблица А1 – Вероятность перехода состояний пассажирского вагона

Вид перехода	Состояние отказа		Состояние восстановления		Вероятность перехода	
	С СТОиР	Без СТОиР	С СТОиР	Без СТОиР	С СТОиР	Без СТОиР
$S_0 - S_1$	0,0263	0,0395	0,0285	0,0399	0,2470	0,6848
$S_0 - S_2$	0,0445	0,0623	0,0336	0,0518	0,0279	0,0379
$S_0 - S_3$	0,0192	0,0289	0,0039	0,0065	0,0165	0,0279
$S_0 - S_4$	0,0096	0,0185	0,0008	0,0018	0,0041	0,0061
$S_0 - S_5$	0,0024	0,0035	0,0006	0,0015	0,0035	0,0079

**Приложение Б. Справочник состояний пассажирского вагона в системе сервисного технического обслуживания и ремонта**

Таблица Б1 – Справочник состояний пассажирского вагона

Код состояния	Сокращенное наименование	Наименование состояния
01	Отстой	Вагон в парке отстоя
02	Техрезерв	Вагон в технологическом резерве
03	Дальн. Пасс. Поезд	Вагон в поезде дальнего сообщения
04	Местн. Пасс. Поезд	Вагон в поезде местного сообщения
05	Завод	Вагон на заводе-изготовителе / сервисном предприятии
06	ДР	Вагон в деповском ремонте
07	КР	Вагон на капитальном ремонте
08	ТО-3	Проведение технического обслуживания ТО-3
09	ТР	Вагон в текущем ремонте
10	Нап. На завод	Направляется на завод-изготовитель / сервисное предприятие
11	Нап. В депо	Направляется в депо
12	Ож. ТО-3	Вагон ожидает ТО-3
13	Ож. ТР	Вагон ожидает текущий ремонт
14	ТО-1	Проведение технического обслуживания ТО-1
15	ТО-2	Проведение технического обслуживания ТО-2

Таблица Б2 – Значения  $\chi^2$  для состояний пассажирского вагона

Код со- стояния	Значение $\chi^2$		Значение $\chi^2_{0,95}$		Значение $\chi^2_{0,99}$		Значение $\chi^2_{0,995}$	
	С СТОиР	Без СТОиР	С СТОиР	Без СТОиР	С СТОиР	Без СТОиР	С СТОиР	Без СТОиР
01	23,83	22,15	16,95	14,89	21,97	19,99	23,69	21,45
02	20,15	18,30	15,40	12,06	19,15	17,56	21,99	18,46
03	24,15	23,51	17,85	16,92	22,58	21,68	24,15	23,43
04	24,15	23,51	17,85	16,92	22,58	21,68	24,15	23,43
05	20,16	29,14	16,89	19,22	21,64	23,15	23,59	25,01
06	20,16	29,14	16,89	19,22	21,64	23,15	23,59	25,01
07	20,16	29,14	16,89	19,22	21,64	23,15	23,59	25,01
08	18,03	19,88	16,92	19,45	21,67	23,45	23,66	25,45
09	12,06	20,15	13,45	21,11	15,01	22,65	22,01	22,99
10	20,16	29,14	16,89	19,22	21,64	23,15	23,59	25,01
11	20,16	29,14	16,89	19,22	21,64	23,15	23,59	25,01
12	18,03	19,88	16,92	19,45	21,67	23,45	23,66	25,45
13	12,06	20,15	13,45	21,11	15,01	22,65	22,01	22,99
14	24,15	23,51	17,85	16,92	22,58	21,68	24,15	23,43
15	24,15	23,51	17,85	16,92	22,58	21,68	24,15	23,43

Таблица Б3 – Вероятность перехода из одного состояния в другой

Исходный код состояния	Код состояния перехода	Вероятность перехода
01 Вагон в парке отстоя	03 Вагон в поезде дальнего сообщения	1,0
01 Вагон в парке отстоя	04 Вагон в поезде местного сообщения	1,0
02 Вагон в технологическом резерве	03 Вагон в поезде дальнего сообщения	0,9213
02 Вагон в технологическом резерве	04 Вагон в поезде местного сообщения	0,8915
03 Вагон в поезде дальнего сообщения	02 Вагон в технологическом резерве	0,9213
04 Вагон в поезде местного сообщения	02 Вагон в технологическом резерве	0,8915
03 Вагон в поезде дальнего сообщения	13 Вагон ожидает текущий ремонт	0,0104
04 Вагон в поезде местного сообщения	13 Вагон ожидает текущий ремонт	0,0104
03 Вагон в поезде дальнего сообщения	09 Вагон в текущем ремонте	0,0104
04 Вагон в поезде местного сообщения	09 Вагон в текущем ремонте	0,0104
05 Вагон на заводе-изготовителе / сервисном предприятии	02 Вагон в технологическом резерве	0,2456
05 Вагон на заводе-изготовителе / сервисном предприятии	01 Вагон в парке отстоя	0,2961
06 Вагон в деповском ремонте	02 Вагон в технологическом резерве	0,3619
06 Вагон в деповском ремонте	01 Вагон в парке отстоя	0,4016
07 Вагон на капитальном ремонте	02 Вагон в технологическом резерве	0,3619
07 Вагон на капитальном ремонте	01 Вагон в парке отстоя	0,4016
08 Проведение технического обслуживания ТО-3	03 Вагон в поезде дальнего сообщения	0,4129



## Продолжение таблицы Б3

Исходный код состояния	Код состояния перехода	Вероятность перехода
08 Проведение технического обслуживания ТО-3	04 Вагон в поезде местного сообщения	0,3856
09 Вагон в текущем ремонте	03 Вагон в поезде дальнего сообщения	0,9316
09 Вагон в текущем ремонте	04 Вагон в поезде местного сообщения	0,9316
14 Проведение технического обслуживания ТО-1	03 Вагон в поезде дальнего сообщения	1,0
14 Проведение технического обслуживания ТО-1	04 Вагон в поезде местного сообщения	1,0
15 Проведение технического обслуживания ТО-2	03 Вагон в поезде дальнего сообщения	0,549
15 Проведение технического обслуживания ТО-2	04 Вагон в поезде местного сообщения	0,499

## Приложение В. Акт об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

### АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

Банникова Дмитрия Андреевича

Настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Моделирование технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов в условиях цифровизации производственных процессов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы в производственно-хозяйственной деятельности в виде:

1. Цифровой модели предприятия по сервисному техническому обслуживанию и ремонту пассажирского подвижного состава, позволяющая оценивать производственные сценарии.

2. Цифровой модели организационной структуры сервисного технического обслуживания и ремонта пассажирского подвижного состава на полигоне железной дороги, предусматривающая последовательную реализацию функционирования системы с учётом влияния внешних факторов.

3. Ключевых показателей эффективности цифрового управления организацией сервисным техническим обслуживанием и ремонтом, влияющих на принятие управленческих решений на всех этапах жизненного цикла подвижного состава.

Главный инженер

Уральского филиала АО «РЖД»



/А. С. Кузнецов