

На правах рукописи



**Шмидт Артем Олегович**

**ТЕХНОЛОГИЯ ГИБКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
СОСТАВНОСТИ В ПРИГОРОДНОМ СООБЩЕНИИ**

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

**Научный руководитель** – Тушин Николай Андреевич  
доктор технических наук

**Официальные оппоненты:**

Копылова Екатерина Витальевна, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы», профессор.

Каликина Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС), кафедра «Организация перевозок и безопасность на транспорте», заведующий кафедрой.

**Ведущая организация:**

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

Защита диссертации состоится «29» марта 2024 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 44.2.008.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС) по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещены диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>. Автореферат диссертации разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Колясов Константин Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Пригородные перевозки имеют важное социально-экономическое значение, как в масштабах всей страны, так и в конкретных субъектах РФ. Это связано с обеспечением необходимого уровня мобильности граждан, что способствует экономическому росту, удовлетворению бытовых, социальных и культурных потребностей населения. Железнодорожный транспорт может обеспечить массовые перевозки пассажиров при любых неблагоприятных погодных условиях в соответствии с установленным расписанием при относительно высоком уровне безопасности. Тем не менее, активное развитие автодорожной сети и рост автомобилизации населения России привели к оттоку пассажиров с общественного транспорта. Уменьшение пассажиропотока привело к снижению населенности и сокращению количества вагонов в пригородных составах. Экономика эксплуатации нового подвижного состава требует увеличивать заполняемость вагонов сверх имеющихся мест для сидения. А это не соответствует требованиям пассажиров, для которых комфорт перевозки занимает одно из главных мест среди параметров обслуживания.

Отмена перекрестного субсидирования пригородных пассажирских перевозок на фоне реформирования железнодорожного транспорта обострила проблему убыточности пригородного комплекса ОАО «РЖД». Размеры пассажиропотоков на большей части территории страны не позволяют получать прибыль перевозочным компаниям. Множество участков не имеет альтернатив обслуживания социальных маршрутов. Региональные регулирующие органы вынуждены решать проблему расходов пригородных компаний. Повысить эффективность пригородного комплекса возможно за счет снижения транспортной работы. Но при этом необходимо обеспечить высокий уровень качества обслуживания пассажиров. На первый план выходит задача обоснования оптимальной схемы обслуживания полигонов пригородных компаний моторвагонным подвижным составом.

Усиление конкуренции на рынке транспортных услуг при одновременном повышении требований клиентов к качеству сервиса определило и научно-технические, и технологические приоритеты Холдинга ОАО «РЖД» на перспективу до 2030 года (Белая книга). Одним из приоритетных направлений выделено создание и внедрение динамических систем управления перевозочным процессом с использованием искусственного интеллекта. Интеллектуальные системы должны обеспечить гибкое реагирование на динамические изменения объемов, структуры, характера и направленности пассажиропотоков. Целью разработки цифровых технологий является оптимизация архитектуры и операционных систем железнодорожных сетей на уровне маршрута и отдельного поезда.

**Степень разработанности темы исследования.** Совершенствование пригородных пассажирских перевозок всегда являлось одной из ключевых задач

железнодорожной отрасли. Большой практический и научный вклад в решение вопросов рационального функционирования пригородного комплекса внесли исследования таких ученых, как А.П. Артынов, В.Л. Белозеров, А.Ю. Белянкин, Н.И. Бещева, С.А. Бывшев, С.П. Вакуленко, И.И. Васильев, В.В. Гарбузова, Е.П. Голубков, П.Я. Гордеенко, А.Н. Киселев, С.И. Конон, Ф.П. Кочнев, В.К. Курбатов, А.Г. Латышев, В.И. Лукашев, О.А. Медведь, Е.П. Польшинцев, Н.В. Правдин, Л.А. Пышкина, С.М. Резер, В.М. Сай, Н.А. Самарина, Н.П. Терёшина, В.И. Терзи, В.Г. Шубко.

Вопросы оптимизации транспортных процессов освещены в работах А.Э. Александрова, А.К. Головнича, В.В. Доенина, П.А. Козлова, Е.В. Копыловой, О.В. Осокина, Ю.О. Пазойского, Н.А. Тушина и др. Большинство научных работ было посвящено пригородным перевозкам в крупных железнодорожных узлах со значительными размерами пассажиропотока. Во многих субъектах Российской Федерации наблюдаются низкие объемы перевозок. Организации пригородных перевозок в областных центрах в научных исследованиях уделялось недостаточное внимание. Технология организации модульного движения рассматривалась многими учеными и исследователями, однако динамические оптимизационные модели принятия решений в автоматизированных системах не применяются.

В диссертации предлагаются основные подходы для разработки системы управления оборотом модульного пригородного моторвагонного подвижного состава, которая обеспечит гибкое реагирование на динамическое изменение пассажиропотоков.

**Направление исследований:** планирование, организация и управление транспортными потоками.

**Объект исследования:** пассажирские перевозки в пригородном железнодорожном сообщении.

**Предмет исследования:** управление обращением пригородного подвижного состава.

**Цель работы:** разработать технологию гибкого регулирования составности в пригородном железнодорожном сообщении.

**Задачи:**

- провести анализ актуального состояния и основных тенденций в пригородном пассажирском комплексе;
- обосновать выбор метода для оптимизации модульных пригородных пассажирских перевозок;
- сформулировать задачу и разработать математическую модель оптимизации по расчету графика оборота модульных пригородных составов;
- провести эксперименты на разработанной модели для пригородных участков Свердловской железной дороги;

– разработать методические основы гибкого регулирования составности в пригородном сообщении.

**Научную новизну исследования** составляют:

- формализованное понятие «гибкое регулирование составности» в пригородных железнодорожных перевозках;
- предложенная функциональная оптимизационная модель, на основе динамической транспортной задачи с задержками;
- метод расчета графика оборота модульных пригородных составов;
- методические основы гибкого регулирования составности в пригородном сообщении.

**Теоретическая значимость исследования.** Разработанный метод расчета графика оборота модульного моторвагонного подвижного состава, алгоритмы и технология использования задач оптимизации создает теоретическую базу для проектирования и внедрения системы поддержки принятия решений в пригородном комплексе. Дальнейшие научные исследования по теме позволят перейти к разработке динамической системы управления с элементами искусственного интеллекта.

**Практическая значимость.** Представленная в диссертации методика гибкого регулирования схем формирования составов пригородных поездов позволяет снизить избыточные резервы железнодорожного транспорта. Это создаст предпосылки для сохранения социально значимых перевозок на линиях с низким пассажиропотоком. Региональные регулирующие органы получают обоснованные данные по размерам движения пригородных поездов, что упростит процессы госрегулирования и выплату субсидий пригородным пассажирским компаниям.

**Методологические основы исследования**

Применительно к проблематике диссертации использованы методы системного анализа, экономики железнодорожного транспорта, математическое моделирование, линейное программирование, аппарат динамической транспортной задачи с задержками.

**Положения диссертации, выносимые на защиту:**

- новая трактовка понятия «гибкое регулирование составности» для пригородных железнодорожных перевозок;
- новая функциональная оптимизационная модель на основе динамической транспортной задачи;
- метод расчета графика оборота модульных пригородных составов;
- методические основы технологии гибкого регулирования составности в пригородном сообщении.

**Реализация результатов работы.** Разработанные методические основы гибкого регулирования составности используются в производственной деятельности АО «Пермская пригородная компания». Созданные модели и методы используются

в учебном процессе и научно-исследовательских работах кафедр Уральского государственного университета путей сообщения.

#### **Степень достоверности результатов исследования.**

Оценка достоверности научных положений и выводов диссертации подтверждается тем, что идея базируется на анализе практики и обобщении передового опыта обращения секционированного и модульного пригородного подвижного состава. Теоретические положения построены на корректных функциональных моделях и методах их реализации с использованием известного математического аппарата. Применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы экономики транспорта. Результаты экспериментальных исследований апробированы на участках деятельности Пермской пригородной компании. Использованы сравнения авторских данных с данными, полученными ранее в работах, посвящённых тематике организации пригородного пассажирского движения. Установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «Инновационный транспорт-2016: специализация железных дорог» – УрГУПС, Екатеринбург, 16.11.2016 г. (доклад: «Перспективы развития модульного движения пригородных поездов в Пермском крае»);

- Региональная научно-техническая конференция «Транспорт Урала – 2018» – УрГУПС, Екатеринбург, 30.11.2018 г. (доклад: «Автоматизация гибкого регулирования составности поездов на основе прогнозирования пригородных пассажиропотоков»);

- Всероссийская научно-техническая конференция «Транспорт Урала – 2019» – УрГУПС, Екатеринбург, 05.12.2019 г. (доклад: «Подходы к разработке плана формирования пригородных поездов на основе модульной технологии»);

- Международная научно-практическая конференция «Инновации в транспорте. Управление, экономика, безопасность» – УрГУПС, Екатеринбург, 11.03.2020 г. (доклад: «Автоматизация гибкого регулирования составности электропоездов на основе динамической транспортной задачи»);

- Расширенное заседание кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» 19 мая 2022 года (протокол №4/4 от 19.05.2022 г.);

- Расширенное заседание кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» 16 февраля 2023 года (протокол №10/10 от 16.02.2023 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы и научные результаты опубликованы в семи печатных работах, в том числе четыре работы опубликованы в изданиях, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций, одна работа – в издании, индексируемом в международных базах данных SCOPUS.

**Структура и объём диссертации.** Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 195 страницах, содержит 181 страницу основного текста, 84 рисунка, 18 таблиц и 3 приложения на 14 страницах. Список использованной литературы составляет 128 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, выделены цели, задачи, направление, объект и предмет исследований, определены положения научной новизны, теоретической и практической значимости работы, приведены сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования.

**Первая глава** включает в себя анализ тенденций в организации пригородных железнодорожных перевозок. Установлено, что одной из важных задач в условиях убыточности пригородного комплекса становится рациональное обновление парка моторвагонного подвижного состава (далее – МВПС) с использованием прогрессивных графиков оборота.

Выполнен обзор научных исследований и публикаций, посвященных оптимизации параметров пригородного движения. Выявлено, что одним из наиболее прогрессивных способов освоения пассажиропотока без сокращения маршрутной сети является модульное движение МВПС.

В данной главе сформулированы цель и задачи исследования, направленные на повышение эффективности управления обращением пригородного моторвагонного подвижного состава с использованием оптимизационной модели, которая ляжет в основу системы поддержки принятия решений в пригородном пассажирском комплексе.

**Во второй главе** приводится обоснование выбора метода для оптимизации модульных пригородных пассажирских перевозок. Значимая часть затрат перевозчиков зависит от вагонно-километровой работы. Оптимизировать транспортную работу возможно путем применения гибкого регулирования композиции составов. В исследовании формализовано понятие «гибкое регулирование составности» – это комплекс мероприятий по планированию и

непосредственному оптимальному осуществлению изменения составности моторвагонного подвижного состава на основе секционирования и модульной технологии движения в соответствии с колебаниями пассажиропотоков.

Гибкое регулирование осуществляется на основе «подстройки» под пассажиропоток, а точнее, под пиковую густоту пассажиропотока в конкретном поезде. Это процесс, который не является статическим: он разворачивается во времени. Поэтому необходимо построить динамическую модель. За основу выбираем динамическую транспортную задачу, которая будет сведена к статической разложением во времени. Таким образом, станет возможным получить график гибкого регулирования на каждые сутки.

В зависимости от наличия модульных и секционированных составов задача должна позволять проводить расчеты при условии, что:

- количество составов задано и произведена их начальная расстановка;
- количество составов не задано и определяется в ходе решения задачи.

В зависимости от допустимости корректировки графика движения задача должна позволять:

- производить расчет графика гибкого регулирования без изменения расписания движения (расписание жесткое);
- производить расчет графика гибкого регулирования с возможностью корректировки графика движения (как в «плюс», так и в «минус»).

В отличие от классической постановки динамической транспортной задачи все железнодорожные станции в разных случаях будут выступать в качестве поставщиков (при отправлении МВПС) и потребителей (в случае, когда состав прибывает на эту станцию). В процессе моделирования будет изменяться дислокация модулей МВПС, поэтому задача будет замкнутой. В случае нехватки или избытка подвижного состава на какой-либо из станций у модели должна быть возможность управлять парком МВПС путем назначения резервных пригородных поездов.

Важной управленческой проблемой при организации оборота пригородных составов является выбор между привлечением дополнительных составов в оборот (дополнительные затраты) и необходимостью корректировки графика движения, что увеличивает время ожидания пассажиров. Таким образом, задача должна позволять планировать составность поездов в зависимости от меняющегося в динамике пассажиропотока с использованием разных схем движения МВПС, а также позволять производить корректировку графика движения при обеспечении комфортного проезда пассажиров, допустимого времени ожидания поезда с минимальным привлечением дополнительных составов (или вагонов).

Решение задачи линейного программирования можно осуществить любыми известными способами. Размножение транспортной сети во времени создает большую размерность. Поэтому целесообразно использовать существующие



автоматизированные компьютерные программы. Для программной реализации выбрана система оптимального управления оборотом поездных локомотивов «Лабиринт». Логика формализованного описания процесса прохождения станции единицей потока позаимствована из метода обеспечения ниток графика движения пригородных поездов одноплатными унифицированными составами. Метод разработан и опубликован П.А. Козловым и Е.В. Копыловой. Программный комплекс прошел апробацию на направлении Урень – Нижний Новгород.

Задачей исследования становится разработка новой функциональной оптимизационной модели на основе динамической транспортной задачи. Гибкое регулирование составности пригородных поездов должно проводиться с учетом динамики пассажиропотока. Необходимость модернизации указанного метода связана с формализацией механизма выбора типа электропоезда. Для этого в работе сформулировано несколько идей.

Первая идея – необходимо ввести индивидуальные типы электропоездов. Обозначим станцию прохождения потоками индексом  $j$ , предшествующий станции участок обозначим  $m_j$ , следующий после станции участок –  $j_n$ . Прибывшие с примыкающего участка  $m_j$  пригородные составы разных композиций типа  $V$  обозначим  $y_{mj}^V$ .

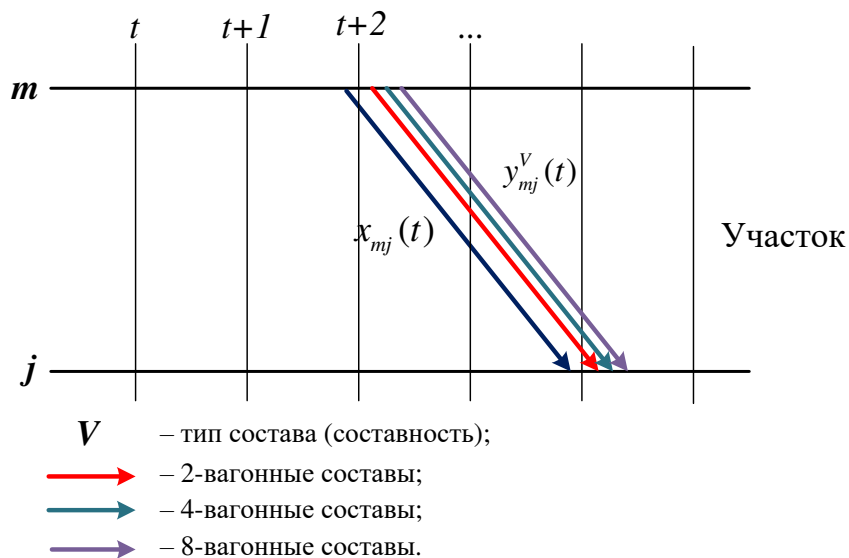


Рисунок 1 – Совокупность «ниток» по расписанию

Размеры движения пригородных поездов  $x$  задаются в виде совокупности «ниток» по действующему графику. Число связанных «ниток» соответствует числу вариантов составности (например, составы из 2, 4 и 8 вагонов). Поскольку по графику может проследовать только один состав, необходимо ввести ограничение:

$$y_{mj}^2(t) + y_{mj}^4(t) + y_{mj}^8(t) = 1 \quad (1)$$

Вторая идея – связать нитки графика с фактической величиной струи пассажиропотока. Для этого задаются ритмы производства и погашения пассажиропотока  $P_j(t)$ . Составы с различной композицией имеют разную вместимость  $N_y^V$ . С учетом специфики пригородных перевозок, требований пассажиров к условиям проезда в поездах и, как следствие, условий договора перевозчика с субъектом РФ в диссертации принята вместимость состава равной количеству посадочных мест. Запрет на перемещение пассажиропотока по участку без состава реализуется за счет дополнительных ограничений. Для описания динамики пассажиропотока на станции потребовалось сформулировать уравнение баланса пассажиров (рисунок 2).

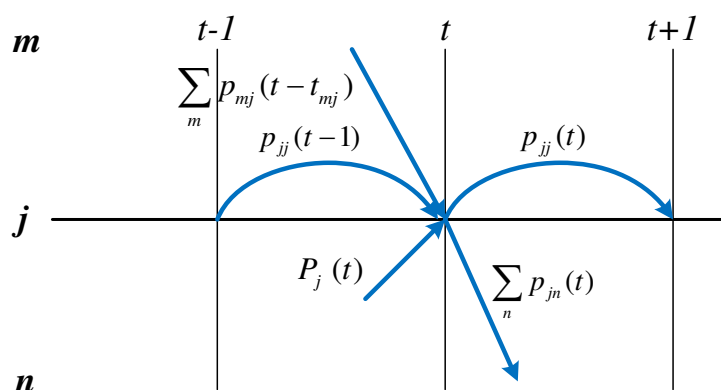


Рисунок 2 – Баланс пассажиров

Баланс пассажиров:

$$p_{jj}(t) = p_{jj}(t-1) + \sum_m p_{mj}(t-t_{mj}) - \sum_n p_{jn}(t) + P_j(t), \quad (2)$$

где  $p_{jj}(t-1)$  – количество пассажиров, ожидающих электрички на платформе станции с предыдущего такта;

$\sum_m p_{mj}(t-t_{mj})$  – количество пассажиров, отправившихся в электричке в момент времени  $(t-t_{mj})$  на станцию  $j$  со всех станций  $m$ ;

$t_{mj}$  – время хода по перегону  $mj$ ;

$\sum_n p_{jn}(t)$  – количество пассажиров отправляющихся в электричке со станции  $j$  в момент времени  $t$  на все станции  $n$ ;

$P_j(t)$  – количество пассажиров, пришедших на платформу в момент времени  $t$ .

Аналогичным образом сформулированы другие основные уравнения: баланса пригородных составов, баланса размеров движения поездов (ниток графика). Для учета факта корректировки и величины сдвига нитки графика движения введены дополнительные переменные – количество точек отправления, смещаемых «вправо» и «влево» по оси времени (рисунок 3).

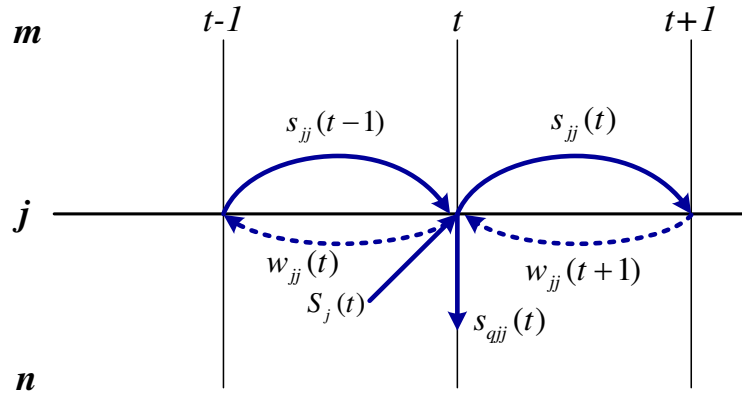


Рисунок 3 – Баланс точек отправления по начальным станциям маршрута

Динамика точек отправления по промежуточным станциям и начальным станциям маршрута отражена в балансном уравнении.

Баланс точек отправления по начальным станциям маршрута:

$$s_{jj}(t) = s_{jj}(t-1) - w_{jj}(t) + w_{jj}(t+1) - s_{qjj}(t) + S_j(t), \quad (3)$$

где  $s_{jj}(t-1)$  – количество точек отправления, смещаемых «вправо» по оси времени с предыдущего такта;

$w_{jj}(t)$  – количество точек отправления, смещаемых «влево» по оси времени с последующего такта;

$w_{jj}(t+1)$  – количество точек отправления, смещаемых «влево» по оси времени с текущего такта;

$S_j(t)$  – количество ниток в момент времени  $t$ .

### Основные ограничения.

В каждый такт может быть инициирована только одна нитка:

$$x_{jn}(t) = 1, \quad (4)$$

Количество отправленных составов на перегон не должно превышать количества ниток:

$$\sum_V y_{jn}^V(t) = x_{jn}(t), \quad (5)$$

Количество пассажиров не должно превышать вместимость составов:

$$\sum_V (y_{jn}^V(t) \cdot N_y^V) \geq p_{jn}(t), \quad (6)$$

где  $N_y^V$  – пассажироместимость состава МВПС типа  $V$ .

В задаче требуется найти такие значения переменных у разных композиций типа  $V$ , чтобы эксплуатационные расходы, потери от корректировки графика движения, а также затраты пассажиро-часов ожидания в стоимостном выражении были минимальными. Значения всех переменных  $Y$  отображают составность МВПС в течение модельного времени, что задает график гибкого регулирования.

Критерий минимизации:

$$\sum_t \sum_j (p_{jj}(t) \cdot C_{pjj} + s_{jj}(t) \cdot C_{sij} + w_{jj}(t) \cdot C_{wj} + \sum_V (Y_j^V(t) \cdot C_y^V)) + \sum_j p_{jj}(T) \cdot C_{pjjT} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $C_{pjj}$  – стоимость ожидания пассажиром посадки по станции  $j$ ;  
 $C_{sij}$  – стоимость смещения точки отправления «вправо» по оси времени;  
 $C_{wj}$  – стоимость смещения точки отправления «влево» по оси времени;  
 $C_y^V$  – стоимость привлечения состава МВПС типа  $V$ ;  
 $p_{jj}(T)$  – количество пассажиров, оставшихся на платформе на конец расчета;  
 $T$  – период расчета.  
 $C_{pjjT}$  – стоимость отказа в перевозке пассажира по станции  $j$ .

Расчеты могут проводиться при заданном числе составов, свободном привлечении составов из резерва, разрешении или запрещении на сдвиг ниток графика. В итоге предложен способ математической формализации выбора индивидуального типа электропоезда в зависимости от величины корреспонденций пассажиропотоков и разработана новая функциональная оптимизационная модель, на основе динамической транспортной задачи с задержками.

**В третьей главе** представлена апробация функциональной модели для реального железнодорожного направления Свердловской железной дороги Верещагино – Пермь-2. Схема направления приведена на рисунке 4. Для настройки технологической модели использовался редактор программного аппарата «Лабиринт».

Основной проблемой экспериментальных расчетов является большая размерность задачи. Введение возможности выбора составов разной величины кратно увеличивает количество балансовых уравнений.

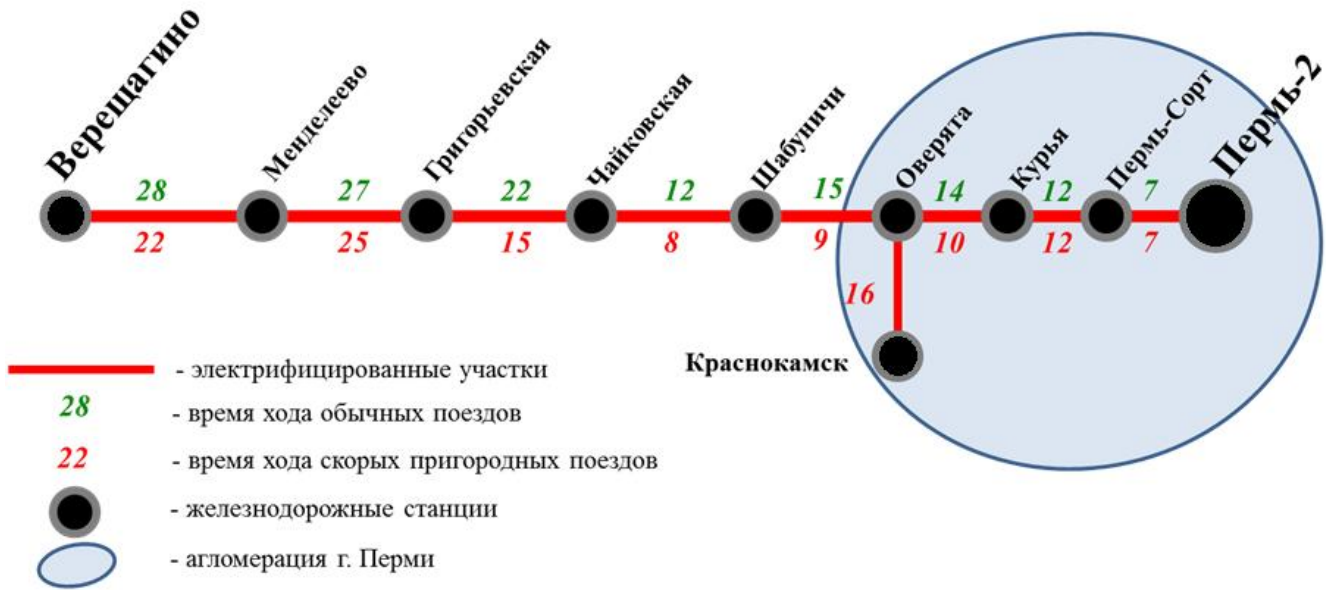


Рисунок 4 – Схема рассматриваемого направления

При программной реализации математической модели для каждого типа составов формируются аналогичные уравнения. Кроме того, модель усложняют параллельные потоки пассажиров. Расчеты проводились на имеющихся в университете вычислительных мощностях. Поэтому для экспериментальной проверки разработана упрощенная технологическая модель. Период расчета сокращен до 8 часов. Моделировался интервал утреннего часа пик. Такт расчета равен 5 минутам. Количество вариантов композиций составов минимизируется. Для расчетов использованы четырехвагонные составы с возможностью объединения и обращения двоянных восьмивагонных составов. Ограничения по перерабатывающей способности станций в экспериментах не учтены. Для минимизации целевой функции в экспериментах весовые коэффициенты  $c$  определены в условных единицах, опираясь на структуру затрат железнодорожного транспорта.

Логика проверки работоспособности модели и достаточности вычислительных мощностей приведена на рисунке 5.



Рисунок 5 – План проведения экспериментальных расчетов

На основании проведенных экспериментов установлено, что снятие запрета на сдвигку ниток графика позволяет сократить время ожидания поездов пассажирами на станциях в ожидании поездов по различным вариантам (рисунок 6), а по отдельным вариантам – сократить потребное количество вагонов.

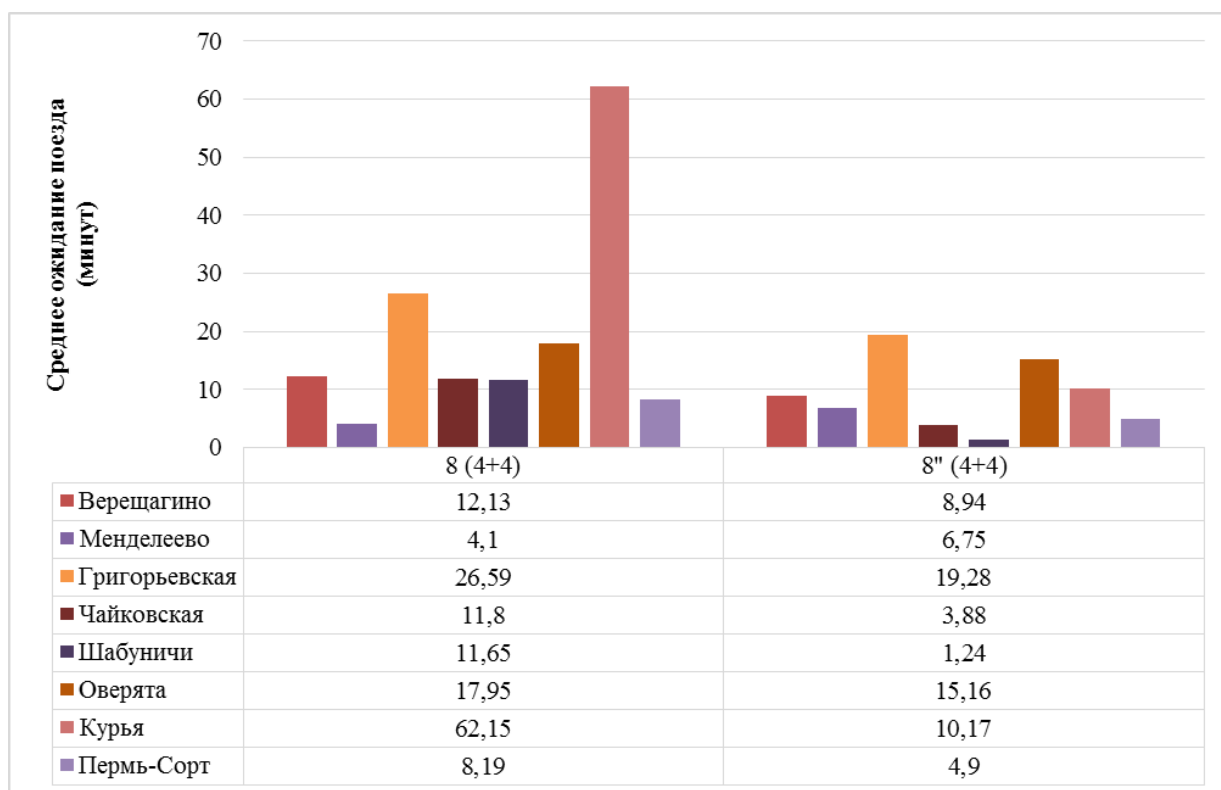


Рисунок 6 – Среднее время ожидания поезда пассажиром по станциям для варианта с восемью сдвоенными поездами

Анализ результатов экспериментальных расчетов показал, в нечетном направлении по некоторым вариантам назначены резервные поезда с головной станции Пермь-2. Оборот с разъединением восьмивагонных составов получилось реализовать. На рисунке 7 зелеными нитками обозначены электропоезда четырех вагонной составности, а красными – поезда по схеме «4+4». Таким образом, была показана возможность реализации в модели модульного движения как одного из элементов системы гибкого регулирования составности.

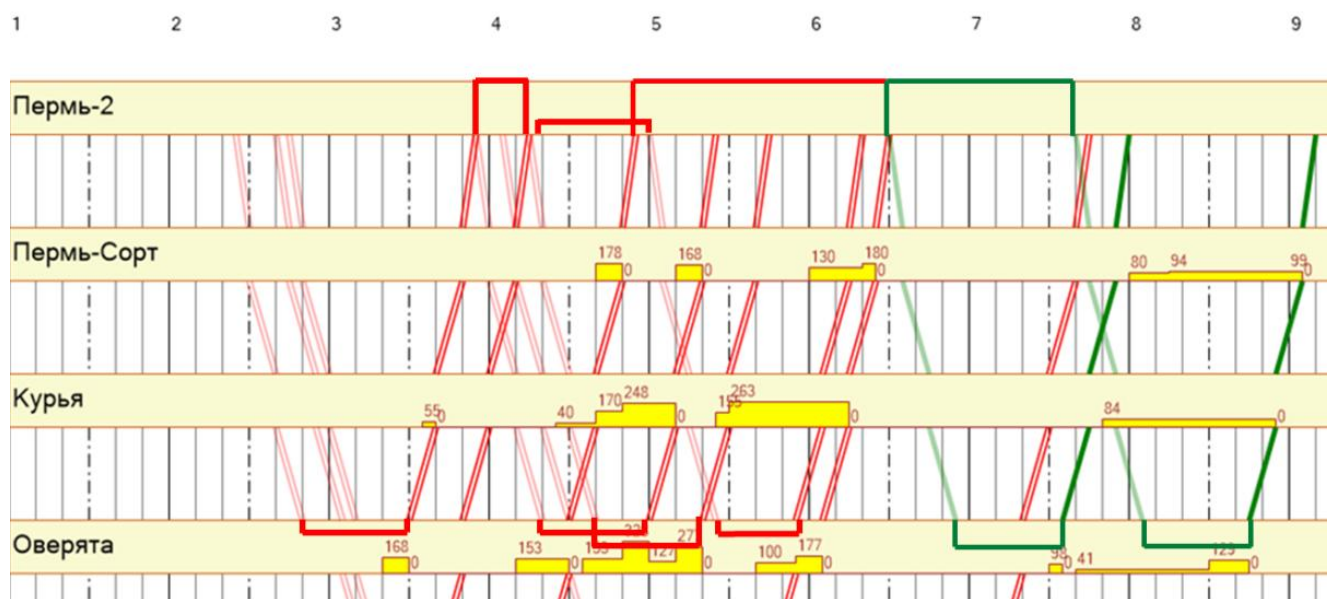


Рисунок 7– Увязка составов по станции Пермь-2

На основании проведенных экспериментов была доказана работоспособность модели в реальных условиях. Совокупность действий по созданию технологических моделей, планированию, выполнению расчетов и анализу результатов составляют основу метода оптимизации оборота модульных пригородных составов. Использование метода позволит разработать технологию и способы организации обращения модульных пригородных составов на основе применения оптимизационной модели.

Согласно предложенной методике, было обосновано модульное движение на малоинтенсивном участке для АО «Пермской пригородной компании» (рисунок 8). Для обслуживания участка требовалось шесть составов (24 вагона). По итогам построения графика потребное количество вагонов уменьшилось до 16. Произведен расчет экономии эксплуатационных расходов в соответствии с используемой в ОАО «РЖД» методикой (таблица 1).



Рисунок 8 – Предлагаемый график оборота двухвагонных модулей

Таблица 1 – Сравнение двух вариантов организации движения электропоездов

Показатель	Значение до оптимизации	Значение после оптимизации	Отклонение	Изменение, %
Потребное количество автономных составов	6	8	+2	+33%
Потребное количество вагонов	24	16	-8	-33%
Условная пассажирокилометровая работа, тыс. пасс.-км	82434	82434	0	0%
Транспортная работа, тыс. ваг.-км	3747	1945	-1802	-48%
Средняя населенность вагона, пасс./ваг	22,0	42,4	+20,4	+93%
Эксплуатационные расходы, млн руб.	269,2	204,2	-65,0	-24%

Предварительная оценка экономического эффекта показала, что, несмотря на увеличение потребного количества составов пригородных поездов, транспортную работу можно значительно снизить (до 40 процентов) Эксплуатационные расходы сокращаются на 24 процента. Эффект образуется за счет увеличения средней населенности вагона и уменьшения потребного их количества.

**В четвертой главе** разработаны методические основы управления оборотом модульного и секционированного подвижного состава.

Следует отметить, что предложенным методом можно рассчитать оборот составов и с учетом вечернего часа пик. Кроме этого, модель позволяет производить расчеты курсирования более чем двух типов составов. Для модульного движения в крупных железнодорожных узлах этого будет достаточно, так как в часы пик поезда должны иметь максимально возможную составность (10 или 12 вагонов), а в непиковые периоды возможно эксплуатировать поезда из 5 или 6 вагонов (по



схемам «5+5» или «6+6»). Это рационально с точки зрения унификации всего парка подвижного состава. В регионах с незначительными размерами пассажиропотока возможно применять составы трех-четырёх типов в зависимости от конфигурации железнодорожной сети и объемов перевозок пассажиров. При такой схеме могут потребоваться операции в моторвагонном депо по прицепке или отцепке вагонов, что в текущей версии модели не учтено. Для устранения этих недостатков в диссертации предложены перспективные подходы к модернизации модели.

Концепцию управления работой перевозочной компании необходимо рассматривать с научной точки зрения. Конкретизацию и настройку управленческих процессов перевозчиков следует осуществлять с использованием метода системного анализа. Метод в первую очередь направлен на выявление основной функции предприятия, которую можно описать набором управляемых параметров. Реакцию на изменение внешних условий обеспечивает адаптивное управление. Формализация механизма и способов регулирования позволяет придать моделируемому объекту системные характеристики предприятия. В таком случае исследовать свойства объекта можно на некоторой упрощенной модели.

Для целей содержательного наполнения функций управления в диссертации предложена упрощенная постановка задачи, которая апробирована на условных полигонах. По итогам проведенных экспериментов на упрощенной модели показана работоспособность модели в части регулировки составности в моторвагонном депо, достигнуто сокращение эксплуатационных расходов на 27%, при этом эффективность использования вместимости подвижного состава выросла на 20,5%.

На основе проведенных исследований предлагается организовать систему гибкого регулирования составности пригородных поездов с использованием автоматизированной системы управления пригородной пассажирской компанией (АСУ ППК) (рисунок 9).

На основе прогнозных данных о пассажиропотоке, а также при интеграции со смежными системами ОАО «РЖД» появляется возможность реализации модуля поддержки принятия управленческих решений АСУ ППК (далее – модуль ППР). Сведения о пассажиропотоках накапливаются в базе данных АСУ ППК отдельно по каждому поезду за каждые сутки курсирования. Плановое расписание модуль сможет импортировать из централизованной базы данных пригородного расписания ОАО «РЖД» (ЦБДПР), в которую вносятся изменения, связанные в том числе с технологическими окнами. Первичная информация о парке моторвагонного подвижного состава находится в информационном хранилище «локомотивные парки» ОАО «РЖД» (ИХ ЛП). На основе правил формирования составов производится задание пула составов для перевозчика.

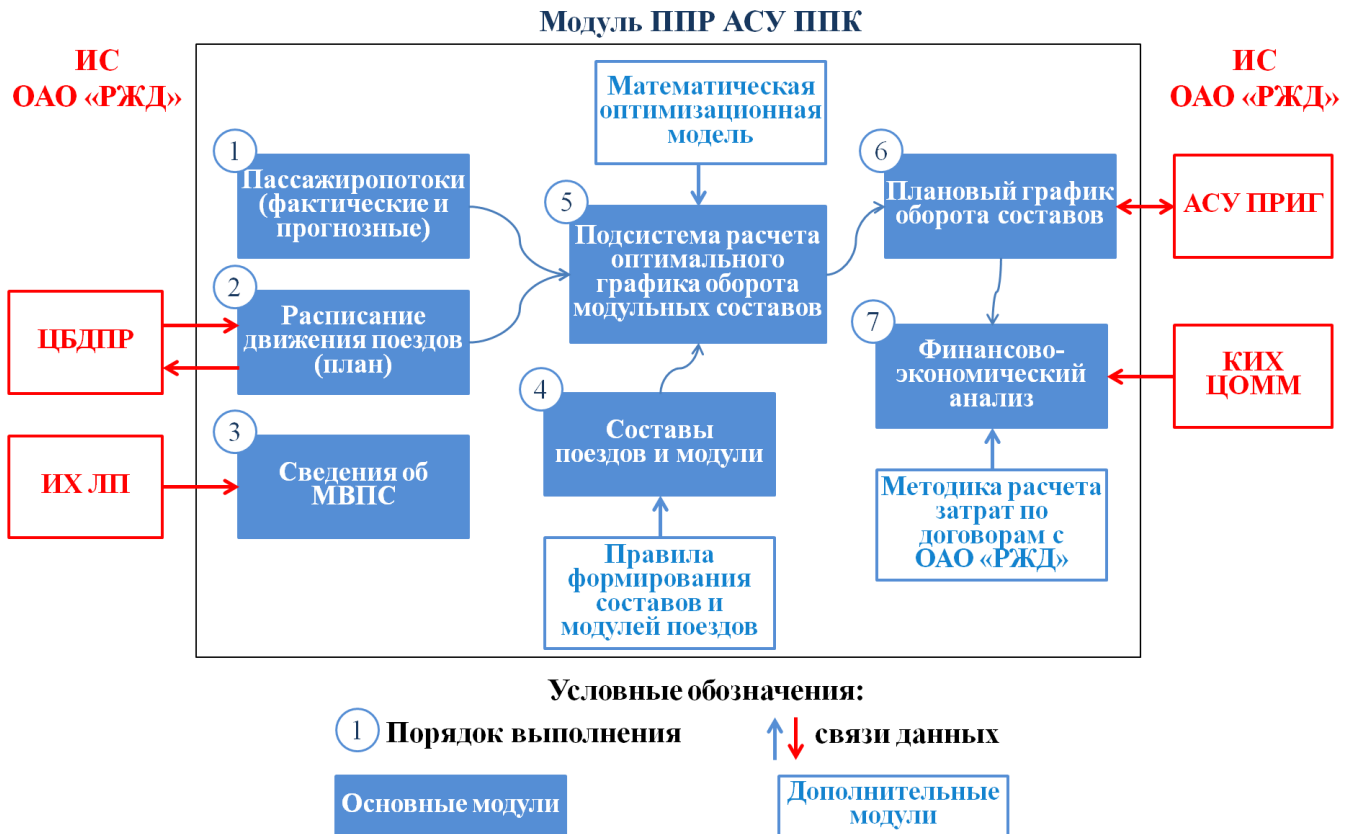


Рисунок 9 – Подсистема поддержки принятия решений АСУ ППК

Расчетный модуль ППР использует предложенную модель для определения оптимального варианта графика оборота составов. В диссертации разработаны бизнес-процессы годового, месячного планирования, оперативного планирования на неделю и регулирования. Согласованная матрица-заказ и динамический график оборота являются плановым заданием эксплуатационной работы для моторвагонного депо.

Расчет фактических затрат по выполнению государственного заказа производится на основе регистров учета системы КИХ ЦОММ, где содержатся сведения о фактически задействованном в перевозках подвижном составе и количестве вагонов. При неисполнении со стороны депо утвержденной заявки пригородная компания учитывает затраты по фактическому предоставлению вагонов. На основе учетных показателей выполняется план-фактный анализ. Выявление причин и факторов произошедших отклонений необходимо для более качественного планирования графиков оборота подвижного состава. Разрабатываются мероприятия по предотвращению невыполнения моторвагонным депо согласованной матрицы-заявки. Вносятся корректировки в прогнозы пассажиропотока на предстоящие периоды.

Следующей реализацией функции учета является формирование отчета о выполнении государственного заказа на осуществление перевозок пассажиров в пригородном сообщении для заказчика (субъект РФ). Для подрядчиков

производится автоматизированное формирование актов оказанных услуг в части договоров инфраструктуры, эксплуатации и аренды моторвагонного подвижного состава. Результаты исполнения графика оборота пригородного подвижного состава лежат в основе взаиморасчетов между ОАО «РЖД» и пригородными пассажирскими компаниями по договорам инфраструктуры, аренды и эксплуатации подвижного состава. Бизнес-процесс ежемесячных расчетов пригородной компании с ОАО «РЖД» приведен на рисунке 10.

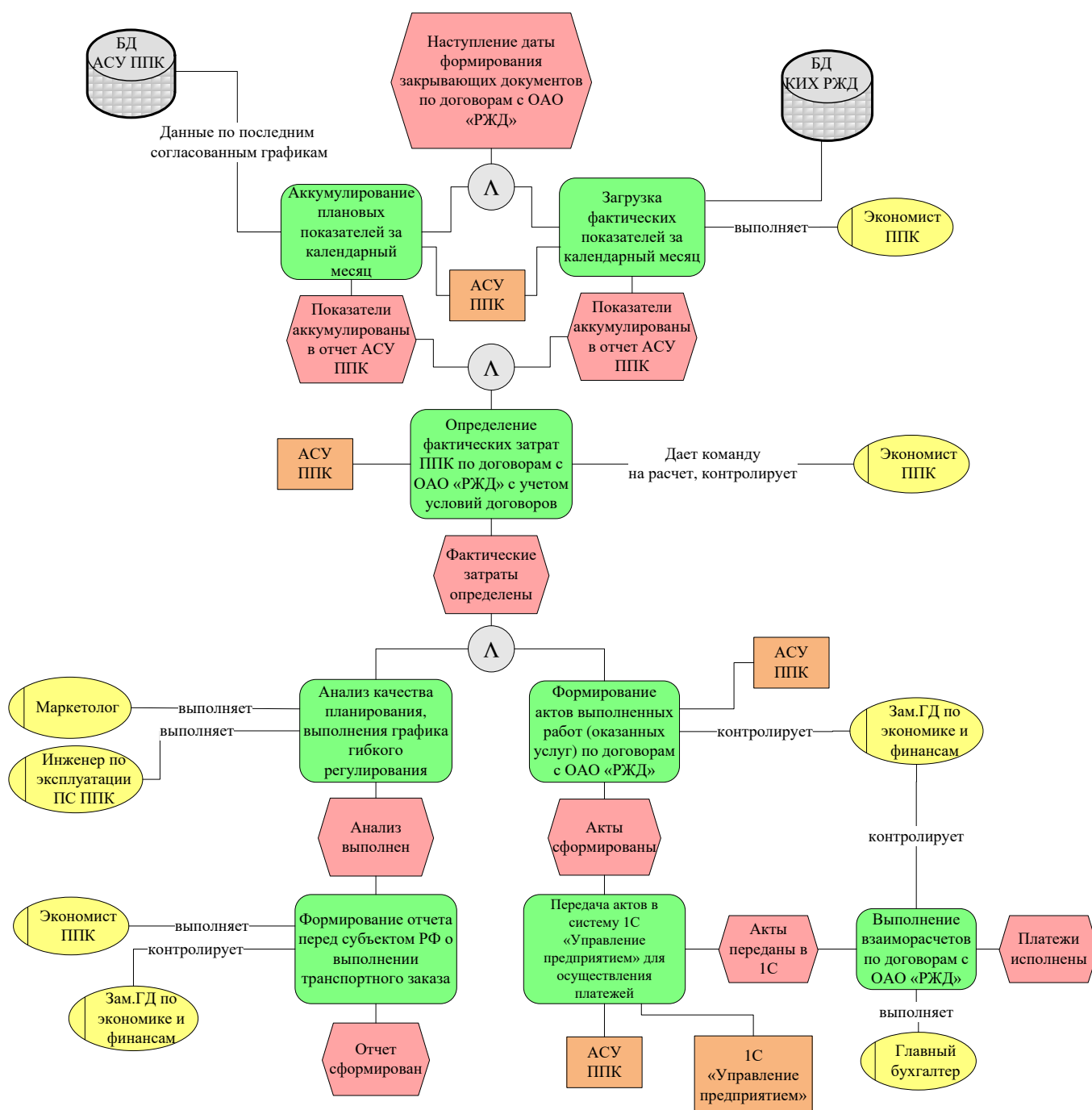


Рисунок 10 – Бизнес-процесс расчетов ППК по договорам с ОАО «РЖД»

Содержательное наполнение функций управления и формализация алгоритмов бизнес-процессов позволили разработать методические основы технологии гибкого регулирования составности в пригородном сообщении. Применение методики создаст базу для обоснования затрат пригородной компании при осуществлении государственного регулирования. ОАО «РЖД» получает возможность запланировать потребный парк вагонов, график проведения ремонтов и затраты депо. При месячном планировании затраты уточняются, а по итогам оперативного планирования и формирования отчетности по факту обслуживания составами пригородных участков автоматизируются расчеты перевозчика по договорам с ОАО «РЖД»

**В заключении** приведены результаты выполненных исследований и сформулированы выводы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Сложное экономическое состояние пригородного комплекса российских железных дорог ставит перед перевозчиками задачу по сокращению затрат на перевозку. Актуальным направлением является создание и внедрение динамических систем управления перевозочным процессом с использованием искусственного интеллекта. С учетом обеспечения комфорта пассажиров, достижения рационального размера парка МВПС, а также минимума затрат на его эксплуатацию целесообразно применять систему гибкого регулирования композиции составов.

Организация движения на основе секционирования и модульной технологии должна учитывать существующую неравномерность перевозок. Динамика пассажиропотоков, географическая разветвленность пригородных направлений и изменения оперативной обстановки в движении поездов создают значительную вариативность. Оперативные работники не в состоянии оценить большое количество возможных технологических и регулировочных решений. В существующие информационные автоматизированные системы пригородных компаний необходимо внедрять оптимизационные модели. Разработка алгоритмов и технологий использования задач оптимизации позволит создать системы поддержки принятия решений.

Для оптимизации транспортных процессов необходим адекватный метод. В качестве аппарата оптимизации выбрана динамическая транспортная задача с задержками. В диссертации разработана функциональная модель. Предложен способ математической формализации выбора индивидуального типа электропоезда в зависимости от величины корреспонденций пассажиропотоков. Метод расчета графика оборота модульного моторвагонного подвижного состава позволяет

совершенствовать методологические основы организации пригородного железнодорожного сообщения для дальнейших научных исследований в сфере оптимизации параметров пригородных перевозок. Это является вкладом в эксплуатационную науку на транспорте.

Апробация функциональной модели была проведена на пригородных участках Свердловской железной дороги. На основании анализа полученных результатов доказана работоспособность модели в реальных условиях. Проведение экспериментов выявило проблему большой размерности задачи. Поэтому, расчеты выполнялись для периода часов пик одного пригородного участка. Увязка составов с разных направлений в общий оборот в железнодорожном узле является темой дальнейших исследований с использованием более мощных вычислительных ресурсов.

Технология гибкого регулирования схем формирования составов пригородных поездов позволяет снизить избыточные резервы железнодорожного транспорта. В практической плоскости результаты диссертации могут стать методической основой для процесса госрегулирования. Получение региональными властями обоснованных данных по размерам движения пригородных поездов упростит выплату субсидий пригородным пассажирским компаниям. Это позволит сохранить социально значимые перевозки на линиях с низким пассажиропотоком.

Отдельным направлением применения методических разработок может стать техническое нормирование потребного парка подвижного состава. В середине 2020-х годов прогнозируется массовое выбытие пригородных поездов предыдущего модельного ряда. Разработанная методика позволит обосновать структуру парка и обновить пригородный подвижной состав в соответствии с размерами транспортного заказа субъектов РФ.

Перспективы дальнейшего развития данной темы могут быть связаны с совершенствованием функциональной модели гибкого регулирования составности и разработкой методики корректировки результата расчета на имитационных моделях. Такой подход позволит перейти к разработке теоретической базы создания динамической системы управления с элементами искусственного интеллекта.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации.**

*Публикации в рецензируемых научных изданиях:*

1. Шмидт, А. О. Возможность эксплуатации модульных электропоездов для пригородных перевозок в Пермском крае / А. О. Шмидт, К. Е. Герасимчук // Транспорт Урала. – 2016. – № 3 (50). – С. 60-65. – ISSN 1815-9400.

2. Шмидт, А. О. Автоматизация гибкого регулирования составности поездов на основе прогнозирования пригородных пассажиропотоков / А. О. Шмидт // Транспорт Урала. – 2018. – № 4 (59). – С. 41-47. – ISSN 1815-9400.

3. Шмидт, А. О. Подходы к разработке методики организации модульного движения электропоездов с учетом размеров пассажиропотока / А. О. Шмидт // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 91-96. – ISSN 1815-9400.

4. Шмидт, А. О. Выбор подхода для оптимизации плана формирования пригородных электропоездов на основе технологии модульного движения / А. О. Шмидт // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (80). – С. 123-131. – ISSN 0201-727X.

*Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science:*

5. Kostenko V., Pank R., Shmidt A., Tushin N. Technology of development of graphics of flexible control of composition in suburban railway // International Scientific Conference «International Transport Scientific Innovation» ITSI-2021. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2476(1). – ISSN 1551-7616.

*Публикации в других изданиях*

6. Шмидт, А. О. Перспективы организации движения модульных электропоездов нового поколения на Главном направлении в Пермском крае / А. О. Шмидт, К. Е. Герасимчук // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог. – 2016. – С. 1040-1058.

7. Шмидт, А. О. Исследование влияния климатических факторов на размеры пассажиропотока пригородным железнодорожным транспортом в Пермском регионе / А. О. Шмидт // Современные научные исследования: теория и практика : материалы междунар. (заочной) науч.-практ. конф. под общ. ред. А. И. Вострецова ; отв. за выпуск А. И. Вострецов. – 2017. – С. 113-121.

### **Личный вклад автора.**

Основные положения и результаты проведенных исследований получены автором самостоятельно. Статьи [2–4, 7] подготовлены единолично. Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах заключается в следующем: [1, 6] – выполнено обоснование организации модульного движения электропоездов на участках с невысокими размерами пассажиропотока, предложены основные концепции модульного движения как основы гибкого регулирования составности в пригородном сообщении; [5] – предложена доработанная функциональная модель гибкого регулирования составности на основе динамической транспортной задачи с учетом как объединения и разъединения модульных составов, так и изменения составности в условиях депо.

**Шмидт Артем Олегович**

**ТЕХНОЛОГИЯ ГИБКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
СОСТАВНОСТИ В ПРИГОРОДНОМ СООБЩЕНИИ**

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

Подписано в печать «26» января 2024 г.

Формат 60 x 84 1/16. Усл. печ. л. 1,4.

Тираж 100 экз. Заказ № 82

УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66