

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(УрГУПС)

На правах рукописи



Шмидт Артем Олегович

ТЕХНОЛОГИЯ ГИБКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
СОСТАВНОСТИ В ПРИГОРОДНОМ СООБЩЕНИИ

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор,
Тушин Николай Андреевич

Екатеринбург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИГОРОДНЫХ ПЕРЕВОЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА	10
1.1 Анализ тенденций в организации пригородных железнодорожных перевозок.....	10
1.2 Способы организации пригородных перевозок.....	15
1.3 Зарубежный опыт организации модульных перевозок.....	20
1.4 Анализ исследований по регулированию составности поездов в пригородном сообщении.....	24
Выводы по главе 1.....	35
ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ГРАФИКА ОБОРОТА МОДУЛЬНЫХ ПРИГОРОДНЫХ СОСТАВОВ.....	36
2.1 Гибкое регулирование составности как основной способ повышения эффективности пригородного комплекса.....	36
2.2 Выбор метода оптимизации.....	41
2.3 Выбор аппарата оптимизации.....	47
2.4 Содержательная постановка задачи по построению оптимального графика гибкого регулирования составности МВПС	57
2.5 Оптимизационная модель	61
Выводы по главе 2.....	71
ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАФИКА ОБОРОТА ПРИГОРОДНЫХ СОСТАВОВ	72
3.1 Технологическая модель	72
3.2 Планирование экспериментов	78
3.3 Экспериментальные расчеты первой серии	80
3.4 Экспериментальные расчеты второй серии	87

3.5. Экспериментальные расчеты третьей серии	95
3.6. Экспериментальные расчеты четвертой серии	100
3.7. Анализ результатов.....	104
Выводы по главе 3.....	108
Глава 4. Управление оборотом пригородных составов	110
4.1. Системные основы управленческой деятельности.....	110
4.2. Математическая модель гибкого регулирования и проверка ее работоспособности.....	112
4.3. Организация гибкого регулирования на основе использования предложенной модели.....	130
4.4. Планирование и прогнозирование пассажиропотоков	137
4.5. Годовое и месячное планирование.....	141
4.6. Оперативное планирование и регулирование.....	151
4.7. Реализация функции учета и анализа	154
4.8. Рекомендации для возможного применения гибкого регулирования составности	156
Выводы по главе 4.....	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	166
ПРИЛОЖЕНИЕ А	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ В	193

ВВЕДЕНИЕ

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. Полынцев, 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 модульных пригородных составов позволяет совершенствовать методологические основы для расширения границ дальнейших научных исследований в сфере оптимизации параметров пригородных перевозок. Это является вкладом в эксплуатационную науку на транспорте.

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 получат 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. 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» 19 мая 2022 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИГОРОДНЫХ ПЕРЕВОЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

1.1 Анализ тенденций в организации пригородных железнодорожных перевозок

За последние 10 лет в пригородном пассажирском комплексе наметилось несколько основных тенденций. Во-первых, сокращение пассажиропотока в большинстве регионов страны. На рисунке 1.1 можно отметить, что на рост суммарного пассажиропотока пригородных поездов достигается за счет четырех субъектов: Москвы, Санкт-Петербурга, Московской и Ленинградской областей, где в условиях сложной дорожной обстановки жители активно пользуются железнодорожным транспортом.

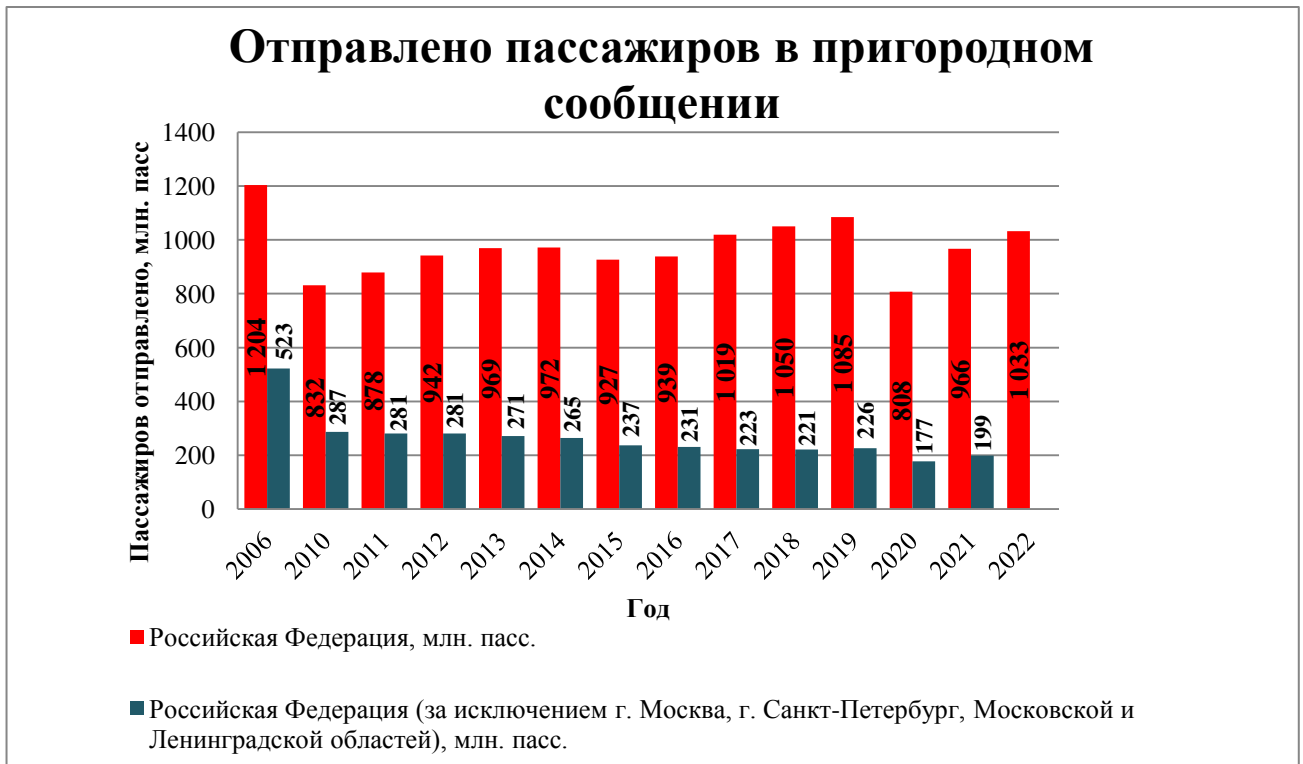


Рисунок 1.1 – Динамика по отправленным пассажирам в пригородном сообщении

Динамика пассажиропотока и пассажирооборота по пригородным компаниям приведена на рисунках 1.2–1.3.

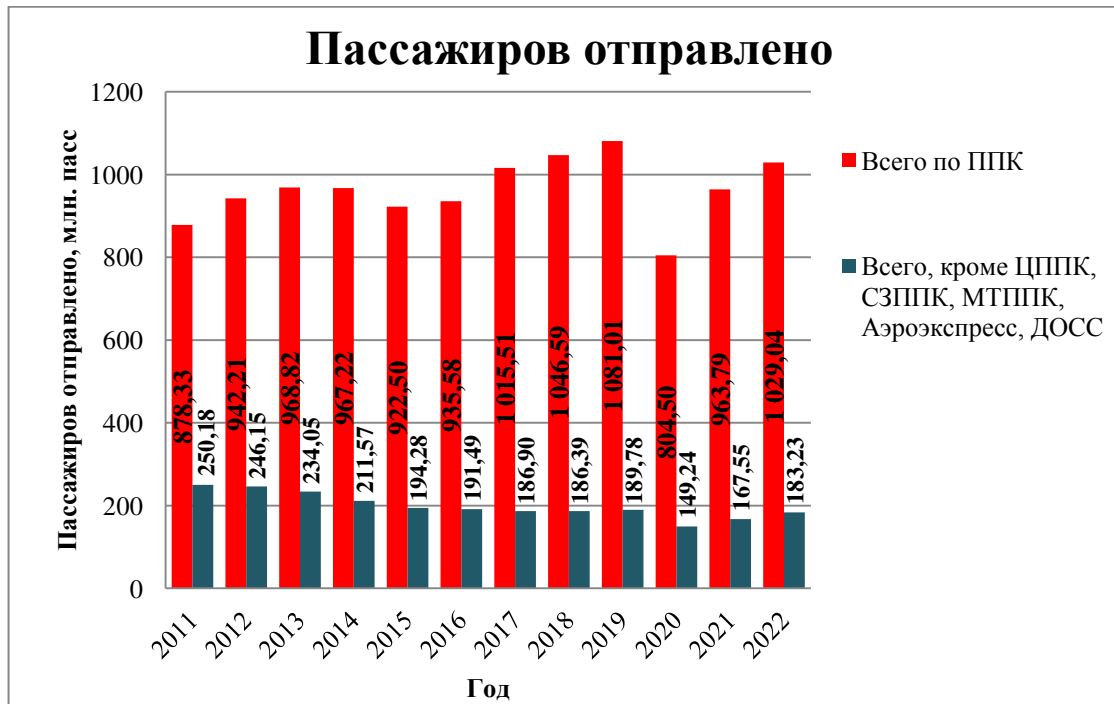


Рисунок 1.2 – Динамика пассажиропотока по пригородным компаниям



Рисунок 1.3 – Динамика пассажирооборота по пригородным компаниям

На фоне снижения пассажиропотока в регионах нашей страны происходит и снижение средней дальности поездки пассажира (рисунок 1.4).

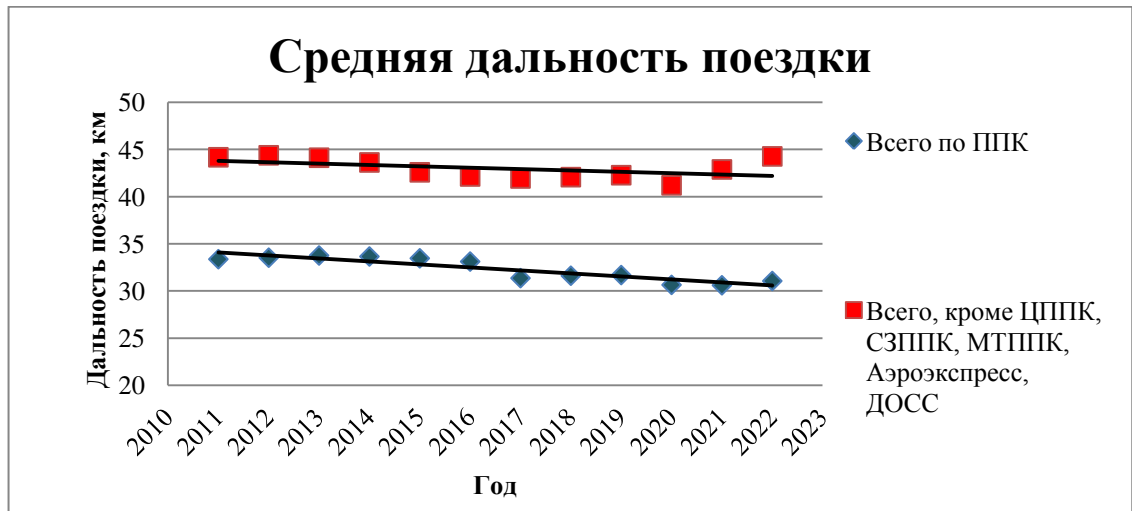


Рисунок 1.4 – Динамика средней дальности поездки пассажира

Сокращение средней дальности на фоне снижения пассажиропотока свидетельствует о продолжающейся тенденции урбанизации населения. Растет пассажиропоток крупных городских агломераций (Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону и др.). На среднюю дальность влияют и дачные поездки: жители городов приобретают дачные участки ближе к мегаполису, что также сокращает расстояние передвижения.

Динамика средней населенности вагона в пригородном комплексе приведена на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Динамика средней населенности вагона

Повышение средней населенности вагона на фоне снижения пассажиро-километровой работы с 2010 по 2014 годы свидетельствует об использовании более рациональных схем составности и совершенствования графика оборота составов (транспортная работа за этот период сократилась). Произошло и сокращение маршрутной сети: были отменены наиболее малонаселенные и убыточные поезда. Вышеизложенное подтверждает динамика эксплуатируемого парка моторвагонного подвижного состава (рисунок 1.6).

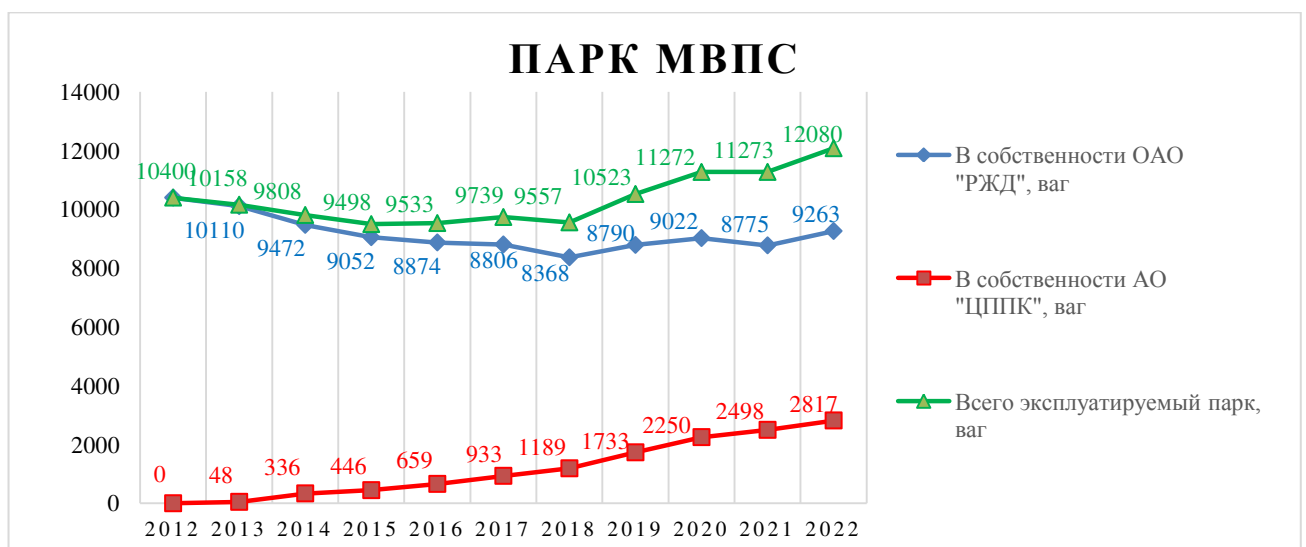


Рисунок 1.6 – Динамика эксплуатируемого парка МВПС

С 2012 по 2015 год эксплуатируемый парк моторвагонного подвижного состава (далее – МВПС) в собственности ОАО «РЖД» сократился на 1,4 тыс. ваг. Сокращение составности и совершенствование графика оборота на фоне оптимизации маршрутной сети в регионах позволили эксплуатировать меньшее количество вагонов, удовлетворяя спрос пассажиров.

На фоне роста пассажирооборота и средней населенности вагона в целом по России с 2016 по 2018 год общий эксплуатируемый парк практически не увеличился и составлял около 9,5 тыс. ваг. Обновление шло в основном за счет закупки собственных электропоездов АО «ЦППК». С 2020 года выбытие вагонов МВПС, находящихся в собственности ОАО «РЖД» без его пополнения новыми вагонами несет риск нехватки подвижного состава для обслуживания существующей маршрутной сети регионов в рамках государственного заказа на перевозки. В этой связи одна из важных задач – разработка концепции рационального обновления парка МВПС с использованием прогрессивных графиков оборота.

Средняя составность поезда отражает размеры пассажиропотока: большой прирост средней составности дают пригородные компании центральных регионов страны (средняя составность – более 8 вагонов), а в остальных регионах средняя составность постепенно приближается к четырем вагонам (минимальная составность по основным используемым сериям МВПС). Динамика средней составности отражена на рисунке 1.7.

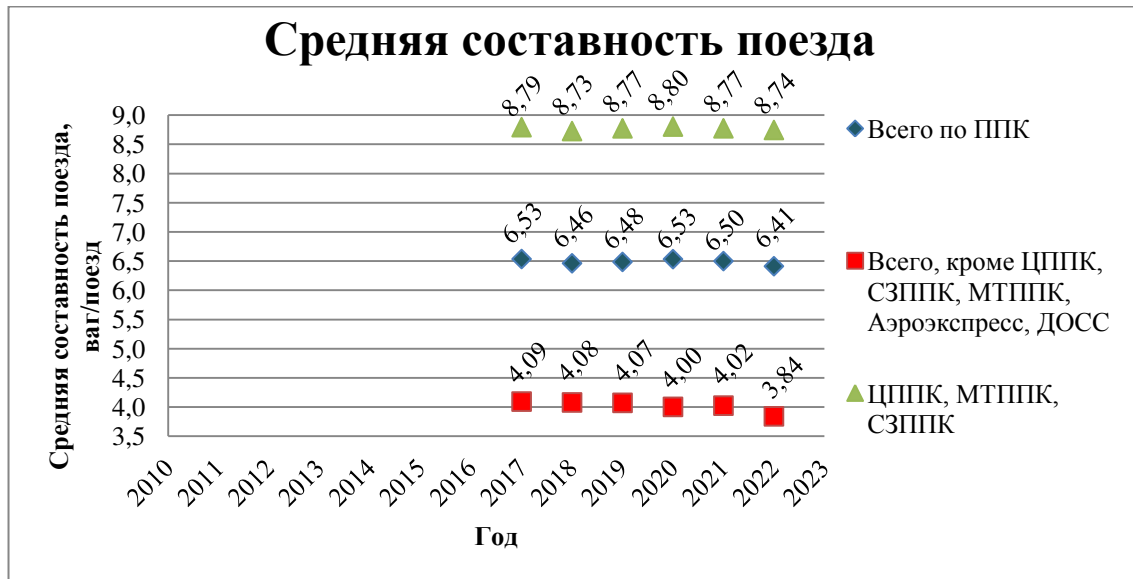


Рисунок 1.7 – Динамика средней составности пригородного поезда

Убыточность пригородного комплекса российских железных дорог в современных условиях его функционирования ставит перед перевозчиками задачу в повышении доходов от перевозочной деятельности, с одной стороны, и сокращение затрат на перевозку – с другой. При этом государственный заказ в виде маршрутной сети должен быть, безусловно, выполнен, а пассажирам следует предоставлять базовый уровень комфорта поездки.

1.2 Способы организации пригородных перевозок

На сегодняшний день пригородными пассажирскими компаниями накоплен большой опыт по организации движения пригородных поездов при обеспечении минимально возможных выпадающих доходов. Для этого используются два основных направления: повышение пассажиропотока пригородных поездов за счет организационно-технических мероприятий и оптимизация транспортной работы. Первая группа мер более предпочтительна, так как на практике оптимизация транспортной работы осуществляется в ущерб основным пользователям транспортных услуг – пассажирам. Повышение населенности

поездов за счет их рациональной эксплуатации приводит к росту доходов при неизменных затратах. Оптимизация транспортной работы будет рассмотрена отдельно.

С.М. Резер одним из главных показателей эффективности деятельности пригородного комплекса назвал населенность вагона. В его работе [1] была предложена система оценок, которая позволяет подразделить населенность на высокую, допустимую, умеренную и критическую. К критической населенности относится ситуация, при которой количество пассажиров в вагоне превышает число мест для сидения. Допустимая населенность означает, что число занятых сидячих мест составляет не менее 90 процентов, нормальная – от 67 до 90 процентов. Нижняя граница умеренной населенности проходит на уровне 1/6 занятых сидячих мест, а критической (низкой) следует считать населенность ниже 16 пасс./ваг.

В регионах центральной России, особенно в Москве, Московской области и Санкт-Петербурге, населенность поездов в «часы пик» в большинстве случаев выше критической, поэтому применение мер по ее повышению не требуется. В этих субъектах РФ в непиковые периоды, а также в регионах РФ на социальных маршрутах перевозчики сталкиваются с проблемой низкой и критической (низкой) населенности. Для одновременного решения проблем по перенаселенности поездов центральных регионов России и критической населенности на маршрутах непиковых периодов и социальных маршрутов в регионах РФ О.А. Медведь [2] была предложена методика организации поездов целевого назначения. В соответствии с данной методикой назначение целевого поезда должно происходить при наличии сконцентрированной во времени группы пассажиров одного или нескольких сегментов. Именно в этом случае перевозчик не только эффективно использует провозную способность железнодорожного транспорта, но и привлекает дополнительный пассажиропоток.

В исследовании Ю.О. Пазойского [3] предложены используемые в практике большинства пригородных компаний методы организации пригородного движения:

- определение потребного количества электропоездов для освоения пиковых густот пассажиропотоков в крупных железнодорожных узлах;
- секционирование моторвагонного подвижного состава в условиях депо или на специально оборудованных зонных станциях;
- построение непараллельного графика пригородных поездов с выделением поездов «скороходов» в пригородных зонах;
- разработка рационального графика оборота электропоездов с обеспечением ритмичной работы моторвагонного депо на основе графоаналитического метода;
- интенсификация движения электропоездов в период увеличения пассажиропотока за счет рационализации графика оборота составов.

На сегодняшний день проблему эффективности транспортной системы субъекта пытаются решить региональные власти. Одна из мер – организация мультимодальных пассажирских перевозок, где в качестве основного вида транспорта выступает железнодорожный транспорт. Методику организации таких перевозок предложил С.П. Вакуленко в работе [4], в которой отражены расчеты размеров движения разных видов транспорта и обеспечение построения синхронизированных графиков оборота транспортных средств. Внедряемые сегодня единые системы оплаты проезда (ЕСОП) в субъектах РФ позволяют на основе агентских договоров между перевозчиками оформлять мультимодальные проездные документы, что повышает заинтересованность субъектов транспортного рынка в мультимодальных перевозках.

К современным способам организации пригородных перевозок следует отнести тактовое и маятниковое движение в мегаполисах в рамках единой транспортной системы (Московские центральные диаметры, Московское центральное кольцо, Городская электричка в г. Красноярск и др.). Преимущества тактового движения для пассажиров заключаются в том, что им не нужно подстраиваться под расписание поездов, так как заранее известен интервал их следования. Использование таких перевозок во всех крупных городах страны

осложняется неудачной конфигурацией железнодорожных путей и отсутствием специализации путей в узлах под грузовое и пассажирское движение. Маятниковое движение предполагает реализацию транспортных корреспонденций через центр города без пересадок, что разгружает систему городского общественного транспорта. Проекты тактового и маятникового движения «городских электричек» предоставляют пассажирам полноценные транспортные продукты, которые пользуются спросом, а это повышает населенность поездов.

Комбинация гибкого изменения графика движения поездов, в зависимости от характера и структуры пассажиропотока по будням, выходным и праздничным дням и в случаях с резким падением пассажиропотока на одной из станций маршрута, может быть организована на основе модульного движения моторвагонного подвижного состава. Термин «модульное движение» в научно-исследовательских работах отечественных ученых впервые встречается в работе В.В. Гарбузовой [5], а также упоминается в диссертации О.А. Медведь [2] как способ организации беспересадочного сообщения и сокращения эксплуатационных расходов. Такой прогрессивный способ движения моторвагонного подвижного состава (далее – МВПС) применяется на сегодняшний день ограниченно на направлении Туапсе – Адлер – Аэропорт, Екатеринбург – Нижний Тагил – Серов (электропоезда «Ласточка»). В качестве эксперимента такая технология была организована на направлении Самара – Курумоч – Жигулевское море, Санкт-Петербург – Малая Вишера – Новгород (Окуловка).

Масштабный эксперимент по модульным перевозкам был организован Октябрьской железной дорогой [6]. Ведение сдвоенных электропоездов на «Маловишерском» узле позволило сохранить существующие объемы движения без ущерба для пассажиров и сэкономить около 60 млн руб. в год. Подобная практика использовалась на Куйбышевской железной дороге в сообщении Самара – Курумоч, а также на Горьковской железной дороге в сообщении Киров – Зуевка. На сегодняшний день электропоезда ЭС2Г по модульной

технологии эксплуатируются на Свердловской и Северо-Кавказской железных дорогах. Технология отсоединения и объединения модульных поездов на станции была разработана и представлена в нормативных документах ОАО «РЖД» [7–9].

В настоящее время система изменения составности моторвагонного подвижного состава на основе секционирования и модульной технологии движения в соответствии с колебаниями пассажиропотоков в пригородных компаниях в полном ее смысле не используется по следующим причинам:

- отсутствует решение властей по осуществлению регулирования составности (используется постоянная составность, например в Свердловской области);
- отсутствует подвижной состав, позволяющий осуществлять модульное движение (в большинстве ППК);
- точные значения пиковой населенности недоступны в АСУ ППК из-за ограничений в привязке пассажиров к конкретному поезду (во всех ППК);
- имеется недостаток провозной способности при использовании максимальной составности (Московский железнодорожный узел);
- отсутствует система прогнозирования пригородных пассажиропотоков.

Изменение количества секций и вагонов в зависимости от колебаний величины пассажирских потоков предусматривает целый комплекс мероприятий по планированию и непосредственному оперативному управлению. Разработка технологии гибкого регулирования составности является актуальной задачей. Получение прогнозов позволит целенаправленно принимать управляющие воздействия на предстоящий период. 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.

Особое место при организации пригородных перевозок в настоящее время отводится системе маркетинговых мероприятий. В широком смысле под **маркетингом пригородных пассажирских железнодорожных перевозок** понимается комплексная система организации пригородных перевозок и обслуживания пассажиров, включающая разработку программ привлечения и удержания клиентов, активное воздействие на стимулирование спроса путем разработки транспортных решений, ориентированных на более полное удовлетворение потребностей населения конкретного региона, с целью повышения рентабельности отрасли [10]. Данное понятие включает в себя ранее рассмотренные способы организации движения, представляющие собой транспортные продукты. Если рассматривать данное понятие в узком смысле, то к маркетингу будут относиться следующие блоки мер: выстраивание ценовой политики на основе наличия ценностного предложения для пассажира; использование таргетированных акций и скидок; внедрение новых каналов продаж; реализация сопутствующих товаров и услуг, PR-акции и реклама; интеграция с контрагентами; бонусные программы и пр.

1.3 Зарубежный опыт организации модульных перевозок

На европейских железных дорогах подвижной состав модульных перевозок (например, поезда ICE или DB Regio в Германии) дополнительно имеет специальную автосцепку Шарфенберга.

Гибкое регулирование составности поездов в некоторых странах Европы (Германия, Швейцария, Дания) в дальнейшем высокоскоростном и региональном сообщениях связано не только с тем, что на участках с низким пассажиропотоком

не целесообразно использовать поезда с большим количеством вагонов, но и с обеспечением транспортной доступности между отдельными населенными пунктами [11–14]. По системе многих единиц либо объединяют два, три или четыре состава (поезда Desiro, электропоезда серии 422), либо соединяют дизель- и электропоезд (дизель-поезда серии MF). Все это позволяет сохранить социально значимые перевозки на малоинтенсивных линиях.

Поезда с гибкой схемой формирования активно используются компанией Deutsche Bahn в скоростном сообщении экспрессами ICE. Начало эксплуатации многогруппных пассажирских поездов такого типа относится к началу XX века. Это были группы пассажирских вагонов локомотивной (паровозной) тяги, которые посредством маневровых работ на узловой станции перецепляли (объединяли), создавая прямое сообщение на тех линиях, где поезда стандартной схемы формирования были нецелесообразны.

С появлением скоростного и высокоскоростного моторвагонного подвижного состава гибкая технология формирования поездов получила активное развитие. Она позволяет не только экономить эксплуатационные затраты, но и обеспечивать беспересадочное сообщение между населенными пунктами и тактовую частоту движения поездов в непиковые периоды времени.

Ежегодно специалисты перевозчика на основании маркетинговых исследований разрабатывают план формирования объединенных поездов, учитывая прозрачность и понятность технологии обслуживания для пассажиров: справочные материалы и каналы продаж дополняются соответствующими схемами, определенному цвету соответствует определенное направление движения поезда (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Информационно-справочный материал для пассажиров

Имеют место разные схемы движения «гибких» поездов:

1) объединение поездов, прибывших с рокадных направлений в один состав и следование до конечной станции (рисунок 1.9).

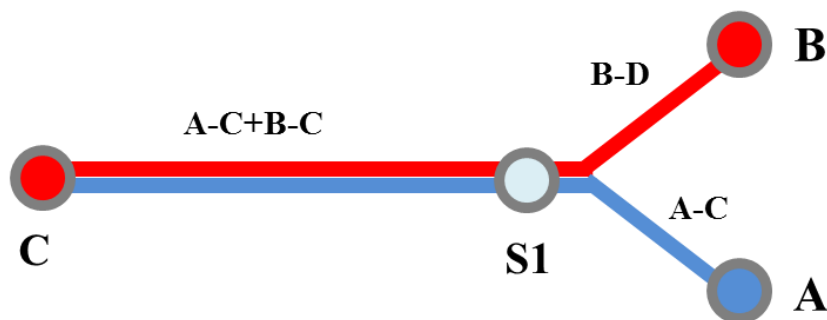


Рисунок 1.9 – Схема формирования, обеспечивающая беспересадочное сообщение между рокадными линиями и основным направлением

2) объединение поездов, прибывших с рокадных линий, на узловой станции, следование до следующей узловой станции в соответствии с планом формирования и разделение на 2 состава, отправление каждого из составов на рокадные линии (рисунок 1.10).

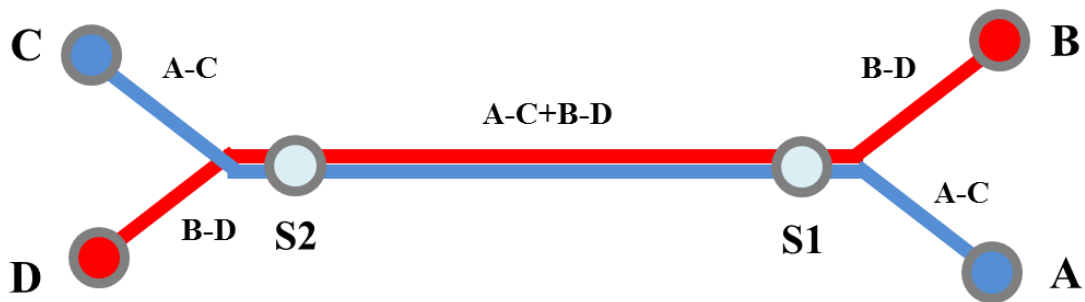


Рисунок 1.10 – Схема формирования, обеспечивающая беспересадочное сообщение между двумя парами рокадных направлений

Для выполнения операций со сдвоенными поездами на сети железных дорог Германии были специально спроектированы пункты по объединению и разъединению поездов (рисунок 1.11).

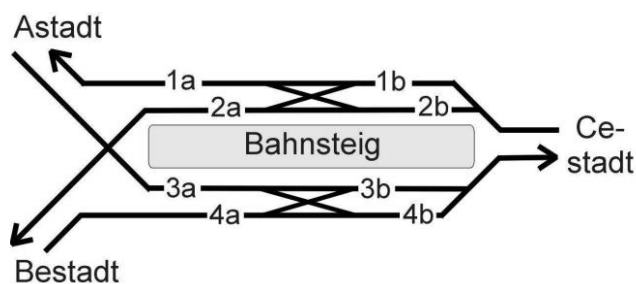


Рисунок 1.11 – Схема станции для объединения (разъединения) поездов, эксплуатируемых по системе многих единиц

Представленная схема позволяет ускорить процессы объединения и разъединения, исключая простои поездов перед входным сигналом в ожидании приготовления дежурным по станции маневрового маршрута, а также повысить параллельность поездной работы при отправлении составов на разные направления. Пассажирская платформа, кроме того, секционируется, что помогает пассажиру ориентироваться и выбрать нужный состав для посадки. На немецких железных дорогах без обустройства специальных станций для быстрого соединения составов на станциях службой движения разработана специальная

технология, которая заключается в предварительной остановке ведомого электропоезда перед прибытием у входного светофора с дальнейшим движением по станции маневровым порядком до полного объединения [15].

Подвижной состав спроектирован с учетом движения по системе многих единиц: на головных вагонах имеется автосцепка «Шарфенберга», которая объединяет воздухопроводную и электрическую магистрали поезда (высокоскоростные электропоезда ICE разных типов, дизель-поезда Desiro). Однако в последнее время на железных дорогах Германии речь идет не столько о механическом сцеплении поездов, сколько об «электронной сцепке», когда поезда движутся в связке с небольшой дистанцией друг от друга, но управляются при этом из ведущего состава [16]. Данная концепция предложена проектом Дрезденского университета проектирования систем движения транспорта для железных дорог Японии, где благодаря ее использованию могут появиться дополнительные резервы пропускной способности [17].

1.4 Анализ исследований по регулированию составности поездов в пригородном сообщении

Оптимизацией движения пригородных поездов на интенсивных железнодорожных направлениях занимались ученые и исследователи А.П. Артынов, С.П. Вакуленко, И.И. Васильев, П.Я. Гордеенко, Иловыйский, Ф.П. Кочнев, Ю.О. Пазойский, Н.В. Правдин, Е.П. Полынцев, В.Г. Шубко, Egidio Quaglietta, Meng Wang, Rob M.P. Goverde. Результаты исследований опубликованы в [18–28]. Исследования касались вопросов рациональных размеров движения в железнодорожных узлах, технологии обслуживания железнодорожных направлений в зависимости от пассажиропотока.

Совершенствование графика движения пригородных поездов стало объектом исследования таких ученых, как С.П. Вакуленко, П.А. Козлов,

Е.В. Копылова, Е.Б. Куликова, О.А. Медведь, С.М. Резер, Waressara Weerawat, Karnapat Chumkad, Sara Gestrelus, Anders Peterson, Martin Aronsson, Bi M., He Sanxiu, Li H., Yin W., Jing Y., J. Pochet, S. Baro и G. Sandou и других. Данному вопросу посвящены работы [29–31], отражающие зависимости графика от пассажиропотока, исследования [32, 33] касаются моделирования графика движения.

Подходы к управлению пригородным пассажирским комплексом описаны в работах исследователей и ученых А.Ю. Белянкина, В.Н. Ембулаева, Е. Женере, А.И. Жербиной, Н.В. Кузнецова, П.В. Куренкова, И.С. Новоселовой, Р.В. Панк, Л.А. Пышкиной, С.М. Резера, В.М. Сай, М.А. Шнейдера. Общие подходы к формированию организационной структуры пригородного комплекса отражены в работе [34], аспекты управления подразделениями пригородных компаний раскрыты в [35–39]. Вопросы управления пригородными перевозками на основе законов рыночной экономики и маркетинга решаются в [10, 40, 41].

Значительную долю расходов на организацию пригородного движения, как будет показано далее, занимают затраты, связанные с эксплуатацией подвижного состава. Поэтому одна из наиболее сложных задач в организации пригородного сообщения – определение минимального потребного количества составов и вагонов для обслуживания пригородных перевозок. Вопросы оптимизации составности МВПС были рассмотрены в некоторых работах, приведенных выше.

В научных работах Самариной Н.А. предлагается подход к разработке единого графика оборота пригородных электропоездов [42]. Исследователем были составлены алгоритм и программа решения этой задачи с использованием экономико-математических методов и ЭВМ. Недостатком данного алгоритма является использование электропоездов одной составности, что приводит к дополнительным затратам на транспортную работу. Частично недостатки решены в работах [43, 44], где автор решает вопросы минимизации парка вагонов, а также изменения составности моторвагонных поездов в условиях депо.

Проблемами повышения эффективности пригородных перевозок и оптимизацией их параметров занимались следующие ученые и исследователи:

Ф.П. Кочнев, Н.И. Бещева, Л.А. Пышкина, Т.Н. Федотова. В своих работах [45–50] ими были раскрыты аспекты рациональной организации движения пригородных поездов, использование прогрессивных графиков движения, в том числе вопросы построения рационального графика оборота пригородных составов. Предложенные подходы до сих пор применяются на практике.

Исследования ведущих ученых в сфере пригородных перевозок [47, 51] позволяют сделать вывод, что распределение пассажиропотока по длине пригородного участка, как правило, не равномерно: в общем случае при удалении от головной станции пассажиропоток снижается (экспоненциальное распределение). В отдельных случаях имеет место нормальное распределение, распределение Пуассона (при диаметральной и маятниковом движении) и др. Возникает проблема нерационального использования подвижного состава и, как следствие, убыточности перевозок по малонаселенным районам. Исследователями было предложено несколько способов решения данной проблемы: секционирование МВПС; технология челночного движения, технология модульного движения.

Вопросы использования секционируемых составов пригородных поездов были рассмотрены в работах [3, 51]. О.Ю. Пазойским отмечается, что секционирование – это процесс изменения составности за счет увеличения или сокращения количества секций в МВПС на станциях оборота либо на станциях перелома густоты пассажиропотока. Так как прицепка-отцепка секций представляет собой сложный технологический процесс, на практике она производится в условиях моторвагонного депо. Продолжительность изменения числа секций составляет 40–50 минут. Изменение составности путем секционирования на станциях перелома пассажиропотока (зонных станциях) требует дополнительного технического оснащения этих станций и определения эксплуатационных требований к ним, организации работы локомотивных бригад; организации посадки и высадки пассажиров в укороченные поезда. Секционирование в условиях депо также затрудняется из-за использования герметичных межвагонных переходов и беззазорных сцепных устройств. Вопросы

автоматизации построения графиков оборота пригородных составов были затронуты О.Ю. Пазойским и В.Д. Бархатным в работах [52–55].

Современный МВПС может состоять не только из секций, но и включать в себя вагоны, не объединенные в электросекции. Это позволяет регулировать составность так, что количество вагонов может меняться от 2 до 12 и быть нечетным. Такой особенностью обладает подвижной состав отечественного производства серии ЭП2Д [56]. Схемы формирования от 2 до 5 вагонов приведены на рисунке 1.12.

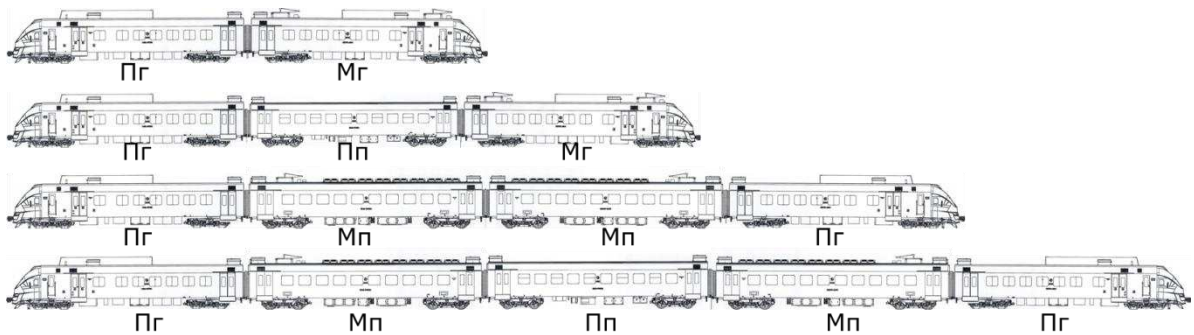


Рисунок 1.12 – Композиции электропоезда ЭП2Д

Инженерам и конструкторам завода «Уральские локомотивы» удалось доработать подвижной состав «Ласточка» [57] так, чтобы появилась возможность регулирования составности от 5 до 7 вагонов (рисунок 1.13).

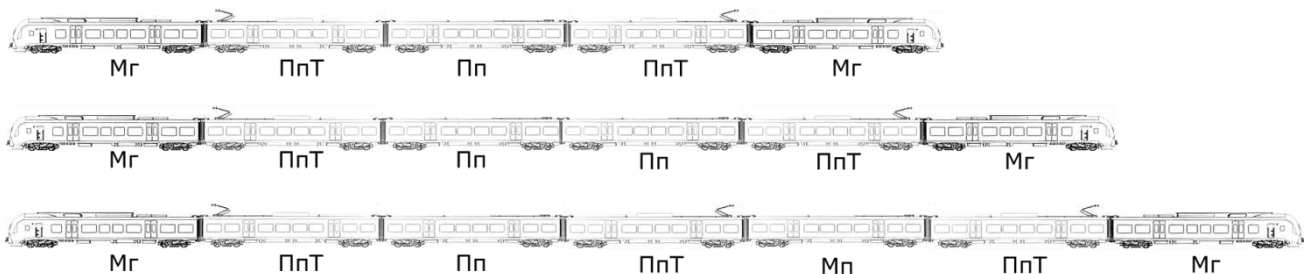


Рисунок 1.13 – Композиции электропоезда ЭС2Г

Все это дает основание к изменению понятия «секционирование». Секционирование – это изменение количества вагонов моторвагонного

подвижного состава путем отцепки (либо прицепки) электросекций или отдельных вагонов, не входящих ни в одну электросекцию, в условиях моторвагонного депо. На основе секционирования пригородные пассажирские компании оптимизируют расходы, используя дифференцированную составность в зависимости от сезона, дней недели и других факторов, влияющих на изменения пассажиропотока.

На сопряженных участках с разными величинами пассажиропотока целесообразно эксплуатировать поезда разной составности по технологии челночного движения. Технология челночного движения была описана и обоснована в исследованиях С.И. Конона [58] и Ю.О. Пазойского [59]. Она может быть применена при значительных размерах пассажиропотока, когда целесообразно организовать тактовое движение пригородных поездов. При такой технологии пригородный участок делят на два полигона обращения: полигон обращения полноразмерных поездов и поездов с уменьшенным количеством вагонов. Станция, которая делит участок, именуется пересадочной станцией. На ней осуществляется кросс-платформенная пересадка пассажиров, следующих с остановочного пункта первого полигона обращения на остановочный пункт второго полигона. На данных станциях требуется строительство инфраструктуры для разделения пассажиропотоков и обеспечения пересадки в прямом и обратном направлениях. Особые требования предъявляются и к графику движения: он должен строго соблюдаться, чтобы пассажиры успели пересесть в другой электропоезд.

Описанные выше меры требуют значительных капиталовложений в реконструкцию железнодорожных станций, ухудшают условия проезда пассажиров, так как требуется пересадка, увеличивается время в пути.

Устранить данные недостатки возможно путем внедрения модульных перевозок. Аспекты эксплуатации сдвоенных составов рассматривались В.В. Гарабузовой [5], которой была доказана эффективность модульного движения на примере Хабаровского края и Еврейской автономной области, произведены расчеты экономии эксплуатационных расходов методом единичных

расходных ставок [59, 60]. В своей научной статье, посвященной проблемам пригородных перевозок, член-корреспондент РАН В.А. Цветков и А.А. Медков также упоминают о возможности использования модульных электропоездов. Методика организации модульного движения на основе графоаналитического метода с использованием задачи о назначении сформулирована О.Ю. Пазойским в докторской диссертации [3].

Для определения параметров организации пассажирских пригородных перевозок различными авторами применялась задача линейного программирования, например для расчета рациональных размеров движения транспортных средств в работе [61]. Задача решалась в статической постановке. Рассматривая пункт зарождения пассажиропотока как производство, а пункт погашения как потребителя, можно с помощью статической транспортной задачи найти минимум затрат на перевозку из пункта зарождения пассажиропотока в пункт его погашения. Недостатком таких методов является невозможность эффективно адаптировать систему организации пригородных перевозок к изменениям размеров, географии пассажиропотоков, эксплуатационной обстановки. Например, невозможно оперативно учесть снижение пропускной и провозной способности во время предоставления ремонтных «окон» или при возникновении проблем с подвижным составом.

Основоположителем теории организации транспортных потоков в динамике стал П.А. Козлов. Использование динамической транспортной задачи [62–67] предоставит больше возможностей для решения практических задач согласованного взаимодействия элементов пассажирской пригородной системы. Подобный подход получил применение в научных исследованиях для оптимизации параметров грузовых перевозок. Данному вопросу посвящены труды П.А. Козлова, в том числе выполненные в соавторстве с О.В. Осокиным, Н.А. Тушиным, В.С. Колокольниковым [68–74].

В работах П.А. Козлова и Е.В. Копыловой [75–77] разработаны методы и модели, которые устанавливают оптимальные параметры транспортных систем агломераций. Учет динамики процессов зарождения, продвижения и погашения

пассажиропотоков позволил повысить клиентоориентированность транспорта и достичь эффективной организации пригородных пассажирских перевозок в городских агломерациях. Однако в этих работах не учитывалась возможность регулирования количества секций и вагонов в пригородных составах. Для оптимизации использовались поезда стандартной композиции.

На основе проведенных исследований были выделены основные мероприятия пригородного комплекса, повышающие эффективность его работы (таблица 1.1).

Обоснование мероприятий по планированию и непосредственному осуществлению изменения составности моторвагонного подвижного состава на основе секционирования и модульной технологии движения в соответствии с динамикой пиковых густот пассажиропотоков требует дальнейшего совершенствования оптимизационных моделей.

Таблица 1.1 – Мероприятия по повышению эффективности пригородного комплекса

Класс мероприятий	Группа мероприятий	Мероприятие	Виды мероприятий	Авторы методики	Примеры использования на практике
Повышение населенности пригородных поездов за счет роста пассажиропотока	Маркетинговые мероприятия	Использование гибкой тарифной политики	динамическое ценообразование	В.Г. Галабурда, Н.П. Терешина, С.М. Резер, В.П. Постников, Л.А. Дробышева, Р.Н. Нагапетьянц	ограниченно ЦППК, МТППК
			матричные постанционные тарифы		
			конкурентные тарифы		
		Использование таргетированных скидок и бонусов	по определенным корреспонденциям и направлениям		все ППК ограниченно
			по сегментам пассажиров		
			программа лояльности		
		Реализация доп. товаров и услуг	реализация чайной продукции,		все ППК ограниченно
			реализация товаров в дорогу		
			продажа сторонних услуг		
		Реклама, пиар-акции и SMM-маркетинг	реклама в СМИ		все ППК
			публичные мероприятия		
			выездные экскурсии и мероприятия		
			розыгрыши призов		
			информирование пассажиров в соцсетях		
		Акции по стимулированию добровольных поездок	для ж/д фанатов		все ППК
			для блогеров и влогеров		
			при перевозках орг. групп		
			при перевозках инвентаря и оборудования		
		Развитие электронных каналов продаж	мобильное приложение		все ППК
			сайт продаж абонементов		
			сайт продаж групп пассажиров		
сайт продаж ретротуров					

Продолжение таблицы 1.1

Класс мероприятий	Группа мероприятий	Мероприятие	Виды мероприятий	Авторы методики	Примеры использования на практике
Повышение населенности пригородных поездов за счет роста пассажиропотока	Маркетинговые мероприятия	Привлечение к взаимодействию контрагентов (сервисы каршеринга, такси, гостиницы, торговые центры и пр.)	интеграция сайтов продаж ППК и сервисов такси, каршеринга, гостиниц, ТЦ		не применяется
			взаимные программы скидок ППК и сервисов такси, каршеринга, гостиниц, ТЦ		
	Внедрение транспортных продуктов для населения	Организация движения целевых поездов	целевые поезда на массовые мероприятия	О.А. Медведь, Ю.О. Пазойский	некоторые ППК + СЗППК и ЦППК в Москве и Санкт-Петербурге
			целевые поезда к центрам туризма и отдыха (горнолыжные поезда),		
			целевые дачные поезда		
			аэроэкспрессы		
			целевые поезда под определенную категорию пассажиропотока мегаполисов		
		Организация туристических поездов на паровозной тяге	ретропоезда регулярной маршрутной сети	-	МТППК
			коммерческие ретропоезда		ППК
	Применение прогрессивных типов графиков движения	использование непараллельных графиков (классический, с остановками на зонных станциях) – назначение поездов-экспрессов	Ф.П. Кочнев, Ю.О. Пазойский, С.П. Вакуленко, В.Г. Шубко	ЦППК, МТППК, СЗППК, ограниченно – остальные ППК	
		использование шахматных графиков			
	Организация тактового движения	движение поездов с определенным интервалом	Ю.О. Пазойский, С.П. Вакуленко, В.Г. Шубко	ЦППК	

Продолжение таблицы 1.1

Класс мероприятий	Группа мероприятий	Мероприятие	Виды мероприятий	Авторы методики	Примеры использования на практике
Повышение населенности пригородных поездов за счет роста пассажиропотока	Внедрение транспортных продуктов для населения	Организация маятникового движения	движение с одного направления на другое через центр города	Ю.О. Пазойский, С.П. Вакуленко, В.Г. Шубко	ЦППК, Краспригород, ППК, СПК и др.
		Организация мультимодальных перевозок (ММП)	ММП с согласованием видов транспорта и продажей единых билетов;	С.П. Вакуленко, В.М. Сай, Ю.О. Пазойский, В.Г. Галабурда	большинство ППК
			ММП с фрахтом транспортных единиц других видов		
	Совершенствование подвижного состава	Использование нового подвижного состава (ПС)	Использование нового ПС повышенной комфортности	Ю.О. Пазойский, С.П. Вакуленко, В.Г. Шубко, С.М. Резер	МТППК, ЦППК, СЗППК, СПК, ППК, КЭП, Калининградская ППК
		Модернизация вагонов под потребности пассажиров	детские вагоны	-	СПК, ППК
			«мультивагоны» (комплексные вагоны для пассажиров разных категорий)		
Оптимизация использования подвижного состава транспортной работы	Изменение составности электропоездов	Дифференцированная сезонная составность	постоянное количество вагонов в зимний и летний сезон	-	СПК
		Дифференцированная составность в зависимости от пассажиропотока	секционирование в условиях депо	Ю.О. Пазойский	ППК
			секционирование на станциях оборота		-

Продолжение таблицы 1.1

Класс мероприятий	Группа мероприятий	Мероприятие	Виды мероприятий	Авторы методики	Примеры использования на практике	
Оптимизация использования подвижного состава транспортной работы	Изменение составности электропоездов	Технология челночного движения	движение поездов разной составности на примыкающих участках по станции перелома пассажиропотока	Ю.О. Пазойский, С.П. Вакуленко, В.Г. Шубко	в чистом виде не используется	
		Технология модульного движения	модульное движение с разделением на узловой станции	Ю.О. Пазойский, В.В. Гарбузова, О.А. Медведь, А.А. Цветков, А.О. Шмидт	КЭП, СПК	
			модульное движение с разделением на станции перелома пассажиропотока			
	Оптимизация транспортного заказа субъекта	Установление постоянной минимальной составности	Составность поездов не меняется, не зависит от сезона, от направления, и определяется типом подвижного состава (минимум 1, 2 или 4 вагона)	-	используется частично в большинстве ППК	
		Объединение нескольких маршрутов в один с оптимизацией затрат	объединение маршрутов, частично дублирующих друг друга в определенном временном промежутке	-	СПК	
			объединение маршрутов для оптимизации графика оборота			
		Ограничение маршрутов поездов	Ограничение маршрута	-	2015 год большинство ППК	
	Отмена поездов	Отмена малонаселенных поездов	-			
	Совершенствование систем оплаты проезда	Сокращение затрат на билетно-кассовое обслуживание	Установка терминалов самообслуживания	-	-	ЦППК, МТПК, СЗППК, КЭП и другие
			Развитие электронных сервисов продажи билетов	рост продаж в мобильном приложении и сайте ППК	-	все ППК
Оплата проезда через СБП			-	-	все ППК	

Выводы по главе 1

1. Сложное экономическое состояние пригородного комплекса российских железных дорог ставит перед перевозчиками задачу в повышении доходов от перевозочной деятельности, с одной стороны, и сокращение затрат на перевозку – с другой. Недостаток подвижного состава для обслуживания существующей маршрутной сети регионов увеличивает риск невыполнения государственного заказа на перевозки. В этой связи одной из важных задач становится разработка концепции рационального обновления парка МВПС с использованием прогрессивных графиков оборота.

2. Анализ современных тенденций в организации пригородных пассажирских перевозок показал, что одним из наиболее прогрессивных способов освоения пассажиропотока без сокращения маршрутной сети является модульное движение МВПС.

3. В настоящее время система обращения моторвагонного подвижного состава на основе секционирования и модульной технологии движения в соответствии с колебаниями пассажиропотоков в пригородных компаниях не используется. Разработка технологии гибкого регулирования составности является актуальной задачей.

4. В существующие информационные автоматизированные системы пригородных компаний необходимо внедрять оптимизационные модели. Разработка алгоритмов и технологий использования задач оптимизации позволит создать системы поддержки принятия решений. С этой целью в исследовании необходимо обосновать выбор аппарата оптимизации.

ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ГРАФИКА ОБОРОТА МОДУЛЬНЫХ ПРИГОРОДНЫХ СОСТАВОВ

2.1 Гибкое регулирование составности как основной способ повышения эффективности пригородного комплекса

Для понимания направлений по повышению эффективности пригородного комплекса рассмотрим затраты пригородных пассажирских компаний. Расходы можно определить по формуле:

$$P = \sum (\sum I_j + \sum n_a \cdot a + \sum Nt_j \cdot b + \sum nl_j \cdot (c_{то} + c_{тр} + c_{кр})) + P_{соб}, \quad (2.1)$$

где P – суммарные затраты ППК на подвижной состав и инфраструктуру, руб.;

I_j – плата за инфраструктуру с одного j -го поезда, руб.;

n_a – количество арендованных вагонов, ваг.-ч;

a – ставка за аренду вагонов, руб./ваг.;

Nt_j – затраты поездо-часов, поездо-ч;

b – ставка за управление и эксплуатацию, руб./поездо-ч;

nl_j – затраты вагоно-километров, ваг.-км;

$c_{то}$ – ставка за техническое обслуживание, руб./ваг.-км;

$c_{тр}$ – ставка за технический ремонт, руб./ваг.-км;

$c_{кр}$ – ставка за капитальный, руб./ваг.-км;

$P_{соб}$ – собственные расходы ППК, руб.

Большую долю расходов занимают выплаты ОАО «РЖД» за оказание услуг, связанных с инфраструктурой и подвижным составом. В ходе исследований была проанализирована структура затрат всего пригородного комплекса за 2021 год (рисунок 2.1).

Структура расходов ППК за 2021 год, %

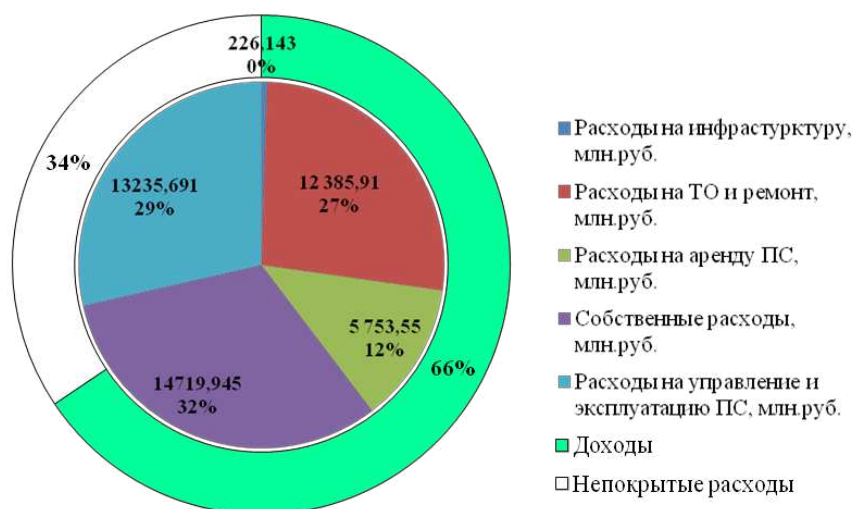


Рисунок 2.1 – Структура расходов пригородного комплекса за 2021 год

Наибольшую долю затрат среди пригородных компаний – дочерних и зависимых обществ ОАО «РЖД» составляли собственные расходы (в основном за счет крупных пригородных компаний АО «МТ ППК», АО «СЗППК» – затраты на фонд оплаты труда (далее – ФОЗП), функционирование систем продаж, собственный подвижной состав и турникетные линейки). По договорам с ОАО «РЖД» примерно равные доли занимают затраты на ремонт и техническое обслуживание (зависящие от транспортной работы) и затраты на управление и эксплуатацию (зависящие от поездо-часов). Расходы, напрямую зависящие от размеров эксплуатируемого парка, занимали более 12 % в структуре затрат, а плата за использование инфраструктуры (учитывая коэффициент 0,01) составила около 0,5 %.

На рисунке 2.2 представлена структура затрат одной из не крупных пригородных компаний холдинга РЖД (АО «Пермская ПК») за 2021 год, при этом учтена эксплуатация нового подвижного состава ЭС2Г.

Структура расходов АО "Пермская ПК" за 2021 год

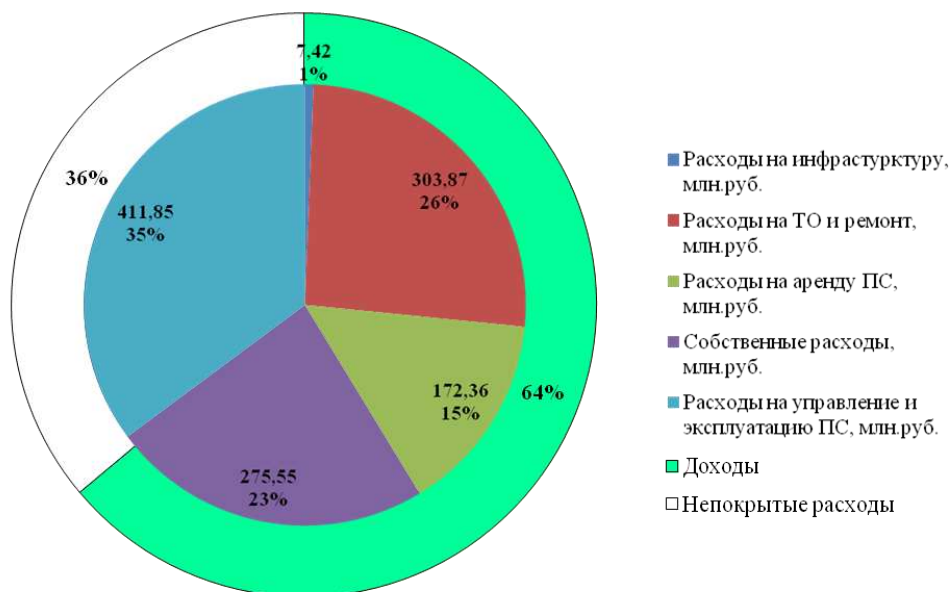


Рисунок 2.2 – Структура расходов АО «Пермская ПК»

Структура затрат отдельно взятой компании значительно отличается долей собственных расходов (в связи с тем, что собственные расходы связаны в основном с обслуживанием пассажиров: экипировка составов и их уборка, транспортная безопасность, ФОЗП сотрудников, накладные расходы). Наибольшую долю составляют расходы на управление и эксплуатацию. Они относятся к условно-постоянным затратам пригородных компаний и зависят от поездо-часов пробега, поэтому их сокращение в условиях стабильной маршрутной сети невозможно (исключение составляют случаи ускорения поездов и вождение машинистами «в одно лицо» или ведение по беспилотной технологии). В связи с ростом ставки за 1 поездо-час управления и эксплуатации на новый подвижной состав, можно сделать вывод, что при той же маршрутной сети в условиях замены МВПС доля затрат по этой статье будет возрастать.

Среди затрат по договорам с ОАО «РЖД» вторую позицию занимают затраты на ремонт и техническое обслуживание (26 %). Плата за ремонты включает в себя расходы на техническое обслуживание, технический ремонт и

капитальные ремонты. Эти расходы напрямую зависят от транспортной работы, так как износ оборудования тем больше, чем больше эксплуатируются вагоны.

Арендная плата, составляющая (15 %) в соответствии с методикой [78], зависит от количества арендуемого подвижного состава. Ставки аренды на новый подвижной состав также увеличились, что вызывает рост доли данной статьи затрат в структуре расходов. Ограничить рост расходов можно путем оптимизации эксплуатируемого парка МВПС без ущерба размерам движения поездов.

Рост ставок на новый МВПС (по состоянию на 2021 год) показан в таблицах 2.1– 2.2 (ставки взяты для Свердловской железной дороги).

Таблица 2.1 – Рост ставок на электроподвижной МВПС

Статья затрат	Электроподвижной МВПС			Рост ставок ЭП2Д к ЭД4М, %	Рост ставок ЭС2Г к ЭД4М, %
	"Старый" ЭД4М	"Новый" ЭП2Д	"Новый" ЭС2Г		
Управление и эксплуатация, руб./поездо-час	3700,53	3700,53	12542,84	0 %	+239 %
Текущий ремонт, руб./ваг.-км	4,53	6,38	0,00	+41 %	-100 %
Техническое обслуживание, руб./ваг.-км	5,79	5,79	34,51	0 %	+496 %
Капитальный ремонт, руб./ваг.-км	3,71	5,91	0,00	+59 %	-100 %
Плата за пользование, млн руб./состав (из 10 ваг.)	6,87	32,36	37,47	+371 %	+446 %

Таблица 2.2 – Рост ставок на автономный МВПС

Статья затрат	Автономный МВПС		Рост ставок РА-3 к РА- 2, %
	"Старый" РА- 2	"Новый" РА- 3	
Управление и эксплуатация, руб./поездо-час	4157,95	4157,95	0 %
Текущий ремонт, руб./ваг.-км	9,29	9,29	0 %
Техническое обслуживание, руб./ваг.-км	21,40	21,40	0 %
Капитальный ремонт, руб./ваг.-км	34,84	34,84	0 %
Плата за пользование, млн руб./состав (из 3 ваг.)	3,80	9,58	+152 %

Плата за инфраструктуру [79] в настоящее время составляет 1 % от общих расходов ППК, однако после 2030 года льготный коэффициент 0,01 может быть отменен, что вызовет резкое (в 100 раз) увеличение расходов ППК по данной статье. Плата за инфраструктуру частично также зависит от количества вагонов в поезде:

$$И_j = И1 + n_j \cdot (И2 + И3), \quad (2.2)$$

где j – условное обозначение конкретного поезда;

И1 – базовая ставка платы за инфраструктурную составляющую, руб./поезд;

И2 – базовая ставка платы моторвагонную составляющую, руб./вагон;

И3 – базовая ставка платы за вокзальную составляющую, руб./вагон;

n_j – количество вагонов в составе.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что основные меры по сокращению затрат должны касаться именно подвижного состава. Более 40 % затрат зависят от вагоно-километровой работы. Арендные ставки на новый подвижной состав выше, чем на подвижной состав старого поколения. Это объясняется высокими затратами на закупку, а также возросшими затратами депо и сервисных предприятий на обслуживание новой электроники, экологически чистых туалетных комплексов, систем отопления и кондиционирования (климат-контроля).

С учетом обеспечения комфорта пассажиров и достижения минимума потребного парка МВПС, а также затрат на его эксплуатацию целесообразно на всей сети ОАО «РЖД» применять систему **гибкого регулирования составности**. **Гибкое регулирование составности – комплекс мероприятий по планированию и непосредственному оптимальному осуществлению изменения составности моторвагонного подвижного состава на основе секционирования и модульной технологии движения в соответствии с колебаниями пиковых густот пассажиропотоков.**

2.2 Выбор метода оптимизации

Методиками оптимизации пригородного пассажирского движения в последние годы занималась научная школа под руководством доктора технических наук Ю.О. Пазойского.

В своих работах Ю.О. Пазойский делает основной упор на совершенствование перевозок пассажиров в крупных железнодорожных узлах. В работе [51] была представлена задача по определению размеров движения поездов в пиковое и непиковое время при постоянной составности. Суть решения сводится к задаче линейного программирования, которая решается на основе системы ограничений по освоению заданных густот пассажиропотоков по пригородным зонам. По итогам решения в любой среде такого класса задач (например, в среде *LPSolve*) выдаются размеры движения. При этом поезда на графике прокладываются равномерно с определенным интервалом тактового движения, а на основе графика движения графоаналитическим методом производится увязка составов в единый график оборота.

Данный класс задач на большей части страны не может быть использован из-за относительно низких размеров пассажиропотока, при котором на определенных направлениях размеры движения составляют всего около 3–5 пар поездов в сутки. Задача по расчету размеров движения в этом случае не имеет смысла.

Другой класс задач по рационализации пригородного движения посвящен использованию укороченных составов МВПС в непиковые периоды суток. Для крупных мегаполисов это время наступает днем ориентировочно с 10 утра и продолжается до 16 часов при движении во всех направлениях, а также ранним утром при движении из города и поздним вечером при движении в город.

О.Ю. Пазойский предлагает несколько способов использования укороченных поездов: секционирование на станциях оборота путем прицепки-отцепки электросекций и использование модульного движения, которое автор в

своей работе называет движением секций по системе многих единиц (в этом случае секция должна быть автономной).

При постоянной композиции автономных секций МВПС предложена математическая модель, основанная на достижении минимума числа автономных секций, находящихся в обращении на пригородном участке, а при полученном минимальном числе секций – минимум секции-километров (в нашем случае более актуальным показателем является вагоно-километр) пробега.

График движения в модели является заданным, так как при неинтенсивном пассажиропотоке тактовое движение нецелесообразно. Соответственно, размеры движения секций по конкретной нитке графика определяются как:

$$n_{\text{секц}}^j \geq \frac{\Gamma_{\text{max}}^j \cdot k^{\text{нер}}}{\alpha \cdot a_{\text{секц}}}, \quad (2.3)$$

где Γ_{max}^j – пиковая густота пассажиропотока конкретного поезда, пасс.;

$k^{\text{нер}}$ – коэффициент неравномерности перевозок;

$a_{\text{секц}}$ – вместимость одной секции (по количеству посадочных мест), пасс./ваг.;

α – коэффициент использования вместимости вагона (для удобства пассажиров 0,9).

После определения потребного числа секций, они наносятся на схематичный график движения (вместо нитки графика наносится потребное количество секций), а затем производится их увязка и назначение резервных поездов. Увязка производится аналогичным методом – путем составления матрицы назначений.

Перечислим ограничения приведенной выше методики:

– модель не предусматривает возможную корректировку графика движения при потенциальном увеличении (снижении) коэффициента использования подвижного состава;

- модель не предусматривает расчет движения автономных секций на сложных разветвленных направлениях;
- в модели предусмотрено движение одинаковых унифицированных по композиции автономных секций, что является ограничением, так как количество вагонов в общем случае может быть разным;
- не предусматривается корректировка составности автономных секций на станциях с депо при заходе на плановое техническое обслуживание.

Автор приводит отдельные методики оптимизации транспортной работы при условии секционирования составов на территории депо, применения группового графика оборота (групп поездов разной составности). На наш взгляд, существенным недостатком является отсутствие общей постановки задачи, которая должна построить график гибкого регулирования с учетом всех выше обозначенных способов оптимизации пригородного движения.

В своих научных исследованиях В.В. Гарбузова обосновывает мероприятия по оптимизации транспортной работы с экономической точки зрения, не учитывая технологию обращения пригородных составов [5]. В работе приведена методика выбора видов транспорта в пригородном сообщении в сочетании с отдельными техническими особенностями для Дальнего Востока на основе технико-экономических расчетов вариантов освоения пригородного пассажиропотока. В методике учитывается и конкурентный анализ, характер пассажиропотоков, социальный портрет пассажиров.

Что касается движения МВПС по модульному принципу, автором рекомендуется сравнение двух вариантов и выбор наиболее экономически эффективного:

$$\begin{aligned} & \sum nl^M \cdot c_{\text{ваг-км}} + \sum nt_{\text{дв}}^M \cdot c_{\text{ваг-ч}}^{\text{дв}} + \sum nt_{\text{пр}}^M \cdot c_{\text{ваг-ч}}^{\text{пр}} + \\ & + (\sum At_{\text{дв}}^M + \sum At_{\text{ож}}^M) \cdot c_{\text{пасс-ч}} < P^{\text{об}}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $\sum nt^M \cdot c_{\text{ваг-км}}$ – затраты, зависимые от вагоно-километровой работы при модульной технологии, руб.;

$\sum nt_{\text{дв}}^M \cdot c_{\text{ваг-ч}}^{\text{дв}}$ – затраты на движение вагонов при модульной технологии, руб.;

$\sum nt_{\text{пр}}^M \cdot c_{\text{ваг-ч}}^{\text{пр}}$ – затраты по простоям подвижного состава при модульной технологии, руб.;

$\sum At_{\text{дв}}^M$ – пассажиро-часы в движении при модульной технологии, пасс.-ч;

$\sum At_{\text{ож}}^M$ – пассажиро-часы ожидания при модульной технологии, пасс.-ч;

$c_{\text{пасс-ч}}$ – стоимость одного пассажиро-часа (потери экономики от незанятости пассажира в народном хозяйстве во время поездки), руб./пасс.-ч;

$R^{\text{об}}$ – суммарные затраты на организацию пригородного сообщения обычным способом (по аналогичным статьям затрат).

Данная методика не предоставляет расчета графика оборота составов, не учитывает перестроение технологии при всплесках пассажиропотока, не позволяет сочетать движение по модульному принципу с другими способами повышения эффективности пригородного комплекса. Ее основное назначение – экономическое обоснование тех или иных управленческих решений.

В представленных работах оптимизацию управления вагонопотоками в пригородном сообщении преимущественно рекомендуется осуществлять с помощью транспортной задачи линейного программирования. Этот подход характеризуется значительным упрощением процесса перевозки. Полученные при выполнении расчета планы трудно реализовать.

Классическая транспортная задача является статической. Она не воспроизводит динамику, присущую транспортным процессам. Ритмы производства и потребления у поставщиков и потребителей в большинстве случаев не совпадают. В случае с пригородным сообщением несоответствие ритма прибытия МВПС и требуемого расписания отправления поездов может вызывать дополнительные расходы на простой или потребность в дополнительных составах. Поэтому осуществить оптимизацию пригородных

вагонопотоков невозможно. Также при изменении размеров пассажиропотока возникают переходные процессы: рассчитанная структура потоков в следующий период накладывается на структуру потоков предыдущего расчёта. Из-за отсутствия в статической задаче параметра «время хода», этот процесс не отображается. Возникшие рассогласования приводят в том числе к необходимости излишней засылки составов.

В управлении пригородных компаний находятся десятки составов. Отправление осуществляется из разных пунктов. География обслуживания включает разветвленные линии значительной протяженности. Строго говоря, изменение времени и маршрута пропуска одного состава влияет на графики пропуска всех остальных. Организация обращения поездов с регулируемым количеством вагонов значительно увеличивает размерность модели. Перебрать все количество вариантов невозможно без процедур строгой оптимизации. Поэтому для оптимизации транспортных процессов необходим адекватный аппарат – динамическая транспортная задача [64, 80–82].

Задачей исследования становится разработка функциональной оптимизационной модели на основе динамической транспортной задачи. Решение задачи линейного программирования можно осуществить любыми известными способами [62–64, 83]. Размножение транспортной сети во времени создает большую размерность. Поэтому целесообразно использовать существующие автоматизированные компьютерные программы (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Схема автоматизированного решения задачи оптимального управления пригородными составами

К настоящему моменту для автоматизированного расчёта и оптимизации динамической структуры потоков используется аппарат динамической транспортной задачи с различным содержательным наполнением. Возникает проблема выбора. Следующим шагом будет постановка заданий для программной доработки и формирование требований к выходным форматам получаемых результатов.

2.3 Выбор аппарата оптимизации

В динамической транспортной задаче транспортная сеть состоит из набора пунктов, соединенных направленными путями (дугами). Задается интервал оптимизации функционирования транспортной системы и такт расчета. Для каждого момента времени на множестве пунктов сети определена функция производства и потребления. Если значение функции положительное, то пункт называется *источником* (пунктом производства); если отрицательное, то пункт именуется *стоком* (пунктом потребления); а если равно нулю, то пункт называется *перевалочным*. Каждая дуга характеризуется пропускной способностью и транспортным запаздыванием (временем в пути). Задается стоимость перевозки единицы объема поставок из пункта производства в пункт потребления. По дугам между пунктами производства в тактовый интервал – стоимость на хранение единицы запаса. Поток от отправителя к потребителю может пойти двумя путями: отправиться немедленно (и тогда могут возникнуть простои вагонов у потребителя) или отправиться после ожидания у отправителя. Задача оптимизации функционирования транспортной системы ставится как задача минимизации суммарных транспортных расходов и расходов на хранение при заданных ограничениях.

Идея использования динамической транспортной задачи для оптимизации пригородных пассажирских перевозок приводит к некоторым предположениям. Пригородная транспортная сеть состоит из станций зарождения пассажиропотоков (источники), станций погашения пассажиропотоков (стоки) и возможных маршрутов направленного перемещения (дуги). Для каждой станции отправления и каждого момента времени можно задать функцию зарождения потоков, а для станций назначения, соответственно, – функцию погашения пассажиропотоков. Для маршрутов передвижения задается пропускная способность, время и стоимость перемещения. Задержка потоков в пункте отправления будет означать ожидание пассажирами поезда. Можно задать

стоимость ожидания и пропускную способность пункта отправления. Аналогично формулируются задания для пункта погашения. В таком случае можно решить задачу оптимизации функционирования пригородной транспортной системы на основе организации пассажиропотока по минимуму суммарных транспортных расходов на перевозку и ожидание пассажиров.

Недостатком такой постановки является отсутствие затрат на обращение пригородных составов. Пассажиры перемещаются по участку не сами по себе, а в организованных поездах. В задаче оптимизации необходимо связать пассажиропоток с подвижным составом и графиком движения.

Подобную проблему рассматривал в диссертационном исследовании О.В. Осокин [84]. Для оптимизации оборота поездных локомотивов в грузовом движении предлагается использовать специальную постановку динамической транспортной задачи. Её особенностью является возможность отображения совместного движения состава с локомотивом и процесса подачи-уборки на станциях оборота. В функциональной модели реализованы идеи, предложенные П.А. Козловым.

Допустим, необходимо отобразить разделение и соединение потоков составов и поездных локомотивов на станции с депо (рисунок 2.4).

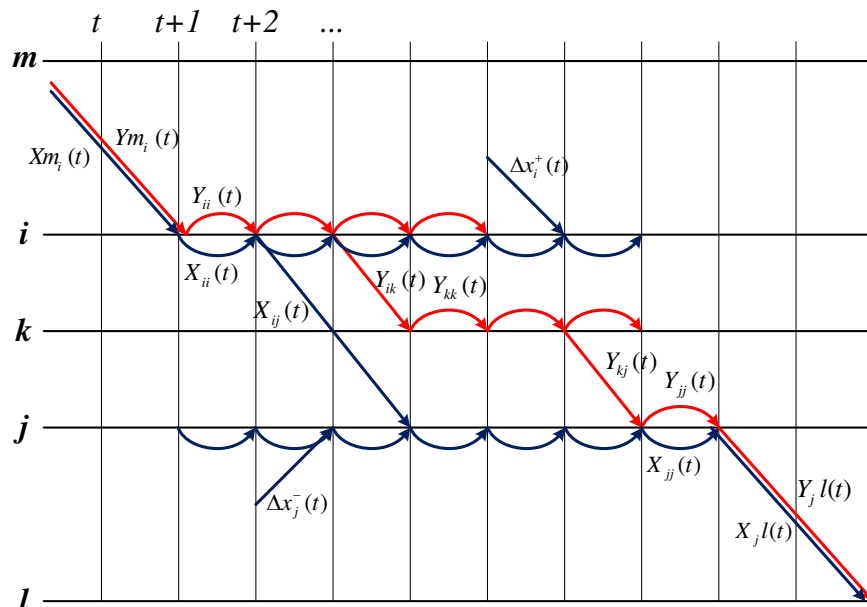


Рисунок 2.4 – Схема процессов с локомотивами и составами на станции

Поток поездов прибывает из пункта m на станцию с депо, затем отправляется в пункт l . Для станции смены локомотива на расчетной сети вводится три пункта:

- пункт « i » – подсистема прибытия, для отображения простоя составов и локомотивов после прибытия;
- пункт « k » – нахождение локомотивов в ожидании обслуживания в депо;
- пункт « j » – подсистема отправления, для отображения нахождения составов и локомотивов в поездах, готовых к отправлению.

Поток прибывающих поездов состоит из связки составов $x_{mi}(t)$ и локомотивов $y_{mi}(t)$. Связь состава с локомотивом в поезде задаётся равенством типа:

$$x_{mi}(t) = y_{mi}(t). \quad (2.5)$$

Ограничение по пропускной способности задаётся по потоку составов:

$$x_{mi}(t) \leq d_{mi}(t). \quad (2.6)$$

Содержательная трактовка перемещения потоков по дугам на рисунке 2.4 следующая:

- $X_{ii}(t)$ – составы, ожидающие обработки;
- $Y_{ii}(t)$ – локомотивы, ожидающие подачи в депо;
- $X_{ij}(t)$ – процесс обработки состава;
- $Y_{ik}(t)$ – процесс подачи локомотивов в депо;
- $Y_{kk}(t)$ – ожидание обслуживания локомотивов в депо;
- $Y_{kj}(t)$ – обслуживание локомотивов в депо;
- $X_{jj}(t)$ – готовые составы в поезде, ожидающие отправления.

Дуги $x_{jl}(t)$ и $y_{jl}(t)$ отображают процесс движения поездов со станции (i, k, j) в пункт l . Процесс зарождения потока отображается переменной $\Delta x_i^+(t)$, процесс погашения – переменной $\Delta x_j^-(t)$.

В работе реализована еще одна идея адаптации ДТЗЗ. Для отображения занятости локомотива техническим обслуживанием в случае превышения нормативного времени тактового интервала вводятся при разномножении дуги с пропускной способностью $d_{ik}(t) = 0$ (рисунок 2.5).

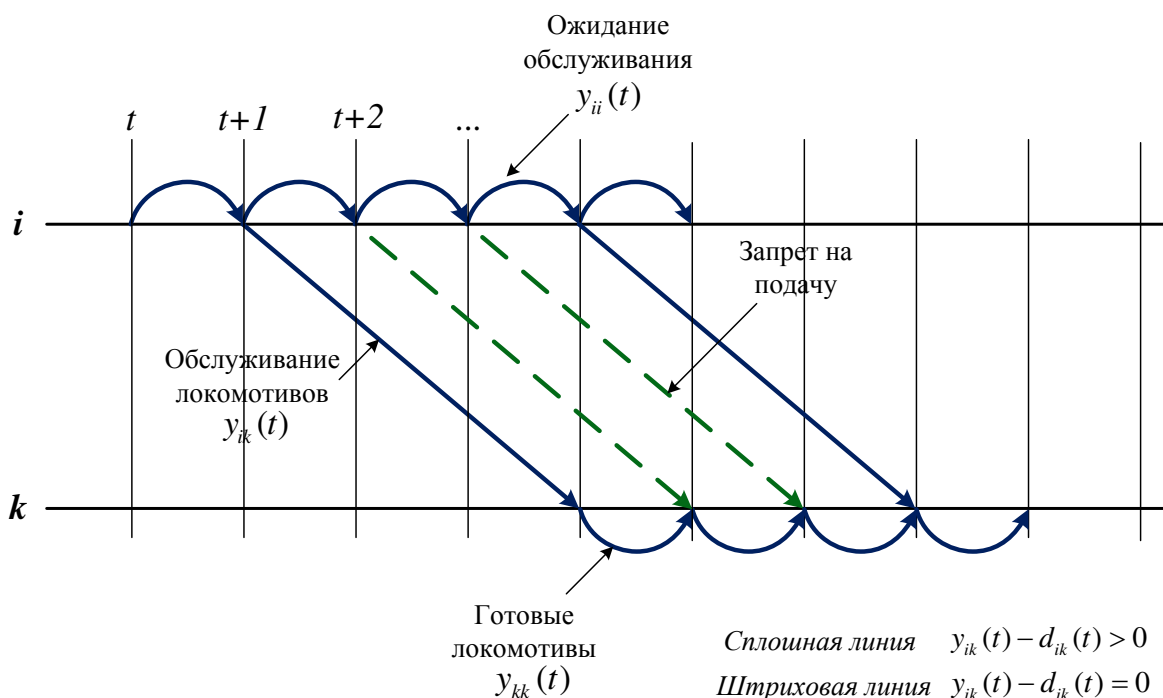


Рисунок 2.5 – Схема имитации работы локомотивного депо

Тем самым, обеспечивается подача следующего локомотива только тогда, когда предыдущий был обслужен. Балансные уравнения динамики локомотивов и составов должны соблюдаться для каждого из секторов всех станций рассматриваемого полигона.

Задача ставится следующим образом – обеспечить доставку составов от пунктов зарождения к пунктам погашения с минимальными суммарными затратами на непроизводительные простои составов и локомотивов. При этом

не должны нарушаться ограничения по пропускной способности участков, вместимости станций, производительности депо и т. п. [81, 85–86].

Целевая функция минимизирует все затраты, связанные с движением локомотивов, простоями составов и пробегами локомотивов резервом [81]:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_{t=0}^T (c_i^x \cdot x_{ii}(t) + c_i^y \cdot y_{ii}(t)) + \sum_k \sum_{t=0}^T c_k^y \cdot y_{kk}(t) + \\ & + \sum_j \sum_{t=0}^T (c_j^x \cdot x_{jj}(t) + c_j^y \cdot y_{jj}(t)) + \sum_* \sum_i \sum_{t=0}^T c_{*i} \cdot y_{*i}(t) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (2.7)$$

Решение задачи сводится к составлению систем неравенств (ограничений) для каждого сектора каждой станции в любой момент времени. После этого решается задача линейного программирования, по итогам которой определяются значения Y .

Адаптировать функциональную модель расчета оборота локомотивов для целей оптимизации графика оборота пригородных составов будет проблематично. Поток локомотивов в задаче однороден, следовательно, нет формализованного механизма выбора разнотипного подвижного состава. Провести аналогию грузовых вагонов с пассажиропотоком затруднительно, так как поток составов задается расчетной единицей. Формализованный алгоритм прикрепления вагонов к составу отсутствует.

В диссертационной работе Е.В. Копыловой [77] представлена методология оптимизации пригородных пассажирских перевозок на основе организации пассажиропотока. В целом предлагается решать задачу последовательно в несколько этапов [77] (рисунок 2.6). На начальном этапе производится согласование ритмов отправления пассажиров со станций участков и прибытия на станции назначения, обеспечивающих баланс интересов пассажиров с инфраструктурными возможностями транспорта. При этом учитываются ограничения по пропускным способностям участков, станций и отдельным

элементам пассажирских устройств. Затем рассчитываются необходимые размеры движения поездов с использованием известных методик. На завершающем этапе разрабатывается график оборота пригородных составов. В диссертации предложено использовать разработанный метод оптимального обеспечения графика движения составами пригородных поездов на основе динамической транспортной задачи.



Рисунок 2.6 – Этапы исследований и задачи, решаемые в сфере пригородных пассажирских перевозок с учетом организации пассажиропотоков

Целевая функция задачи выглядит следующим образом [77]:

$$\begin{aligned}
& c_i \cdot \sum_t t \sum_j \sum_t z_j(t) + M \cdot \sum_j \sum_t y_{ii}(t) + M_n \cdot \sum_j \sum_t \Delta x_i^k(T-1) + \\
& + C_h \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_{ii}^k(t) + C_h \cdot \sum_j \sum_k \sum_t \Delta x_{jj}^k(t) + \\
& + (C_h + 1) \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_j^k(t) + C_d \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_i^k(t) + \\
& + c_{lr} \cdot \left(\sum_m \sum_i \sum_t S_{mi} \cdot \left(y_{mi}(t) - \sum_k x_{mi}^k(t) \right) \right) \rightarrow \min.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Содержательный смысл слагаемых функционала:

$c_i \cdot \sum_t t \sum_j \sum_t z_j(t)$ – подсчет общей стоимости использования всех привлеченных составов. Для подсчета вычисляется общее число привлеченных составов из условного депо $z_j(t)$ и затем умножается на стоимость использования одного состава за расчетный такт времени t .

$M \cdot \sum_j \sum_t y_{ii}(t)$ – слагаемое учитывает нежелательные задержки по приему на станцию, «заставляет» состав быстрее переходить в сектор выхода. M – большая величина (для запрета нахождения состава в секторе входа).

$M_n \cdot \sum_j \sum_t \Delta x_i^k(T-1)$ – слагаемое учитывает введение большого штрафа за невыполнение заданных размеров движения. Если поезд не смог прибыть на станцию до конца расчетного периода T , то в функционал добавляется штраф M_n (большое число).

$C_h \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_{ii}^k(t)$ – общая стоимость задержки условной единицы пассажиропотока в секторе входа. За каждый такт задержки в функционал добавляется штраф C_h .

$C_h \cdot \sum_j \sum_k \sum_t \Delta x_{jj}^k(t)$ – общая стоимость задержки условной единицы пассажиропотока в секторе выхода. За каждый такт задержки в функционал добавляется штраф C_h .

$(C_h + 1) \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_j^k(t)$ – общая стоимость ожидания состава. При подсчете используется коэффициент $(C_h + 1)$. Коэффициент при $\Delta x_j^k(t)$ всегда на единицу больше, чем коэффициент задержки отправления условной единицы пассажиропотока $\Delta x_{jj}^k(t)$. Это сделано для того, чтобы состав как можно быстрее переходил в сектор выхода станции.

$C_d \cdot \sum_i \sum_k \sum_t \Delta x_i^k(t)$ – общая стоимость времени задержки условной единицы пассажиропотока. За каждый такт задержки в функционал добавляется штраф C_d .

$c_{lr} \cdot \left(\sum_m \sum_i \sum_t S_{mi} \cdot \left(y_{mi}(t) - \sum_k x_{mi}^k(t) \right) \right)$ – общая стоимость резервного пробега состава по участку. Выражение в скобках «подсчитывает» число проходов составов по участку без условной единицы пассажиропотока;

T – последний расчетный такт;

c_{lr} – стоимость составо-километра резервного пробега;

$t = 0, 1, 2, \dots, T$.

В рассматриваемом методе получила дальнейшее развитие идея соединения разных транспортных потоков на станции. Пассажиропоток задается как нитка графика с величиной струи потока, равной вместимости состава или вагона. По нитке графика движения должна следовать фиктивная единица потока x . Однако она может следовать только вместе с составом y . Это обеспечивается соответствующим ограничением (формула 2.6, рисунок 2.7):

$$\sum_k x_{mi}^k(t) \leq y_{mi}(t) \quad (2.9)$$

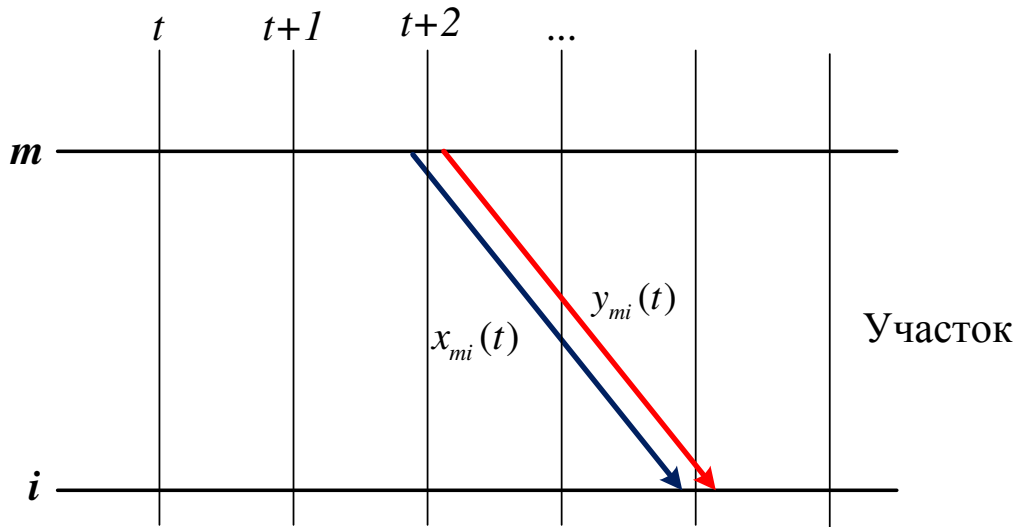


Рисунок 2.7 – Невозможность прохождения единицы потока без состава

Схема процесса движения единиц потока и составов показана на рисунке 2.8.

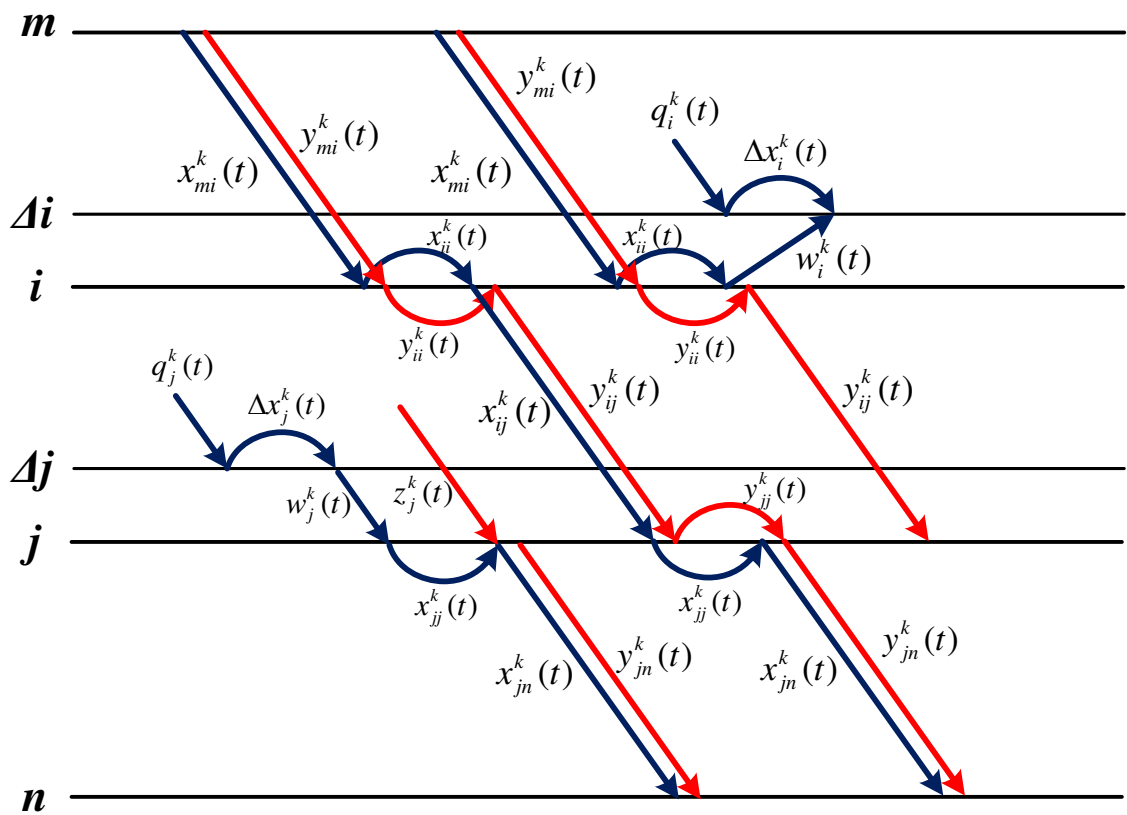


Рисунок 2.8 – Прохождение единиц потока и составов через станции и участки

На некотором участке $m-n$ имеется станция посадки и высадки пассажиров. Для формализации соединения разных потоков станция на расчетной сети представлена несколькими пунктами:

пункт « i » – подсистема прибытия, для отображения динамики числа фиктивных единиц потока k в секторе входа станции;

пункт « j » – подсистема отправления, для отображения динамики числа фиктивных единиц потока k в секторе выхода станции;

пункт « Δi » – задает динамику погашения пассажиропотока;

пункт « Δj » – задает динамику производства пассажиропотока.

Баланс потоков в секторе входа и выхода станции, динамика прохождения потоков по станции задаются соответствующими основными уравнениями. Пропускная способность участка, вместимость станции, величина резерва составов заданы дополнительными ограничениями.

Задача ставится следующим образом: обеспечить нитки графика движения составами пригородных поездов с наилучшим использованием самих составов. Критерием является минимум суммарных затрат, с учетом затрат на использование составов, на их резервные пробеги, а также потери от корректировки графика движения. Расчеты могут проводиться для определения количества составов при твердом расписании или для определения необходимой корректировки графика движения поездов при заданном количестве составов.

Представленная математическая модель задачи строгой оптимизации не учитывает зависимость составности поездов от пассажиропотока (используется только унифицированная составность). Таким образом, на основе использования рассмотренных методов невозможно реализовать обоснованное гибкое регулирование составности МВПС и построить график его оборота. Соответственно, требуется разработка такой методики, которая в комплексе учитывает все аспекты гибкого регулирования.

2.4 Содержательная постановка задачи по построению оптимального графика гибкого регулирования составности МВПС

Начало формулированию задачи по разработке графика гибкого регулирования было положено в работах [87–89], где авторами рассматривалась возможность организации модульного движения на полигонах Пермского региона Свердловской железной дороги.

В данных работах были формализованы две базовые концепции модульного движения: с разделением составов на зонных станциях с резким падением пассажиропотока и на узловых станциях, к которым примыкают участки с низким пассажиропотоком (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Возможные концепции модульного движения в Пермском регионе

На основе данных исследований были определены подходы к гибкому регулированию составности, представленные в работах [90–92]. Обосновано, что при низком пассажиропотоке важно обеспечить гибкое регулирование составности и разработать график оборота составов электропоездов для минимизации эксплуатационных расходов. Представлен проект модели разработки оптимального графика оборота составов электропоездов в самом

простом случае использования модульного движения. Установлено, что для разработки автоматизированной системы плана формирования пригородных электропоездов на базе АСУ Пригородной пассажирской компании (далее – АСУ ППК) необходима формализация ряда операций по назначению, увязке и изменению составности модульных и обычных составов.

Пусть железнодорожное направление представляет собой замкнутую систему, состоящую из трех участков и четырех железнодорожных станций (рисунок 2.10).

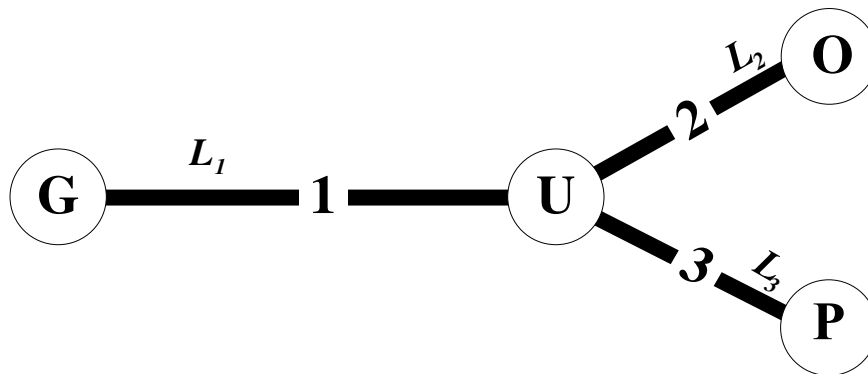


Рисунок 2.10 – Схема железнодорожного направления

На рисунке 2.10 буквами обозначены: *G* – головная станция; *U* – узловая (участковая) станция; *O*, *P* – станции оборота.

Участок 1 соединяет головную станцию *G* с узловой станцией *U*, к которой примыкают два участка (2 и 3), ограниченных с другой стороны станциями оборота.

Нам необходимо организовать оптимальным образом движение модульного МВПС для минимизации эксплуатационных расходов. В связи с требованиями гибкого регулирования составности МВПС движение может быть организовано по следующим схемам (рисунок 2.11):

- короткими одиночными составами (модулями);
- удлиненными модулями;

- сдвоенными (модульными) МВПС при одинаковой составности модулей;
- сдвоенными (модульными) МВПС при разной составности модулей.

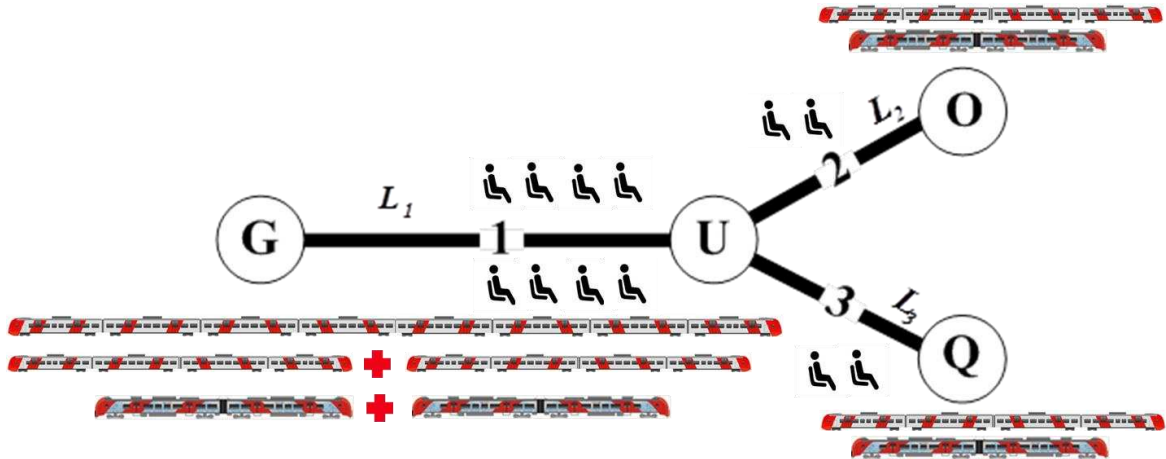


Рисунок 2.11 – Схемы формирования составов, предусмотренные в модели

Важной особенностью пригородных перевозок является неравномерность распределения пригородного пассажиропотока в пределах пригородного участка. По мере удаления от головной станция, как правило, густота пригородного пассажиропотока значительно уменьшается. На пригородных участках возможно применение зонного типа графика оборота подвижного состава, при котором составы обращаются в пределах заданных зон, например для графика, представленного на рисунке 2.12.

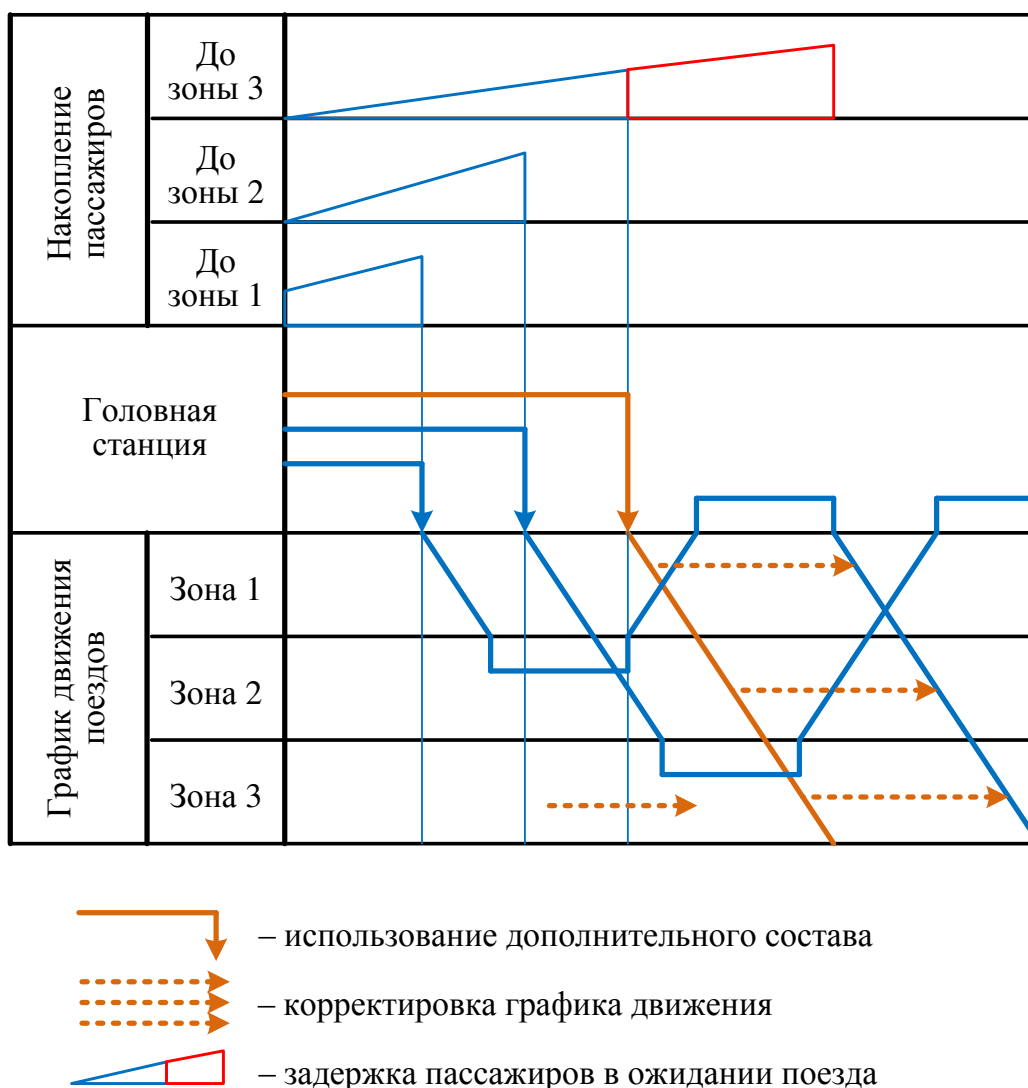


Рисунок 2.12 – Схемы формирования составов, предусмотренные в модели

Недостатками этого типа графика является завышение числа составов в обороте и необходимость дополнительного резервного пробега для засылки составов в депо для проведения технического обслуживания. Управленческой проблемой является выбор между привлечением дополнительных составов в оборот (дополнительные затраты) и необходимостью корректировки графика движения. Кроме того, перенос нитки графика увеличивает время ожидания пассажиров.

Гибкое регулирование осуществляется на основе «подстройки» под пассажиропоток, а точнее, под пиковую плотность пассажиропотока в конкретном поезде. В случае осуществления регулировки составности в зависимости от

пассажиропотока оборот составов, – это процесс, который не является статическим: он разворачивается во времени. Поэтому нам 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 дислокации 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.

2.5 Оптимизационная модель

Задачей исследования становится разработка функциональной оптимизационной модели на основе динамической транспортной задачи.

Программная реализация будет выполнена в системе оптимального управления оборотом поездных локомотивов «Лабиринт». Логика формализованного описания процесса прохождения станции единицей потока позаимствована из метода обеспечения ниток графика движения пригородных поездов составами. Метод разработан и опубликован [75] П.А. Козловым и Е.В. Копыловой. Программный комплекс прошел апробацию на направлении Урень – Нижний Новгород.

Обоснованное гибкое регулирование составности пригородных поездов должно проводиться с учетом величины пассажиропотока. Необходимость модернизации метода связана с формализацией механизма выбора типа электропоезда.

Сформулируем несколько идей.

Первая идея – необходимо ввести индивидуальные типы электропоездов. Обозначим, по аналогии с рисунками 2.7–2.8, станцию прохождения потоками индексом j , предшествующий станции участок обозначим m_j , следующий после станции участок – jn . Прибывшие с примыкающего участка m_j пригородные составы разных композиций типа V обозначим y_{mj}^V .

Размеры движения пригородных поездов x задаются в виде совокупности «ниток» по действующему графику. Число связанных «ниток» соответствует числу вариантов составности. Будем рассматривать составность в 2, 4 и 8 вагонов.

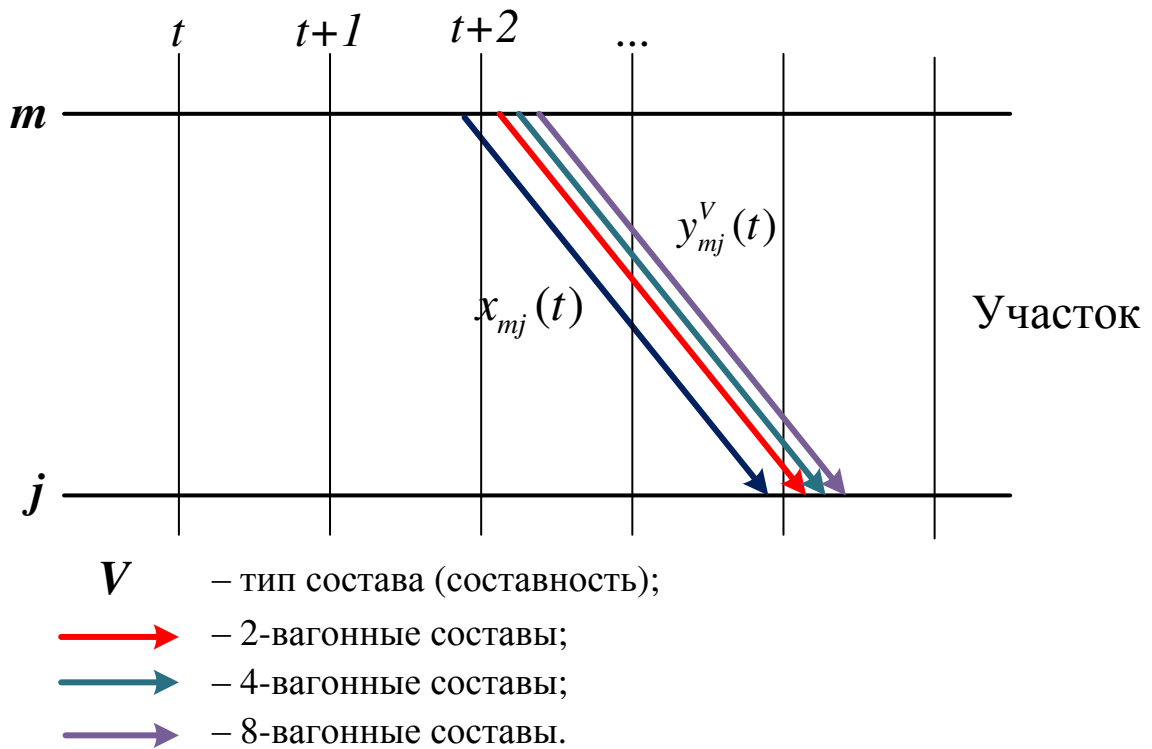


Рисунок 2.13 – Совокупность «нитек» по расписанию

Поскольку по графику может проследовать только один состав, необходимо ввести ограничение:

$$y_{mj}^2(t) + y_{mj}^4(t) + y_{mj}^8(t) = 1. \quad (2.10)$$

В базовом методе пассажиропоток задается как нитка графика. По нитке графика движения пригородных поездов следует фиктивная единица потока – потоковая точка. Содержательный смысл потоковой точки – это порция пассажиропотока, равная населенности состава пригородного поезда. Поэтому процессы ожидания и проезда пассажиров рассматриваются опосредованно, со значительными допущениями.

Вторая идея – связать потоковую точку с фактической величиной струи потока. Для этого зададим ритмы производства и погашения пассажиропотока $P_j(t)$. Запрет на перемещение пассажиропотока по участку без состава реализуем за счет дополнительных ограничений.

Составы с различной композицией имеют разную вместимость N_y^V .

В пригородном сообщении (в отличие от дальнего следования) вместимость подвижного состава может быть рассчитана двумя способами: с учетом проезда пассажиров стоя и с использованием только мест для сидения. Так, в десятивагонном электропоезде ЭД4М количество мест для сидения составляет 1088, а вместимость с учетом проезда пассажиров стоя (при норме заполнения площади 7 пасс./м²) составляет 3226 пассажиров. В отдельных субъектах РФ при формировании транспортного заказа и планировании составности учитывается нежелательность проезда пассажиров стоя в течение длительного периода времени (не больше 20–30 минут).

В зависимости от занятия пассажирами мест для сидения, в работе [1] С.М. Резером была предложена система оценок, которая позволяет подразделить населенность пригородных поездов на высокую, допустимую, умеренную и критическую. К критической (высокой) населенности относится ситуация, при которой количество пассажиров в вагоне превышает число мест для сидения. Допустимая населенность означает, что число занятых сидячих мест составляет не менее 90 процентов, нормальная – от 67 до 90 процентов. Нижняя граница умеренной населенности проходит на уровне 1/6 занятых сидячих мест, а критической (низкой) следует считать населенность ниже 16 пасс./ваг.

С учетом специфики пригородных перевозок, требований пассажиров к условиям проезда в поездах и, как следствие, условий договора перевозчика с субъектом РФ и на основании вышеприведенной системы оценок, в дальнейшем примем вместимость пригородного подвижного состава N_y^V , равной количеству посадочных мест.

Основные уравнения.

Баланс пассажиров (рисунок 2.13):

$$p_{jj}(t) = p_{jj}(t-1) + \sum_m p_{mj}(t-t_{mj}) - \sum_n p_{jn}(t) + P_j(t), \quad (2.11)$$

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 .

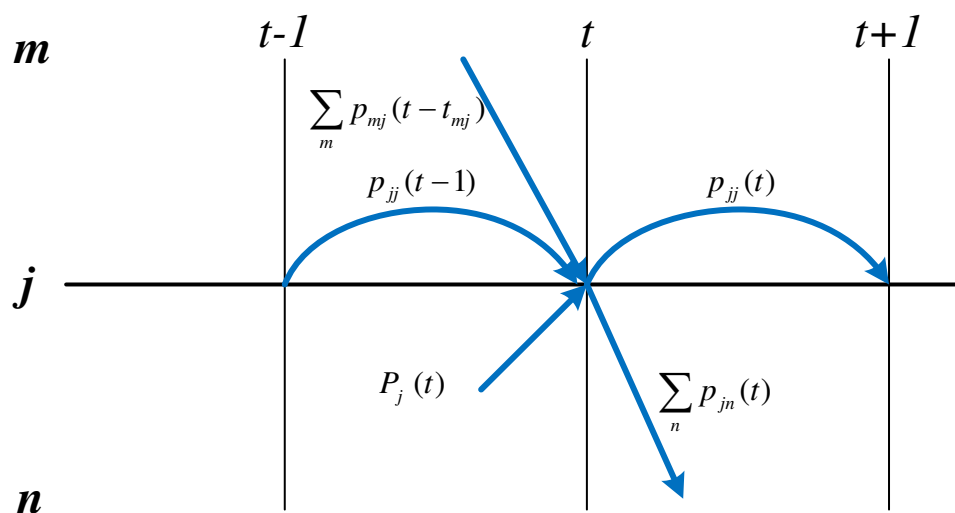


Рисунок 2.14 – Баланс пассажиров

Баланс пригородных составов (рисунок 2.15):

$$y_{jj}^V(t) = y_{jj}^V(t-1) + \sum_m y_{mj}^V(t-t_{mj}) + \sum_n y_{jn}^V(t) + Y_j^V(t), \quad (2.12)$$

где $y_{jj}^V(t-1)$ – количество составов типа V , ожидающих отправления со станции с предыдущего такта;

$\sum_m y_{mj}^V(t-t_{mj})$ – количество составов типа V , отправленных в момент времени $(t-t_{mj})$ на станцию j со всех станций m ;

$\sum_n y_{jn}^V(t)$ – количество составов типа V , отправляющиеся со станции j в момент времени t на все станции n ;

$Y_j^V(t)$ – количество составов типа V , переданных из депо в момент времени t (только для станций с депо).

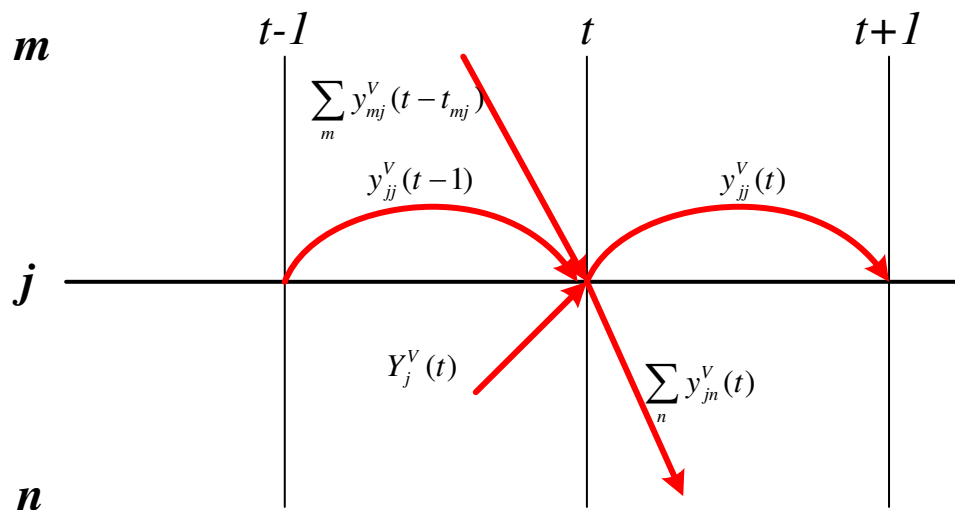


Рисунок 2.15 – Баланс пригородных составов

Баланс ниток графика (размеров движения поездов) (рисунок 2.16):

$$x_{jj}(t) = x_{jj}(t-1) + \sum_m x_{mj}(t-t_{mj}) - \sum_n x_{jn}(t) + s_{qjj}(t), \quad (2.13)$$

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

$\sum_m x_{mj}(t - t_{mj})$ – количество ниток отправлением в момент времени $(t - t_{mj})$

на станцию j со всех станций m ;

$\sum_n x_{jn}(t)$ – количество ниток отправлением в момент времени t со станции j

на все станции n ;

$s_{qij}(t)$ – перевод точки отправления в нитки графика.

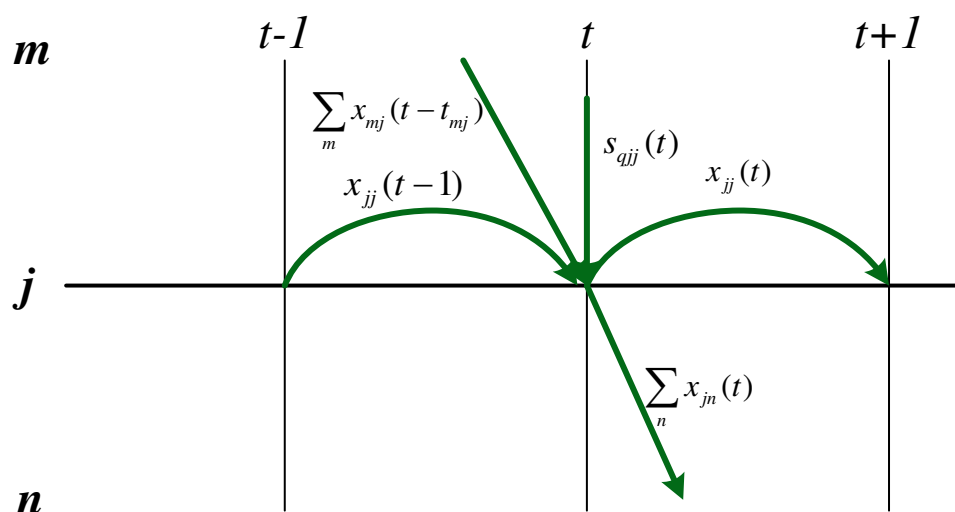


Рисунок 2.16 – Баланс ниток графика

Динамика потоков пассажиров и ниток графика по промежуточным станциям приведена на рисунке 2.17.

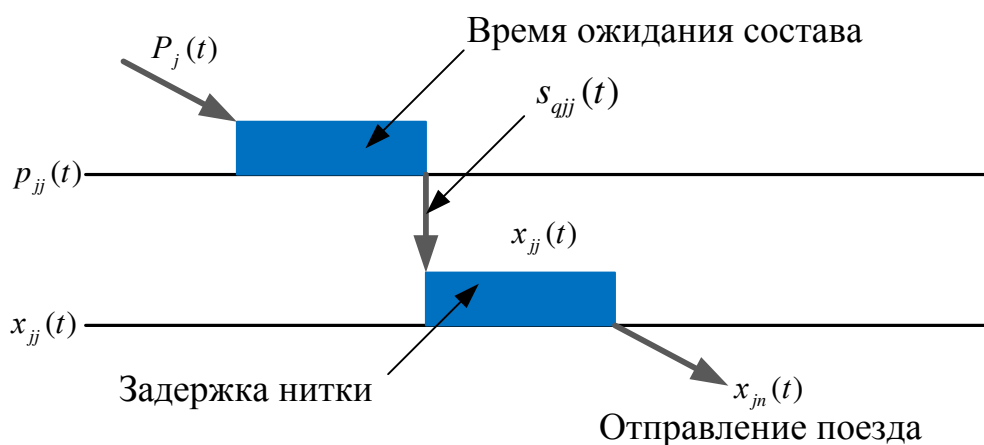


Рисунок 2.17 – Динамика потоков на промежуточной станции

Баланс точек отправления по начальным станциям маршрута (рисунок 2.18):

$$s_{jj}(t) = s_{jj}(t-1) - w_{jj}(t) + w_{jj}(t+1) - s_{qjj}(t) + S_j(t), \quad (2.14)$$

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 .

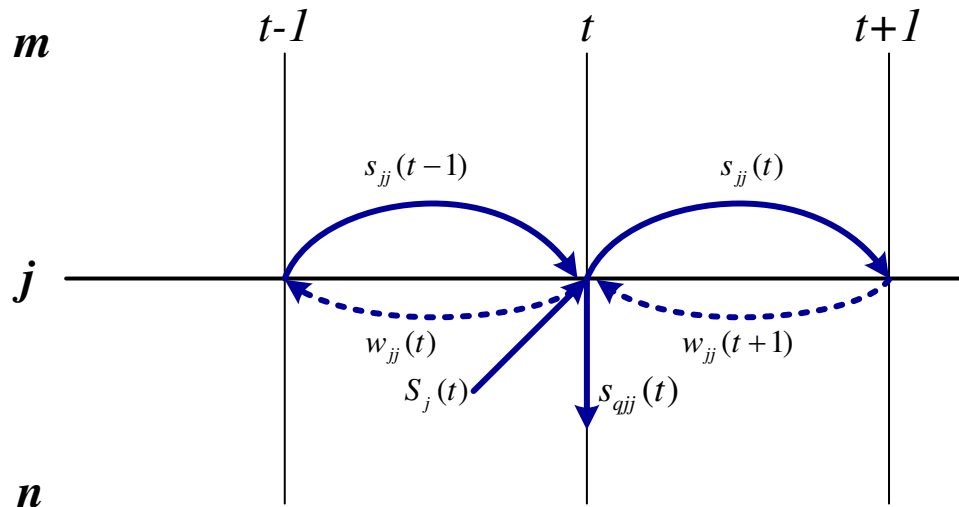


Рисунок 2.18 – Баланс точек отправления по начальным станциям маршрута

Динамика потоков на начальных станциях приведена на рисунке 2.19.

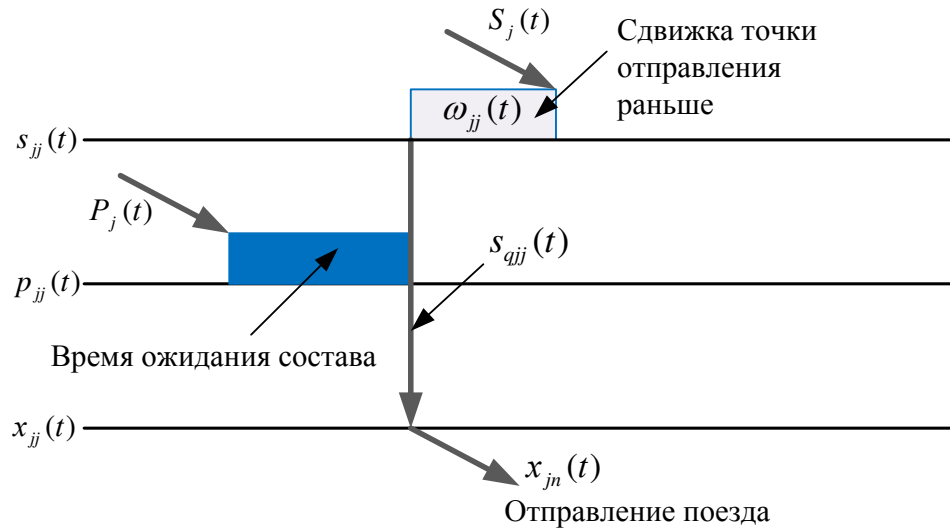


Рисунок 2.19 – Динамика потоков на начальных станциях

Основные ограничения

В каждый такт может быть инициирована только одна нитка:

$$x_{jn}(t) = 1. \quad (2.15)$$

Количество отправленных составов на перегон не должно превышать количества ниток:

$$\sum_V y_{jn}^V(t) = x_{jn}(t). \quad (2.16)$$

Количество пассажиров не должно превышать вместимость составов:

$$\sum_V (y_{jn}^V(t) \cdot N_y^V) \geq p_{jn}(t), \quad (2.17)$$

где N_y^V – пассажировместимость состава МВПС типа V .

В базовом методе критерий минимизации учитывает затраты на использование составов и потери от корректировки графика движения. Затраты,

связанные с пассажиро-часами, оцениваются как общая стоимость задержки потоковых точек. За каждый такт задержки в функционал добавляется штраф. Модернизация метода позволяет ввести в функционал слагаемое для отражения затрат пассажиро-часов и штраф за невыполнение заданного плана перевозок.

В задаче требуется найти такие значения переменных u разных композиций типа V , чтобы эксплуатационные расходы, потери от корректировки графика движения, а также затраты пассажиро-часов ожидания в стоимостном выражении были минимальными. Затраты пассажиро-часов ожидания могут возникнуть при простое в подсистеме посадки, отправления либо при сдвиге нитки графика. Значения всех переменных Y представляют собой не что иное, как план формирования МВПС, который задает график гибкого регулирования составности.

Критерий минимизации:

$$\sum_t \sum_j (p_{jj}(t) \cdot C_{pjj} + s_{jj}(t) \cdot C_{sjj} + w_{jj}(t) \cdot C_{wj} + \sum_V (Y_j^V(t) \cdot C_y^V)) + \sum_j p_{jj}(T) \cdot C_{pjjT} \rightarrow \min, \quad (2.18)$$

где C_{pjj} – стоимость ожидания пассажиром посадки в электричку по станции j ;

C_{sjj} – 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. Предложенные идеи модернизации метода необходимо проверить экспериментально.

Выводы по главе 2

1. По итогам анализа существующих методик установлено, что они не в полной мере отвечают целям гибкого регулирования составности в пригородном сообщении. Для оптимизации транспортных процессов необходим адекватный аппарат – динамическая транспортная задача. Задачей исследования становится разработка функциональной оптимизационной модели.

2. Размножение транспортной сети во времени создает большую размерность. Поэтому целесообразно использовать существующие автоматизированные компьютерные программы.

3. В качестве аппарата оптимизации выбрана динамическая транспортная задача с задержками. Программная реализация будет выполняться в системе оптимального управления оборотом поездных локомотивов «Лабиринт». Для целей исследования потребуется модернизация метода обеспечения ниток графика движения пригородных поездов составами.

4. Модернизация метода связана с формализацией механизма выбора типа электропоезда. Предложен способ использования индивидуальных типов пригородных поездов. Выбор типа состава обеспечивается введенными ограничениями в задачу. Нитки графика движения связываются с величиной корреспонденций пассажиропотоков. Скорректирован функционал задачи. Полученную в результате модернизации оптимизационную модель необходимо проверить экспериментально.

ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ГРАФИКА ОБОРОТА ПРИГОРОДНЫХ СОСТАВОВ

3.1 Технологическая модель

Апробация функциональной модели была проведена для реального железнодорожного направления Свердловской железной дороги. Выбрано направление на полигоне работы АО «Пермская пригородная компания» Верещагино – Пермь-2. Схема направления приведена на рисунке 3.1.

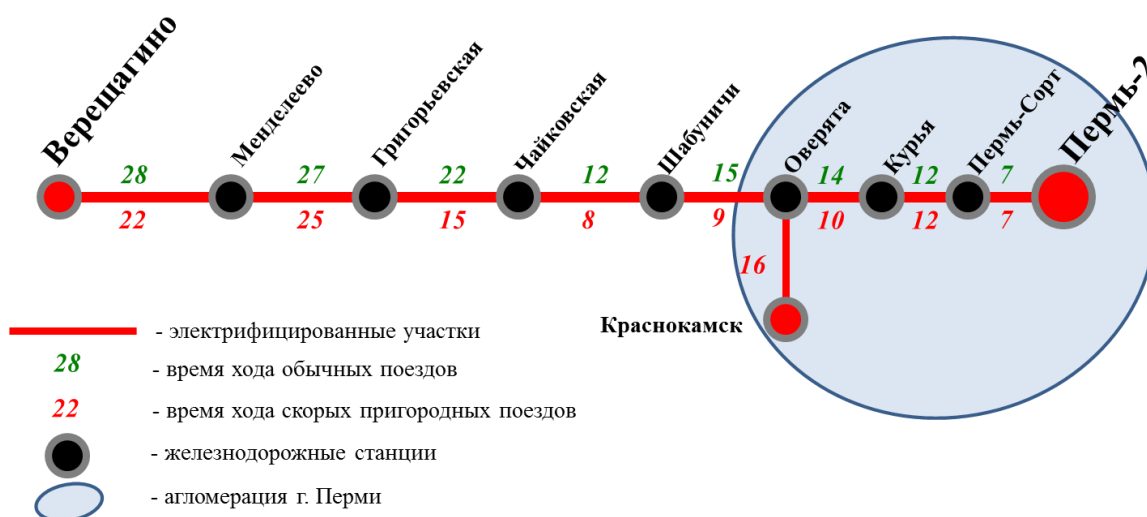
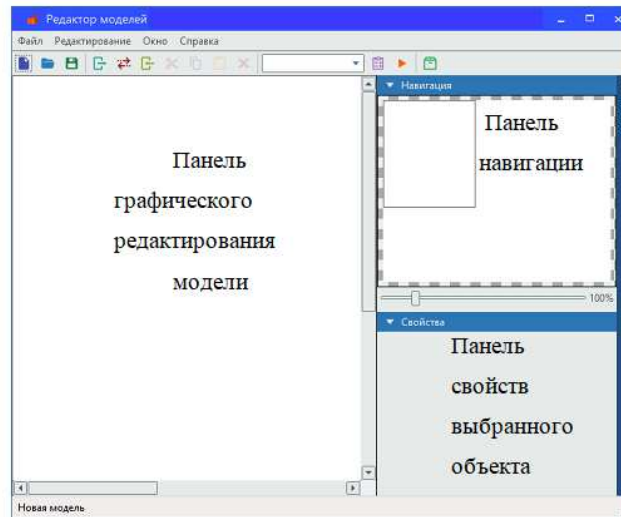


Рисунок 3.1 – Схема рассматриваемого направления

Размножение транспортной сети во времени создает большую размерность. Организация обращения поездов с регулируемым количеством вагонов значительно увеличивает размерность модели. Наложение на сеть различных по величине пассажиропотоков из разных пунктов также влияет на размерность. Поэтому для проверки работоспособности задание параметров модели выполнено в системе оптимального управления оборотом с некоторым упрощением

возможностей программного аппарата «Лабиринт». Для настройки технологической модели использовался редактор создания моделей (рисунок 3.2).



Условные обозначения:









-  – кнопка создания новой модели;
-  – кнопка открытия созданных моделей в каталоге;
-  – кнопка сохранения текущей модели;
-  – кнопки задания станции и участков
-  – кнопки редактирования (вырезать, копировать, вставить и удалить выбранный объект);
-  – выпадающий список выбора настроек экспериментов и кнопка окна настроек экспериментов;
-  – кнопка запуска расчета;
-  – кнопка задания пассажиропотоков.

Рисунок 3.2 – Окно редактора моделей

Панель графического редактирования модели предназначена для задания расчетного направления из набора станций и перегонов. Пользователь создает конфигурацию пригородного участка, расставляя генерируемые системой условные значки станций. Характеристики станции задаются на панели свойств объекта (рисунок 3.3).

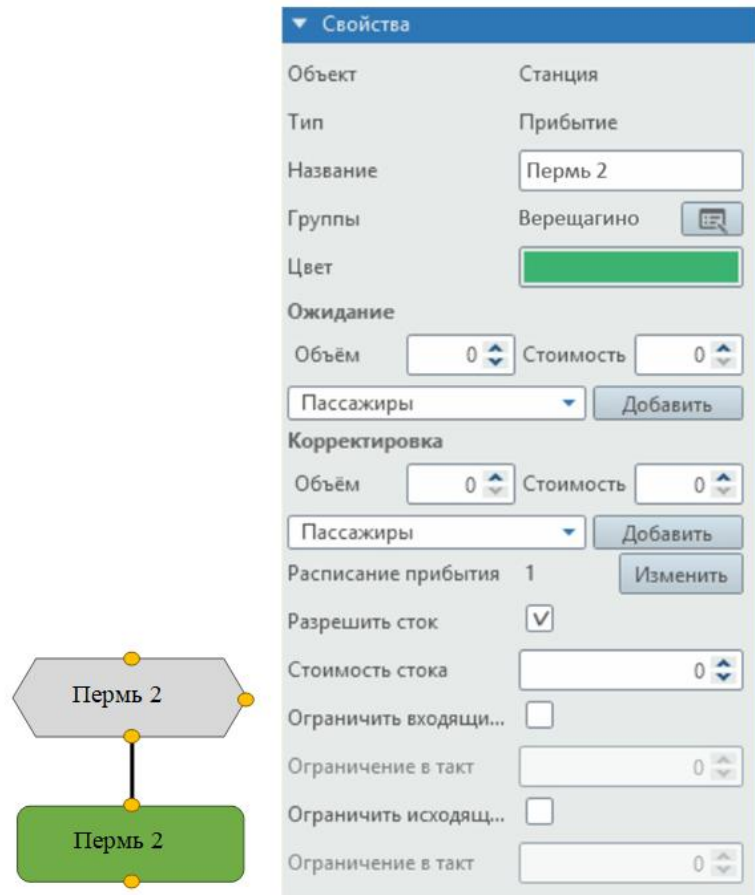


Рисунок 3.3 – Окно формирования данных о станции

В окне формирования данных указываются название и тип станции (отправление, транзит, прибытие). Параметр «ожидание» отвечает за процесс накопления пассажиров. Пользователь может задать максимальный объем накопления и стоимость ожидания пассажиром посадки за такт расчета. Далее задается расписание прибытия и отправления. Пользователь должен задать желаемое или действующее расписание проследования поездов. Для того чтобы задать расписание, нужно воспользоваться кнопкой «Изменить».

Фактическое расписание проследования поездов рассчитает модель. В результате точки отправления могут быть смещены по оси времени. Корректировка графика может быть запрещена по условию эксперимента. В случае допустимости корректировки пользователь должен задать стоимость смещения точки отправления на такт расчета.

С помощью параметра «Разрешить сток» производится регулирование запрета стока по каждой конкретной станции. Если сток разрешается, то допускаются неосвоенные пассажиропотоки: часть пассажиров может остаться на станциях отправления (при прибытии перенаселенных поездов). В содержательном смысле сток учитывает пассажиров, которые остались на платформах на конец расчета. Стоимость стока – это стоимость отказа в перевозке пассажира по станции. Чтобы модель применяла сток в крайних случаях, устанавливается большое значение стоимости стока. При запрете стока задача моделирования может не иметь решений.

Программный аппарат допускает наличие ограничений по пассажиропотокам. Это необходимо для моделирования производительности обработки пассажиропотока на станции (например, наличие турникетных комплексов). Движение пригородных поездов может быть организовано не на одном участке, а на нескольких участках сложной конфигурации, а также в транспортном узле (городские агломерации). В этих случаях допускается формировать станции по направлениям, примыкающим к головной (по группам). В окне редактирования групп возможно добавление и удаление групп (рисунок 3.4). Результаты моделирования возможно предоставить отдельно по группам.

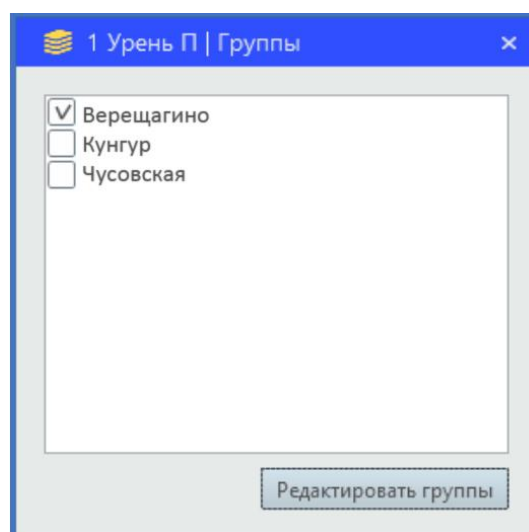


Рисунок 3.4 – Окно редактирования групп

Отображение перегонов начинается с создания соединений в графическом редакторе (рисунок 3.5).

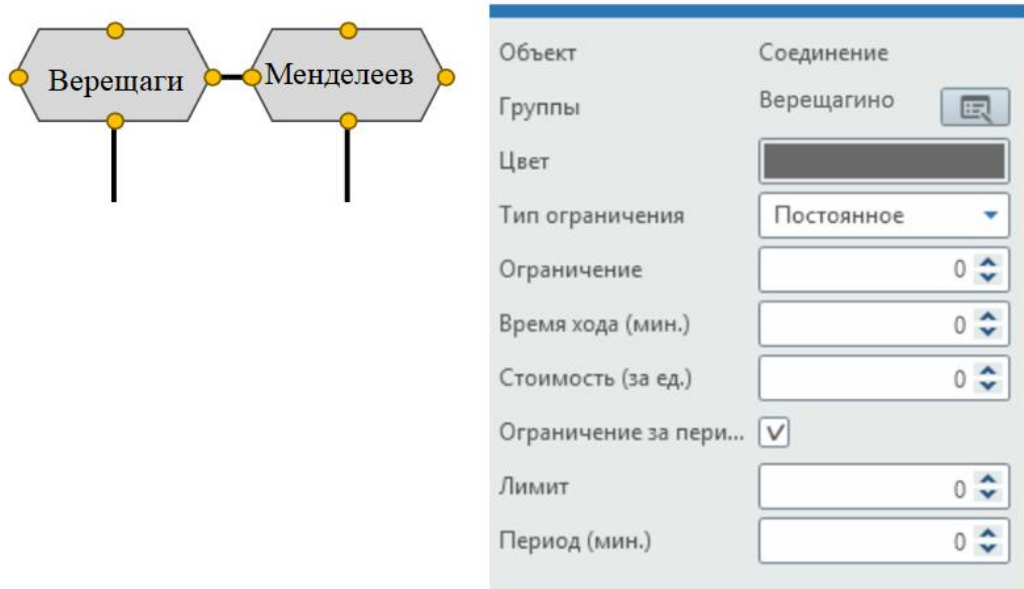


Рисунок 3.5 – Окно формирования данных о перегонах

Активизация соединения открывает окно задания свойств перегона. Пользователь может смоделировать параметры перевозки пассажиров пригородными поездами. Панель навигации помогает ориентироваться, в случае если модель не умещается на экране графического редактирования.

Следующим шагом создания модели будет задание настроек эксперимента (рисунок 3.6).

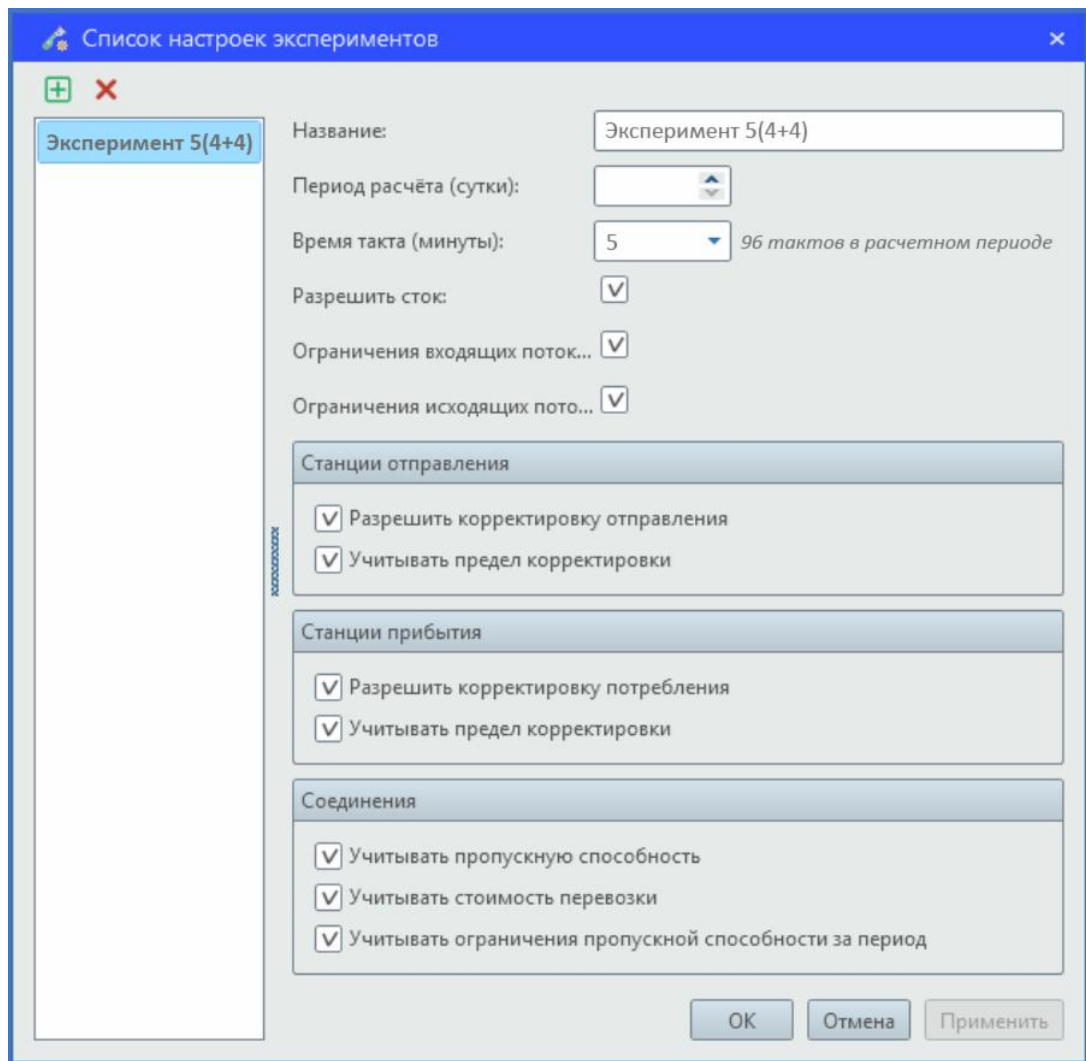


Рисунок 3.6 – Окно настроек эксперимента

В окне «Название» можно задать отличительный признак эксперимента. В данном случае название «Эксперимент 5(4+4)».

В окне «Период расчета» задается модельное время (период расчета). Модельное время по умолчанию составляет одни сутки. Время такта устанавливается в минутах и задает продолжительность одного такта моделирования.

Тумблеры настроек разрешают или запрещают использование параметров, заданных в свойствах станций и перегонов.

После ввода исходных данных обо всех станциях и перегонах полигона пригородного движения настраивается технологическая расчетная модель. Она выдает график движения пригородных поездов, динамику ожидания пассажиров

на каждой станции, необходимые стоимостные параметры, а также корректировку ритмов отправления.

3.2 Планирование экспериментов

Основной проблемой экспериментальных расчетов является большая размерность задачи. Введение в модернизируемый базовый метод возможности выбора составов разной величины кратно увеличивает количество балансовых уравнений. При программной реализации математической модели для каждого типа составов формируются аналогичные уравнения. Размерность задачи фактически кратно увеличивается в зависимости от количества вариантов составности. Кроме того, модель усложняют параллельные потоки пассажиров. Расчеты проводятся на имеющихся в университете вычислительных мощностях. Поэтому для экспериментальной проверки реализуемости нового метода необходимо упростить технологическую модель.

Расчеты проводятся только для одного направления. Возможность реализации увязки составов с разных направлений в железнодорожном узле выходит за рамки исследования. Эксперименты для узла возможно проводить с использованием более производительного программного обеспечения. Период расчета сокращен до 8 часов. Моделируется интервал утреннего часа пик. Такт расчета увеличивается до 5 минут.

Количество вариантов композиций составов минимизируется. Для расчетов будут использоваться базовые четырехвагонные составы с возможностью объединения и обращения сдвоенных восьмивагонных составов. Ограничения по перерабатывающей способности станций в экспериментах учитываться не будут.

Для минимизации целевой функции необходимо определиться со всеми стоимостными параметрами c . В экспериментах весовые коэффициенты

определены в условных единицах, опираясь на структуру затрат железнодорожного транспорта.

Проверка работоспособности модели и достаточности вычислительных мощностей проводится в следующей логике:

- на расчетном пригородном участке задаются пассажиропотоки только в сторону головной станции (направление «туда»), вводится запрет на корректировку действующего графика движения пригородных поездов;

- задается количество сдвоенных составов для обеспечения графика движения и запускается расчет;

- на основе анализа результатов для дальнейшего рассмотрения отбираются варианты с разным количеством составов. За условный «базовый» вариант принимается график, в котором план перевозок еще не выполняется. Завершающим серию расчетов будем считать вариант, в котором добавление сдвоенного состава не приводит к сокращению времени ожидания пассажирами поездов;

- в случае успешного проведения расчетов, задача усложняется. Допускается корректировка графика и проводится вторая серия расчетов для аналогичных условий;

- затем добавляются потоки от головной станции (направление «обратно») и производятся расчеты следующих серий;

- анализируются результаты (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – План проведения экспериментальных расчетов

3.3 Экспериментальные расчеты первой серии

В периоды часов пик пассажиропоток, как правило, тяготеет к одному направлению, обратное при этом на порядок меньше. Поэтому стоит акцентировать внимание на основное направление и рассматривать варианты решения по его обеспечению. В поставленной задаче на этапе разработки был выбран утренний час пик и одно направление (рисунок 3.8), что легло в основу генератора формул и выдачи результатов.

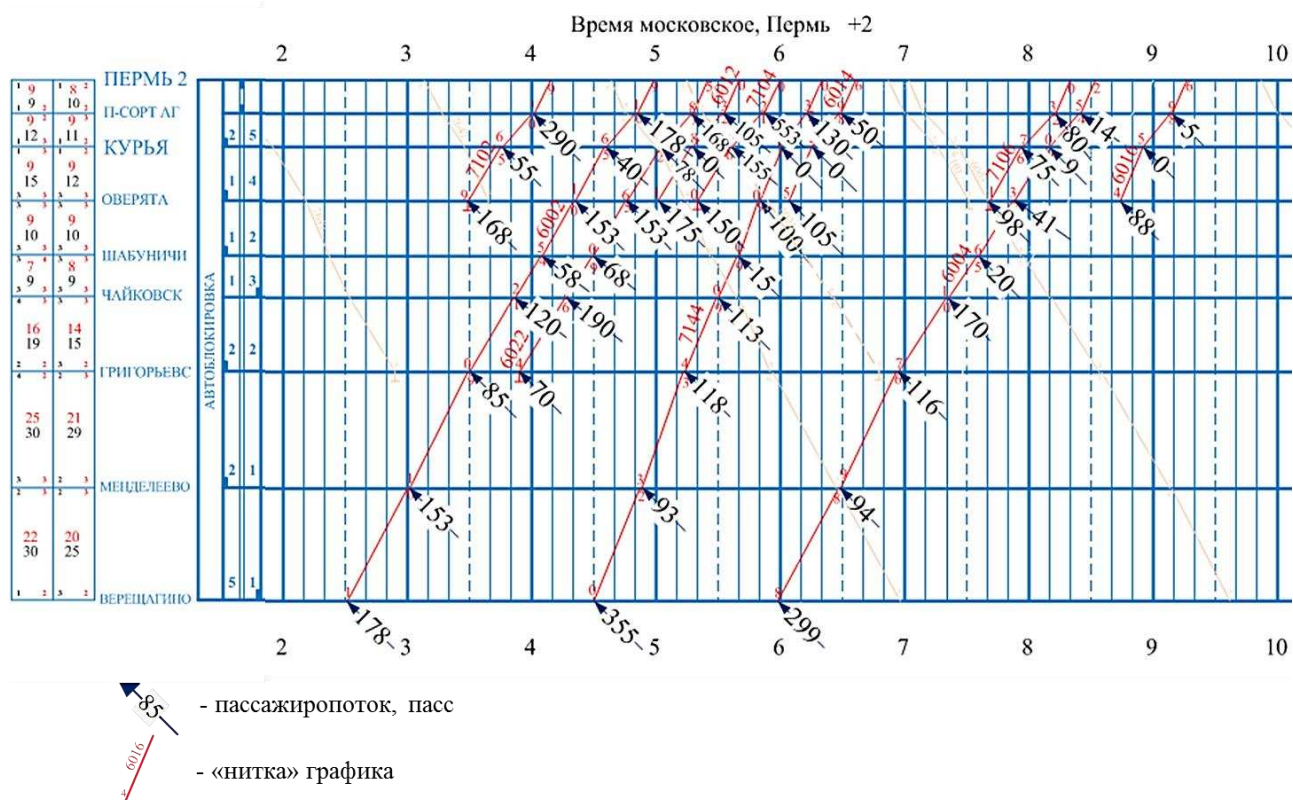


Рисунок 3.8 – Расчетная схема пассажиропотоков направления

Первый эксперимент – это вариант обращения 5 двоянных составов из десяти наличных (условное название варианта – 5(4+4)): три «дальних» двоянных состава и два в пределах агломерации. Данная схема не обеспечивает перевозку всего заданного пассажиропотока: на конец расчетного периода на платформах остается 116 пассажиров, так как первым экспериментом предусмотрено, что пассажироместимость составов меньше потребной. Таким образом, подтверждается адекватность модели.

В модели наибольшие отказы в посадке пассажиров и ожидание ими поездов формируются на ближайших к головной станциях (Оверята, Курья, Пермь-Сортировочная). Среднее время ожидания пассажирами поезда составило 31,11 мин. В реальности пассажиры, пришедшие на платформу к одному из поездов, не ожидают следующего поезда, а совершают поездку без предоставления посадочного места, что не соответствует требованиям к комфортности проезда пассажиров в регионе.

График исполненной работы (далее – ГИР) по варианту обращения пяти сдвоенных составов в одном направлении приведен на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – ГИР по варианту 5(4+4)

Во втором эксперименте количество сдвоенных составов увеличилось с 5 до 6 (условное название варианта – 6(4+4)): четыре «дальних» сдвоенных состава и два в пределах агломерации. Данная схема обеспечивает перевозку всего заданного пассажиропотока, так как суммарная пассажировместимость составов превышает потребную. Устранено продолжительное время ожидания пассажирами посадки в поезд по станции Верещагино (28 пассажиров, более двух

часов ожидания). Значительные объемы пассажиро-часов ожидания по-прежнему формируются на станциях, входящих в Пермскую городскую агломерацию. Среднее время ожидания пассажирами поезда сократилось до 21,21 мин.

График исполненной работы по варианту обращения шести сдвоенных составов в одном направлении приведен на рисунке 3.10.

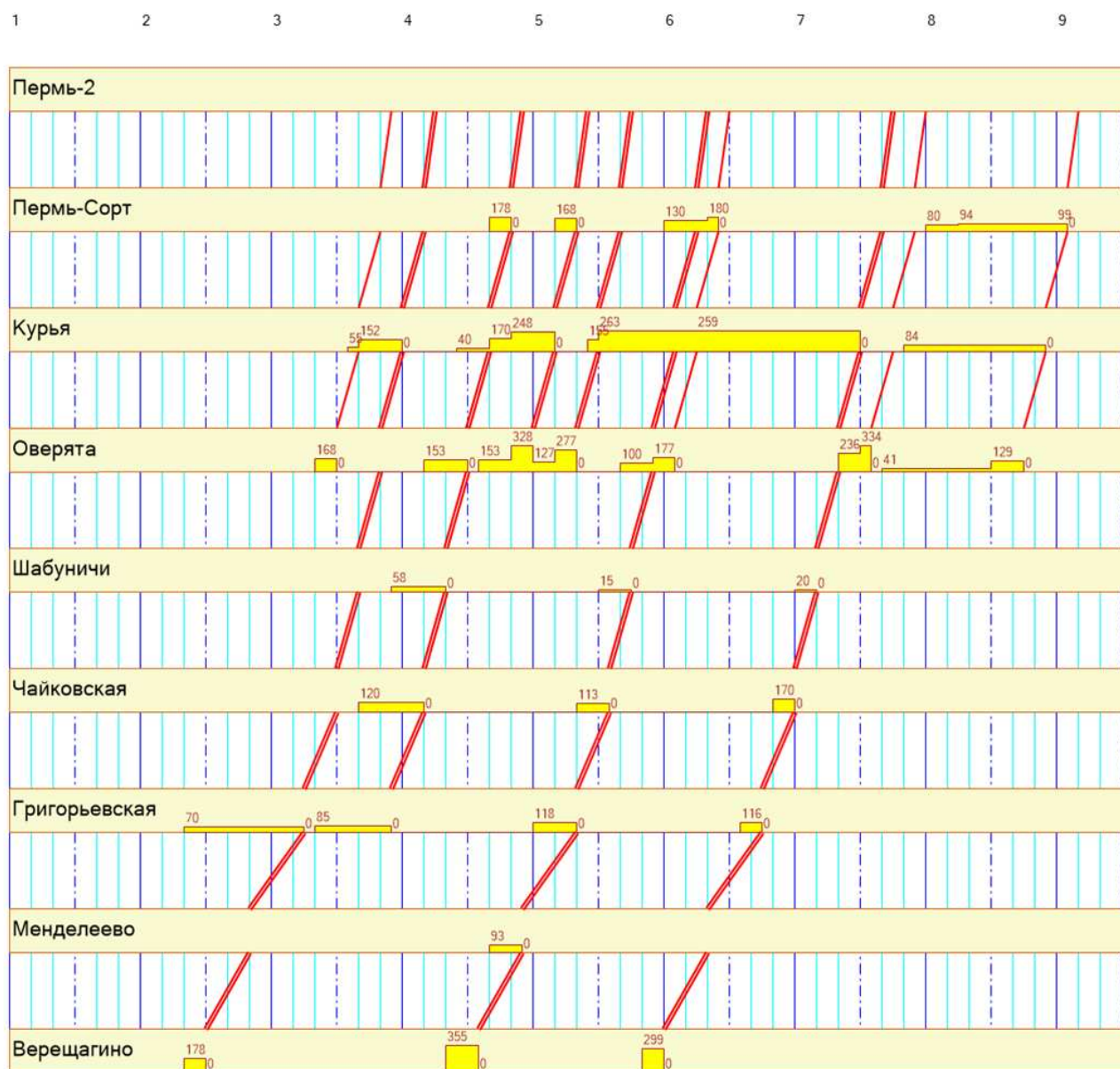


Рисунок 3.10 – ГИР по варианту 6(4+4)

В третьем эксперименте количество сдвоенных составов увеличилось с 6 до 7 (условное название варианта – 7(4+4)): четыре «дальних» сдвоенных состава и три в пределах агломерации. Данная схема также обеспечивает перевозку всего

заданного пассажиропотока. Задержки пассажиров в связи с невозможностью их посадки в поезд значительно сократились по станции Курья. Среднее время ожидания пассажирами поезда сократилось до 17,06 мин.

График исполненной работы по варианту обращения семи сдвоенных составов в одном направлении приведен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – ГИР по варианту 7(4+4)

В четвертом эксперименте первой серии количество сдвоенных составов увеличилось с 7 до 8 (условное название варианта – 8(4+4)): четыре «дальних»

сдвоенных состава и четыре в пределах агломерации. Осваивается весь объем пассажиропотока, а самые существенные задержки отправления пассажиров формируются на станциях, входящих в Пермскую агломерацию. Среднее время ожидания пассажирами поезда сократилось до 16,51 мин.

График исполненной работы по варианту обращения восьми сдвоенных составов в одном направлении приведен на рисунке 3.12.

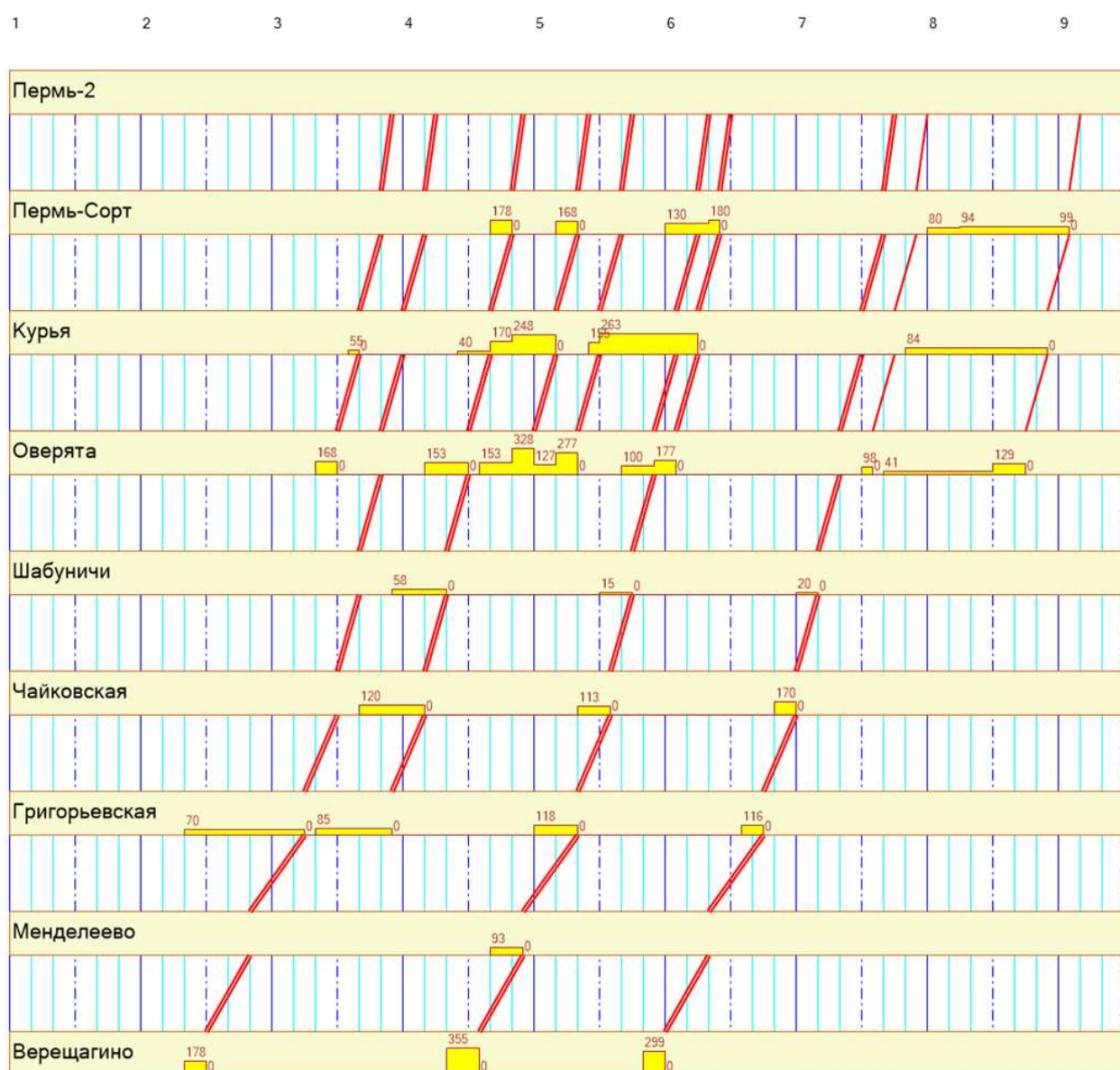


Рисунок 3.12 – ГИР по варианту 8(4+4)

Увеличение количества сдвоенных поездов более восьми не приводит к уменьшению среднего ожидания поезда пассажиром. Сравнительная диаграмма

среднего времени ожидания пассажирами отправления приведена на рисунке 3.13 и в таблице 3.1.

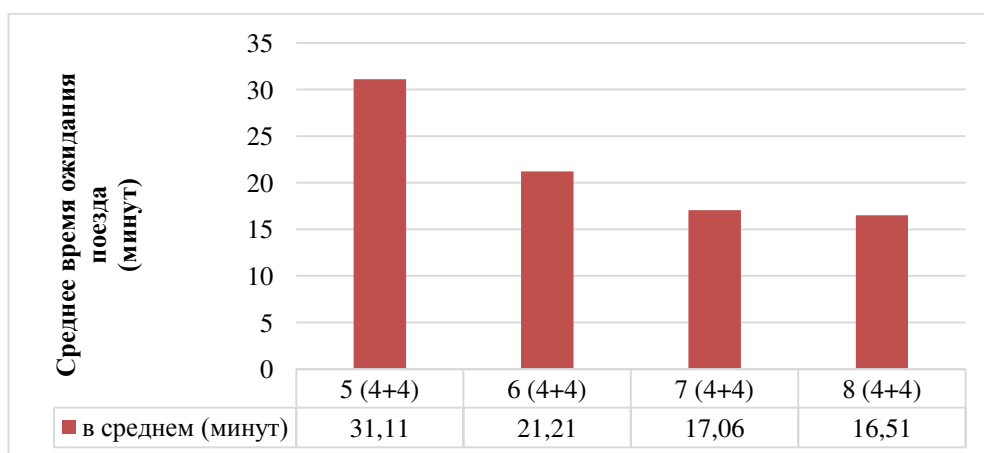


Рисунок 3.13 – Среднее время ожидания поезда пассажиром по вариантам с фиксированным расписанием

Таблица 3.1 – Среднее время ожидания поезда в разрезе вариантов и станций

Вариант	Среднее время ожидания отправления, мин	Станция						
		Менделеево	Григорьевская	Чайковская	Шабуничи	Оверята	Курья	Пермь-Сорт.
5(4+4)	31,11	4,1	31,53	11,8	11,65	30,89	189,05	12,72
6(4+4)	21,21	4,1	26,59	11,8	11,65	20,83	116,67	8,19
7(4+4)	17,06	4,1	26,59	11,8	11,65	17,95	69,53	8,19
8(4+4)	16,51	4,1	26,59	11,8	11,65	17,95	62,15	8,19

По итогам расчетов можно сделать следующие выводы:

- установлена работоспособность модели с учетом курсирования двойных поездов;
- модель работает корректно в условиях нехватки вместимости подвижного состава (вариант 5(4+4));

- при увеличении количества сдвоенных поездов ожидание пассажирами отправления со станций сокращаются, однако по станции Курья остаются значительными;
- при вводе более восьми сдвоенных поездов задержки отправления пассажиров не уменьшаются;
- для дальнейших исследований необходимо провести эксперименты с возможностью сдвижки ниток графика.

3.4 Экспериментальные расчеты второй серии

Во второй серии экспериментов реализуется возможность сдвижки ниток графика. Эксперименты на модели будем производить по аналогичным вариантам с увеличением количества сдвоенных поездов, начиная с пяти.

Первый эксперимент – это вариант обращения 5 сдвоенных составов из десяти наличных (условное название варианта – 5''(4+4)): четыре «дальних» сдвоенных состава и один в пределах агломерации. Данная схема не обеспечивает перевозку всего заданного пассажиропотока: на конец расчетного периода на платформах остается 116 пассажиров аналогично первому варианту первой серии экспериментов.

Выполнены сдвижки ниток графика второго поезда (далее порядковые номера поездов соответствуют последовательности их прибытия на головную станцию) – позже на 10 минут; четвертого поезда – позже на 10 минут; пятого поезда – раньше на 10 минут; шестого поезда – раньше на 15 минут; седьмого поезда – раньше на 45 минут; девятого поезда – раньше на 1 час 40 минут; десятого поезда – раньше на 1 час 5 минут.

В модели наибольшие отказы в посадке пассажиров и ожидание ими поездов формируется на станции Пермь-Сортировочная. За счет применения более равномерного движения поездов в городской агломерации удалось

добиться значительного сокращения среднего времени ожидания пассажирами поезда, которое составило 10,71 мин.

График исполненной работы по варианту обращения пяти сдвоенных составов в одном направлении с корректировкой расписания приведен на рисунке 3.14.

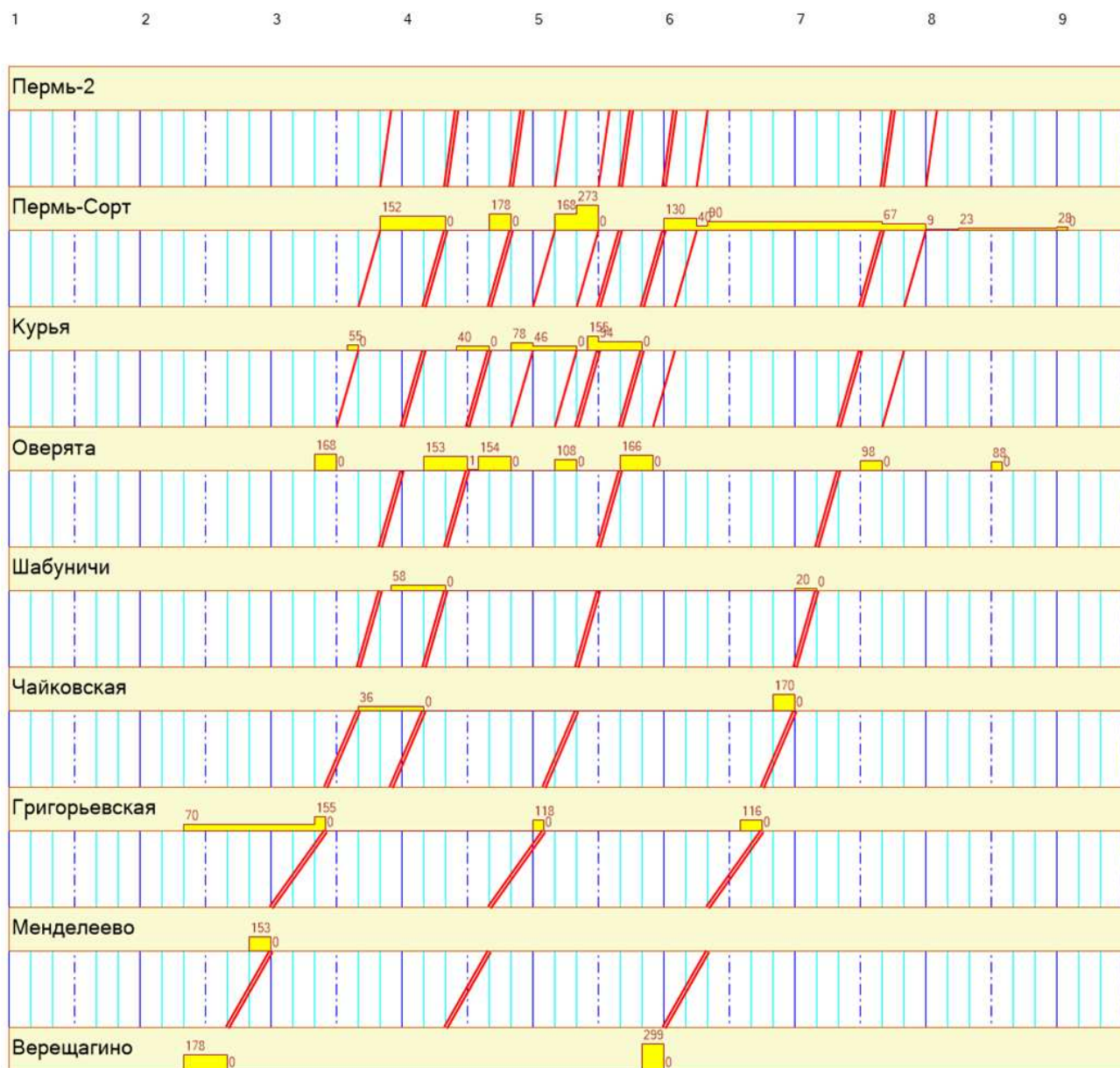


Рисунок 3.14 – ГИР по варианту 5''(4+4)

Сравнительная диаграмма среднего времени ожидания пассажирами отправления поезда приведена на рисунке 3.15.

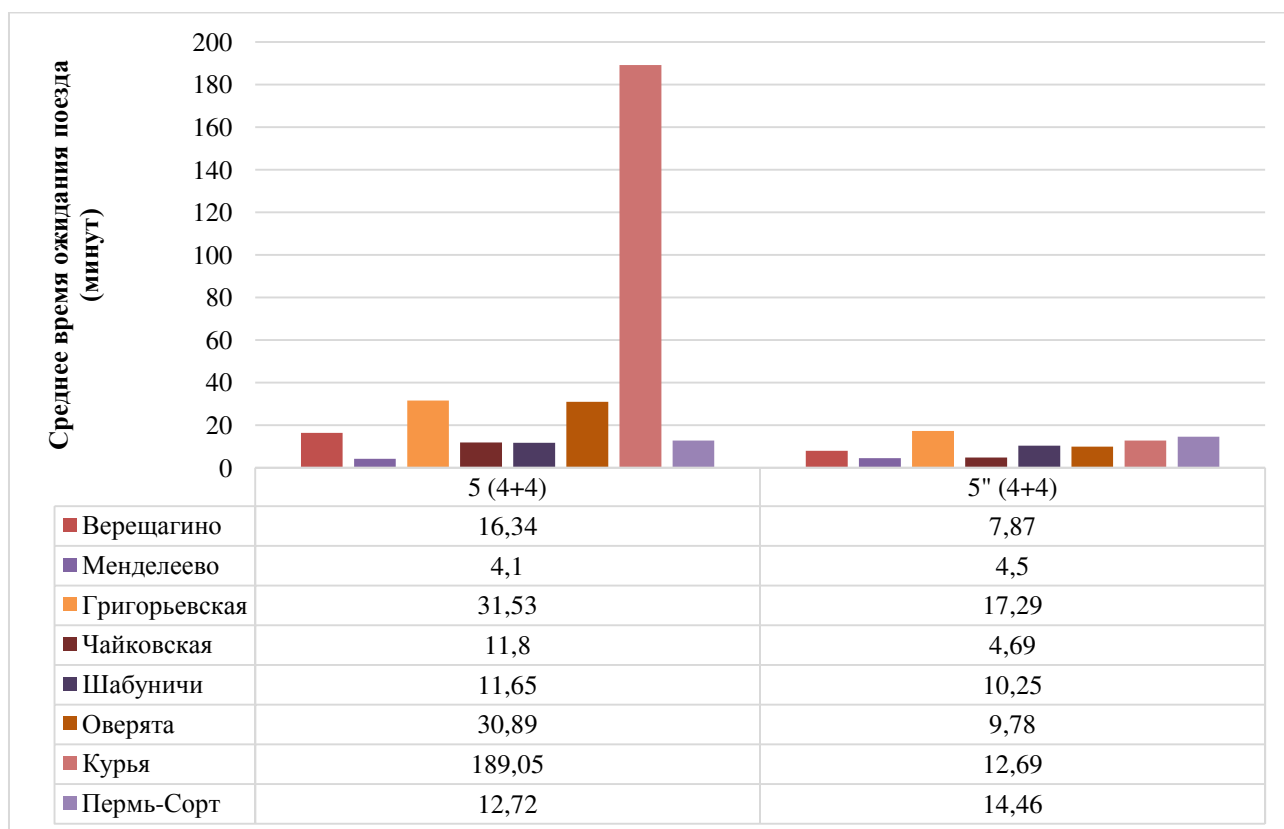


Рисунок 3.15 – Среднее время ожидания поезда пассажиром по станциям для варианта с пятью сдвоенными поездами

В серии расчетов с корректировкой графика возникли проблемы с производительностью компьютера при расчете. Загрузка процессора большую часть времени доходила до 100 %, компьютер нагревался, а сам расчет длился долго. По итогу расчетов решение по второму варианту 6''(4+4) не было получено. После 2,5 часов работы компьютер выключился от перегрева. Соответственно, результаты данного эксперимента в работе не приводятся.

Третий эксперимент – это вариант обращения 7 сдвоенных составов из десяти наличных (условное название варианта – 7''(4+4)): четыре «дальних» сдвоенных состава и три в пределах агломерации.

По итогам расчета выполнены сдвиги ниток графика второго поезда (далее порядковые номера поездов соответствуют последовательности их прибытия на головную станцию) – позже на 20 минут; третьего поезда – позже на 15 минут; четвертого поезда – позже на 10 минут; пятого поезда – раньше на 10

минут; шестого поезда – позже на 5 минут; седьмого поезда – раньше на 25 минут; девятого поезда – позже на 5 минут; десятого поезда – раньше на 5 минут.

Увеличение составности и пассажировместимости поездов привело к следующему:

- корректировки ниток графика были не столь значительными, как в первом варианте данной серии экспериментов;
- отказ пассажирам в посадке наблюдался дважды на станции Оверята;
- удалось добиться значительного сокращения среднего времени ожидания пассажирами поезда по сравнению с вариантом 7(4+4), которое составило 9,09 мин.

График исполненной работы по варианту обращения семи сдвоенных составов в одном направлении с корректировкой расписания приведен на рисунке 3.16.

Сравнительная диаграмма среднего времени ожидания пассажирами отправления поезда приведена на рисунке 3.17.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

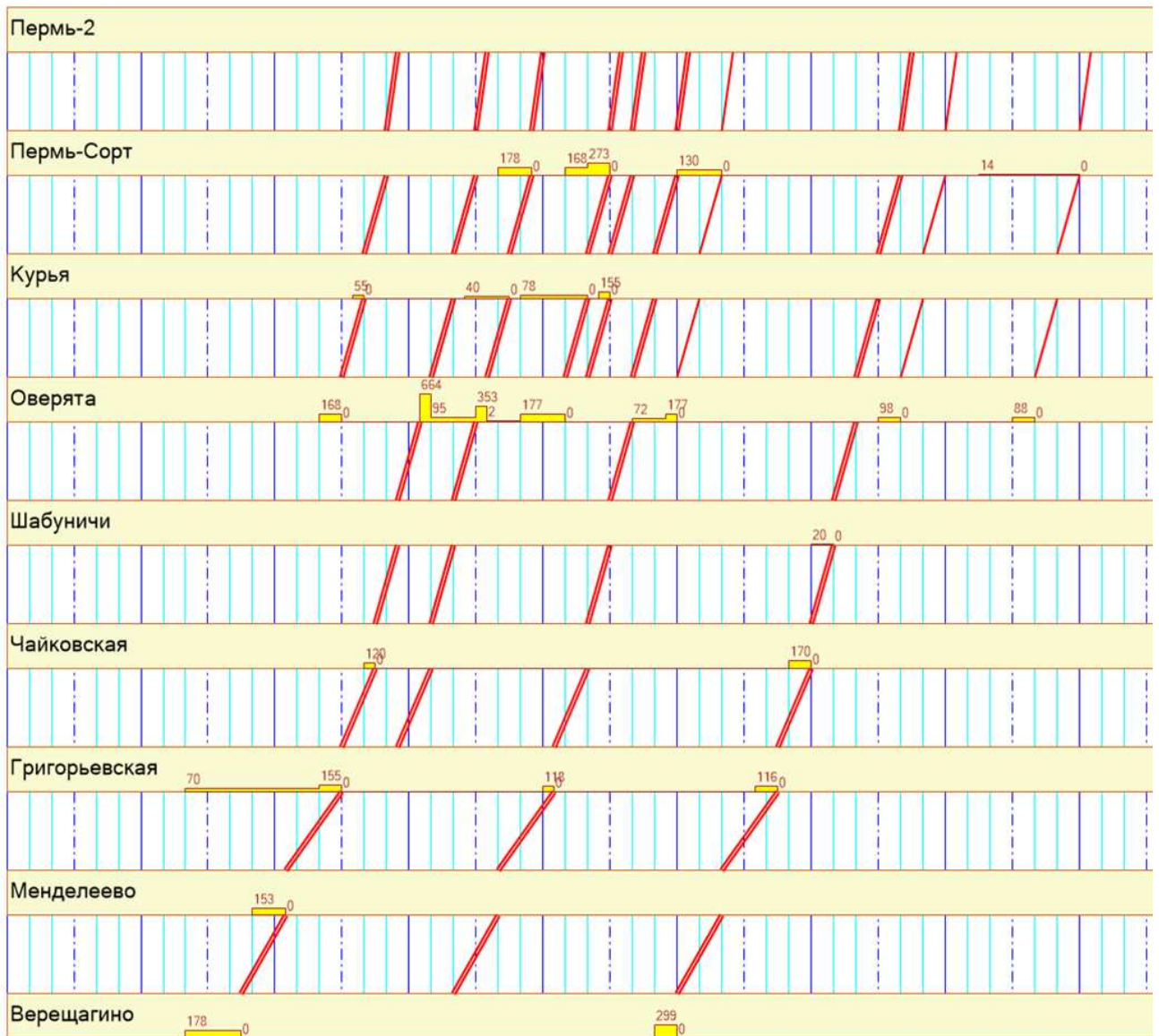


Рисунок 3.16 – ГИР по варианту 7''(4+4)

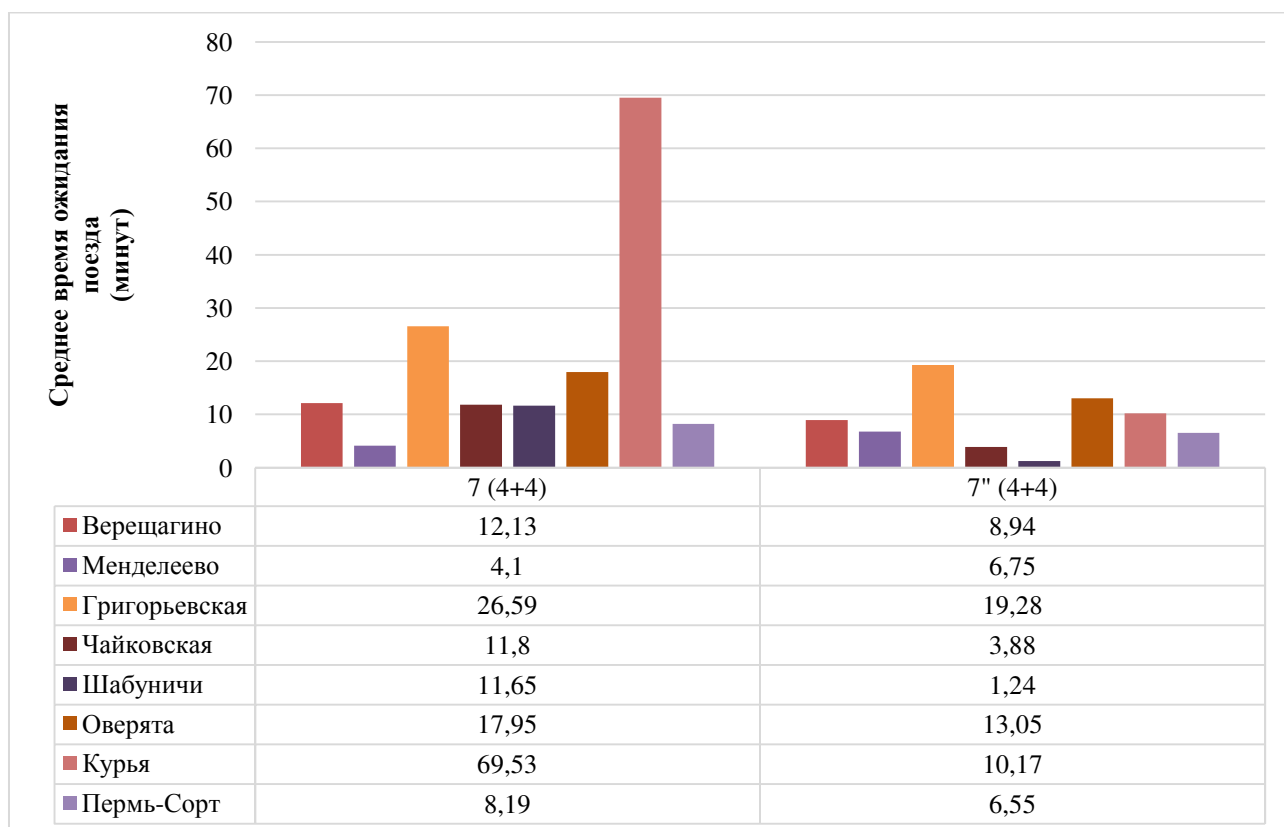


Рисунок 3.17 – Среднее время ожидания поезда пассажиром по станциям для варианта с семью сдвоенными поездами

В четвертом эксперименте второй серии количество сдвоенных составов увеличилось до 8 (условное обозначение варианта – 8''(4+4)): четыре «дальних» сдвоенных состава и четыре в пределах агломерации.

По итогам расчета выполнены сдвигки ниток графика второго поезда (далее порядковые номера поездов соответствуют последовательности их прибытия на головную станцию) – позже на 20 минут; третьего поезда – позже на 5 минут; четвертого поезда – позже на 10 минут; шестого поезда – раньше на 15 минут; седьмого поезда – раньше на 5 минут; девятого поезда – позже на 5 минут; десятого поезда – раньше на 5 минут.

Увеличение составности и пассажироместимости поездов привело к тому, что корректировки графика по сравнению с вариантом 7''(4+4) стали меньше, при этом среднее время ожидания пассажиром отправления не изменилось и

составило 9,09 мин. Отказ пассажирам в посадке наблюдался также два раза на станции Оверята.

График исполненной работы по варианту обращения восьми сдвоенных составов в одном направлении с корректировкой расписания приведен на рисунке 3.18.

Сравнительная диаграмма среднего времени ожидания пассажирами отправления поезда приведена на рисунке 3.19.

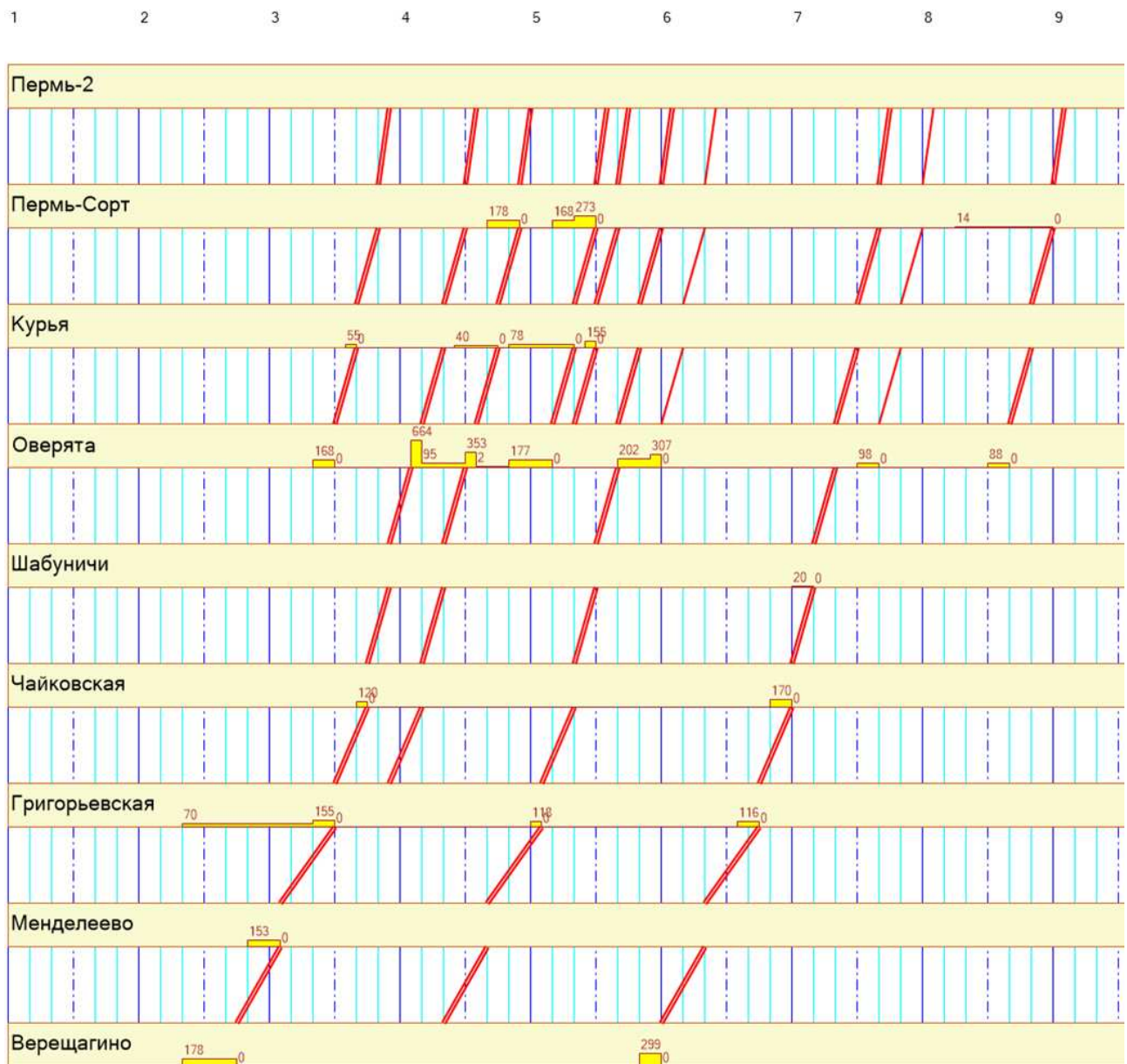


Рисунок 3.18 – ГИР по варианту 8''(4+4)

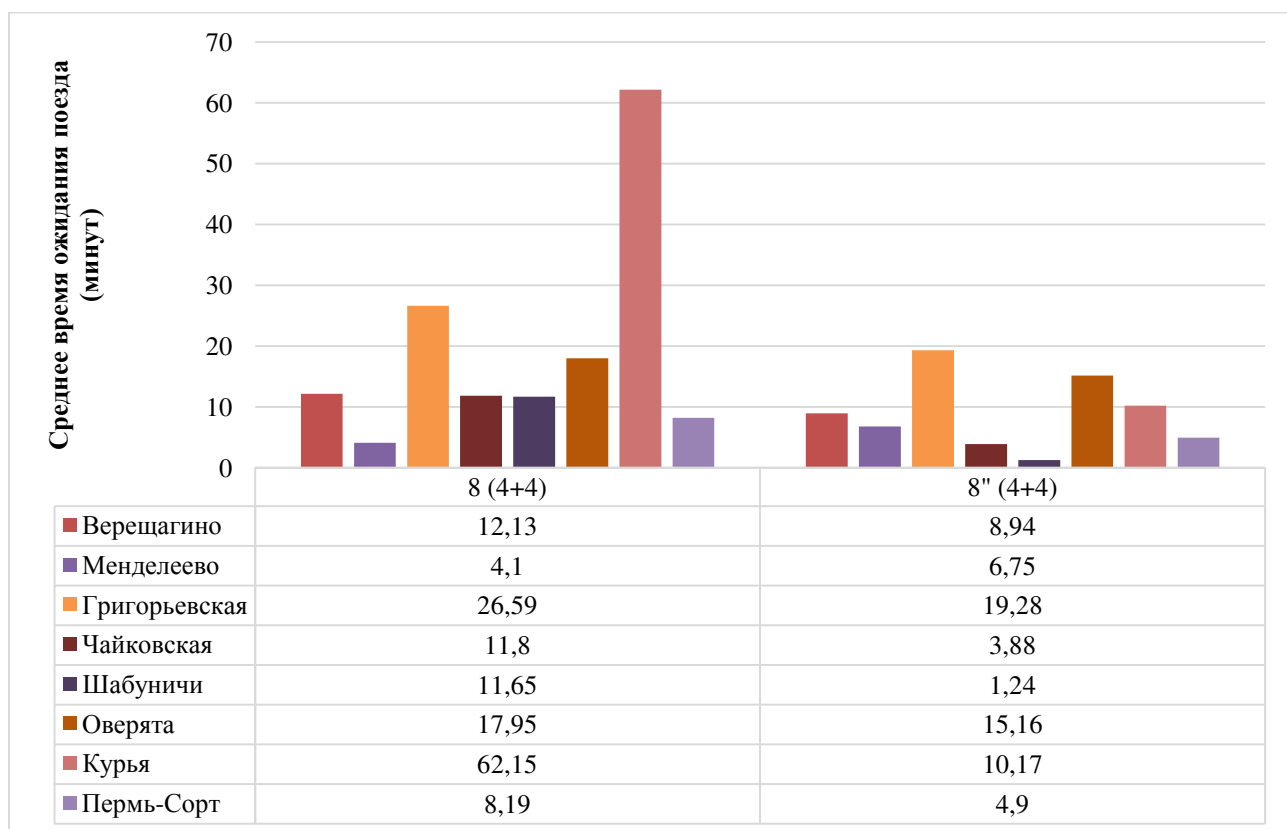


Рисунок 3.19 – Среднее время ожидания поезда пассажиром по станциям для варианта с восемью сдвоенными поездами

Суммарные корректировки (по абсолютной величине) ниток графика по вариантам второй серии экспериментов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Корректировки графика движения поездов по вариантам

Вариант первой серии экспериментов	Вариант второй серии экспериментов	Сумма абсолютных значений отклонений в расписании, мин
5(4+4)	5''(4+4)	255
7(4+4)	7''(4+4)	95
8(4+4)	8''(4+4)	65

По результатам второй серии экспериментов можно сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

– увеличение количества двояных поездов (пассажировместимости) на фоне корректировок ниток графика привело к значительному сокращению времени ожидания пассажирами отправления с промежуточных станций, а также к сокращению количества отказов в посадке;

– среднее время ожидания пассажирами поезда при увеличении количества двояных составов больше семи не сокращается, что объясняется подстройкой графика движения поездов к ритмам отправления пассажиров в данной серии экспериментов;

– с увеличением количества двояных составов суммарное время сдвижек ниток графика в абсолютном выражении сокращается, так как уменьшаются простои пассажиров на станциях в ожидании отправления в связи с отказами в посадке.

3.5. Экспериментальные расчеты третьей серии

Для учета обоих направлений потребуются исходная информация по графику движения пригородных поездов и размеры пассажиропотоков во всех направлениях. В программе необходима глубокая переработка текущего решения для настройки генератора формул и выдачи результатов. Поскольку в обратном направлении в утренний час пик пассажиропоток незначительный, то для минимизации изменений в программное обеспечение он не учитывается. График движения с учетом обратного направления приведен на рисунке 3.20.

По итогам экспериментов третьей серии без корректировки графика движения, но с обратным направлением получены результаты, аналогичные первой серии экспериментов (рисунки 3.21–3.24). Данные об обеспечении обратных ниток графика составами приведены в таблице 3.3.

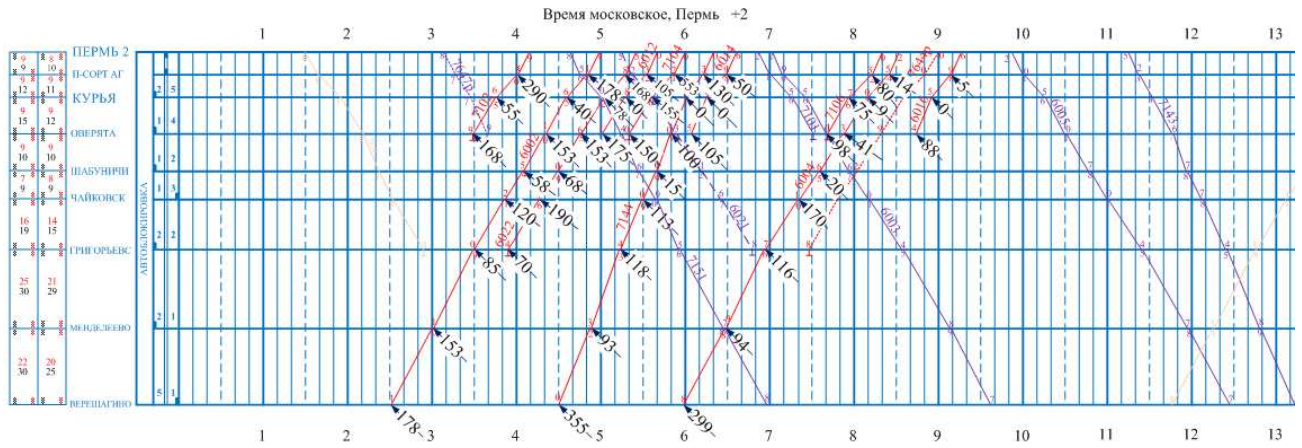


Рисунок 3.20 – График движения в утренний час пик с обратным направлением

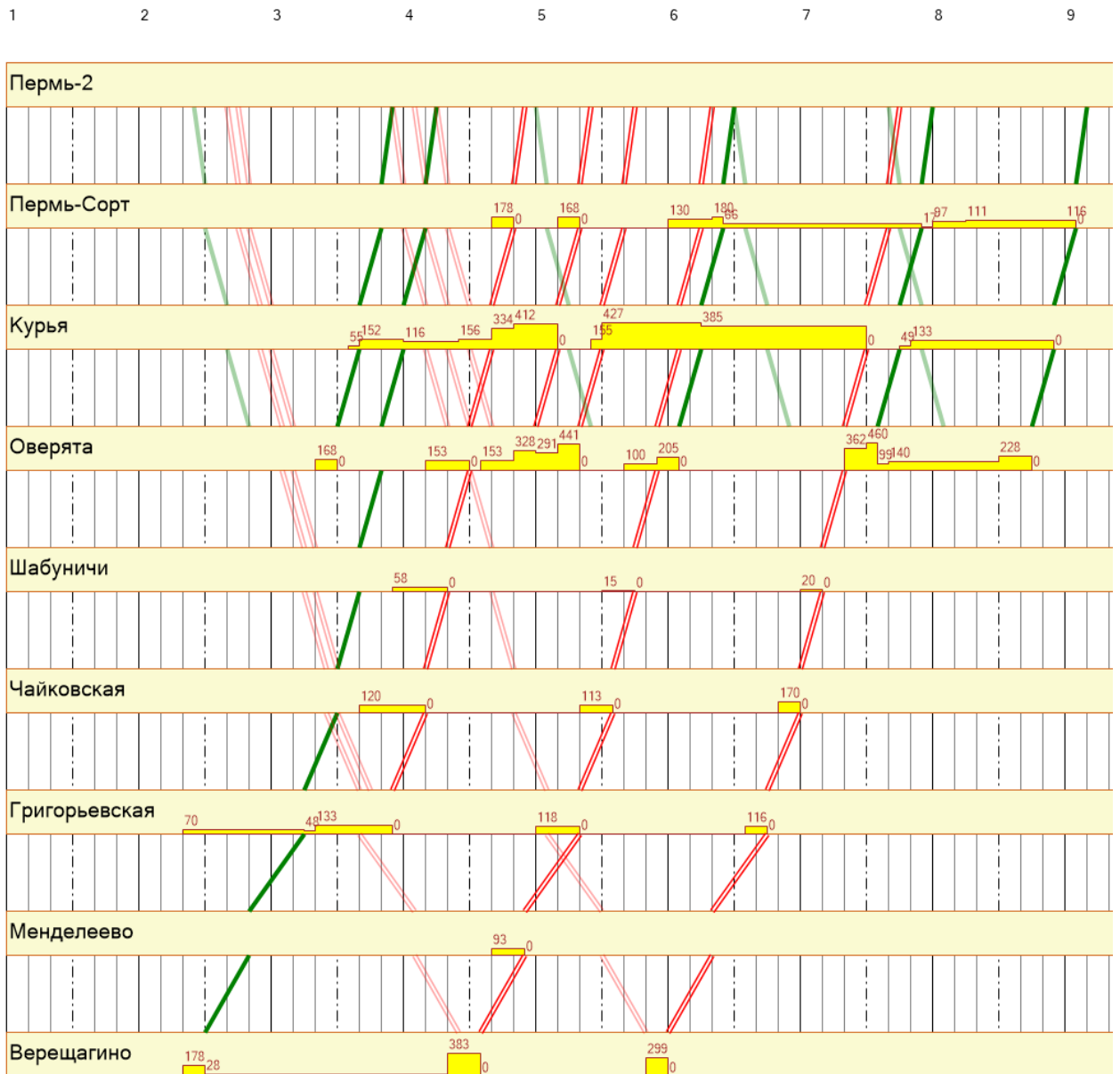


Рисунок 3.21 – ГИР по варианту 5(4+4) с обратным направлением

1 2 3 4 5 6 7 8 9

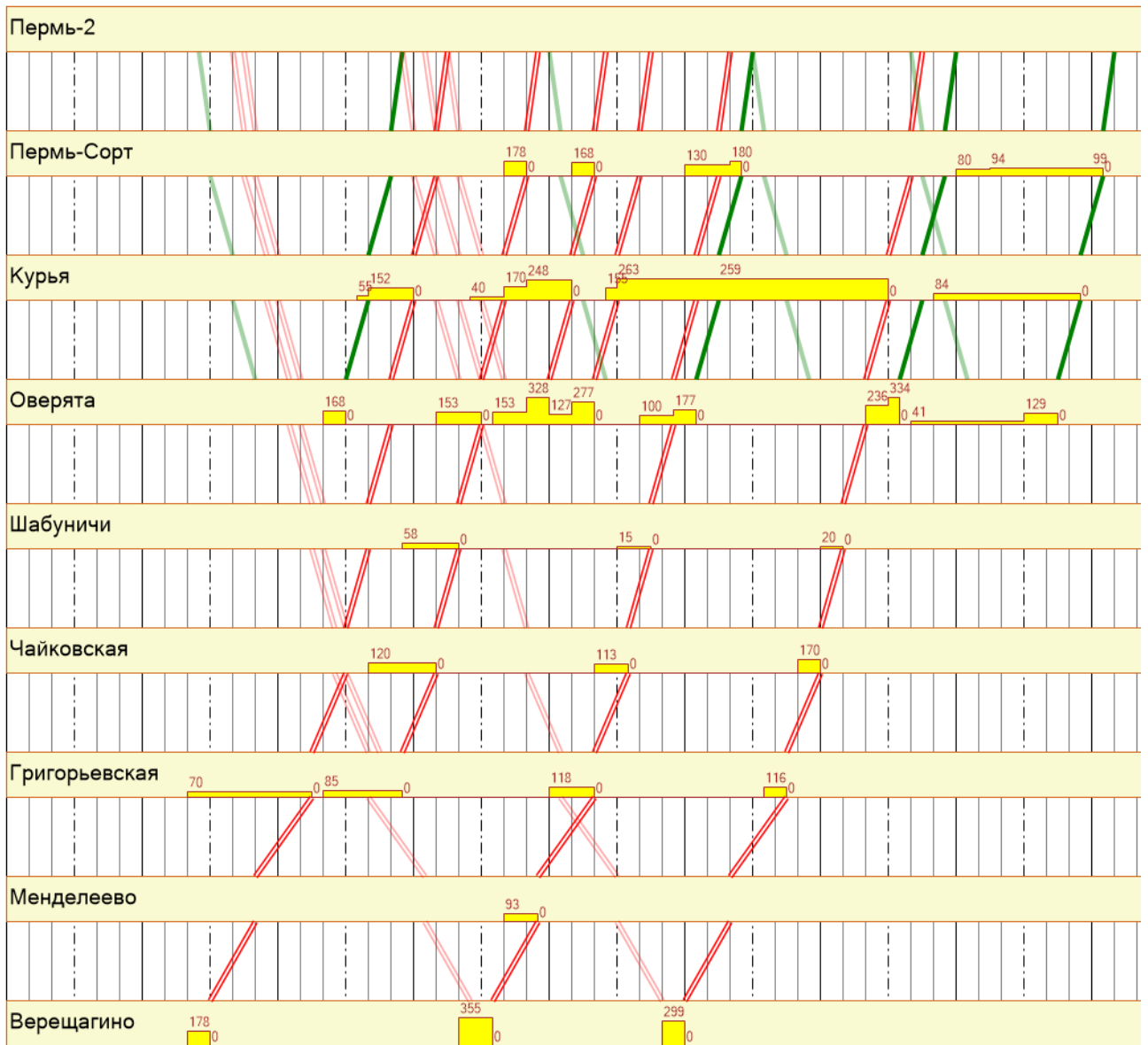


Рисунок 3.22 – ГИР по варианту 6(4+4) с обратным направлением

1 2 3 4 5 6 7 8 9

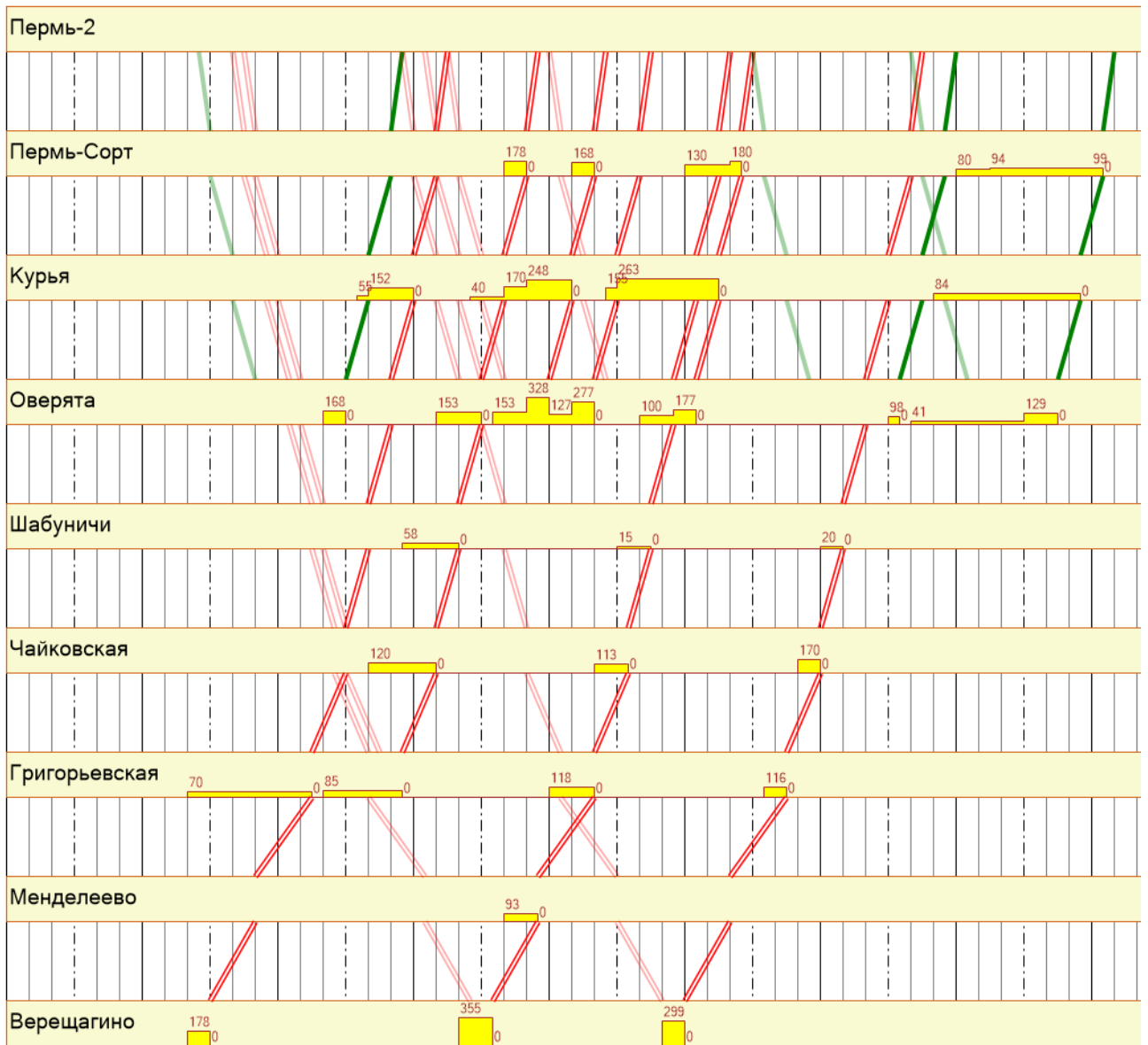


Рисунок 3.23 – ГИР по варианту 7(4+4) с обратным направлением



Рисунок 3.24 – ГИР по варианту 8(4+4) с обратным направлением

Таблица 3.3 – Обеспечение обратных ниток графика составами

Вариант	Сдвоенные поезда в обратном направлении		Обычные поезда в обратном направлении	
	дополнительно привлеченные составы	по обороту	дополнительно привлеченные составы	по обороту
5(4+4)	5	0	2	2 (из числа дополнительных)
6(4+4)	5	0	1	2 (1 сдвоенный + 1 из числа дополнительных)
7(4+4)	5	1	1	2 (1 сдвоенный)
8(4+4)	5	2	0	2 (1 сдвоенный)

По итогам расчетов установлено, что с увеличением количества сдвоенных (модульных) электропоездов потребность в привлеченных сдвоенных составах не изменялась, и в двух последних вариантах появилась возможность их использования по обороту для поездов обратного направления. Сдвоенные поезда также были использованы под обеспечение составами ниток графика обратного направления, где согласно модели требовалось движение одиночных составов. Таким образом, была показана возможность реализации в модели модульного движения как одного из элементов системы гибкого регулирования составности.

3.6. Экспериментальные расчеты четвертой серии

В четвертой серии экспериментов была разрешена корректировка графика при учете движения поездов в обратном направлении.

По итогам экспериментов четвертой серии получены результаты, аналогичные второй серии экспериментов (рисунки 3.25–3.27). Данные об обеспечении обратных ниток графика составами приведены в таблице 3.4.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

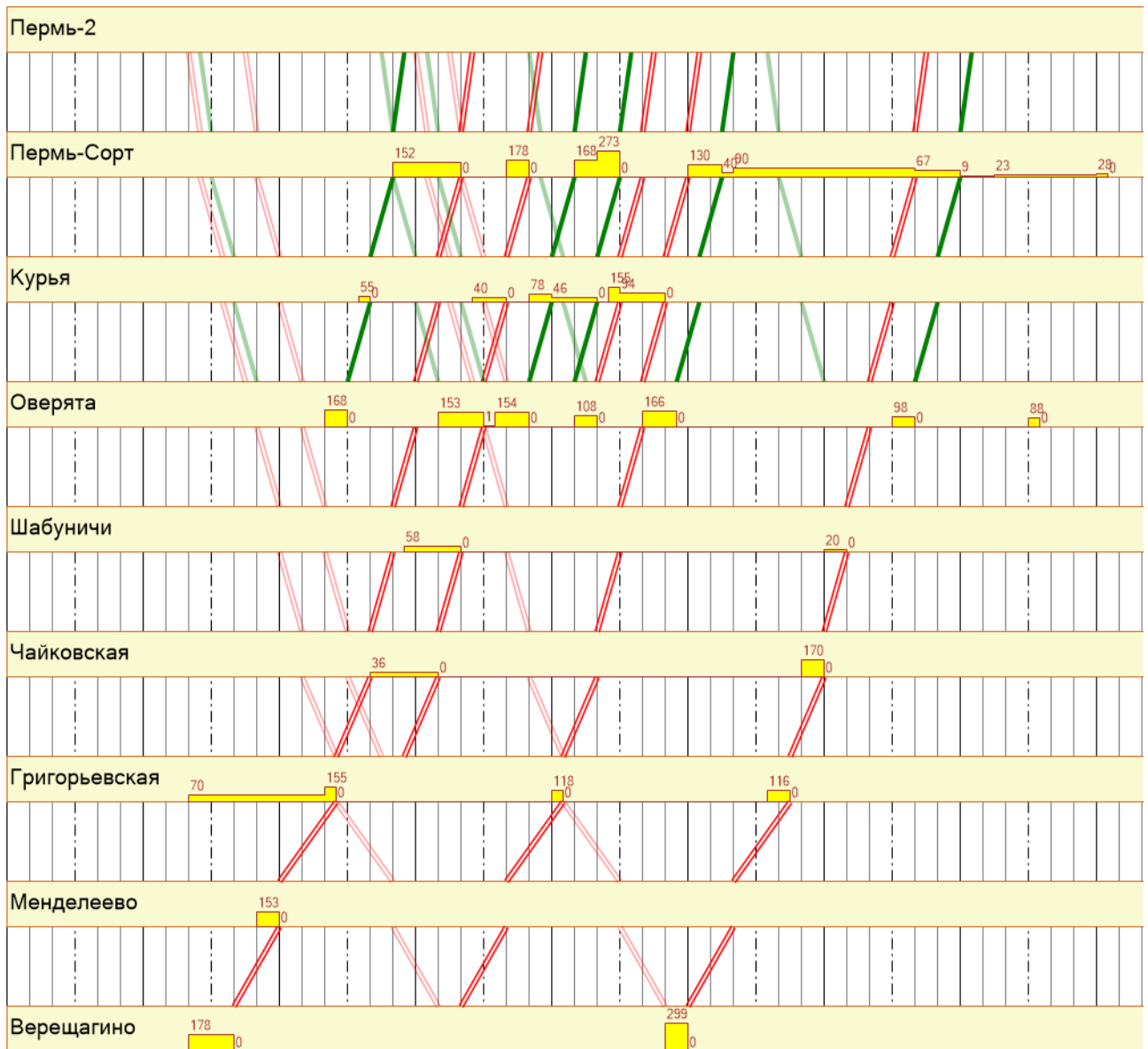


Рисунок 3.25 – ГИР по варианту 5''(4+4) с обратным направлением

1 2 3 4 5 6 7 8 9

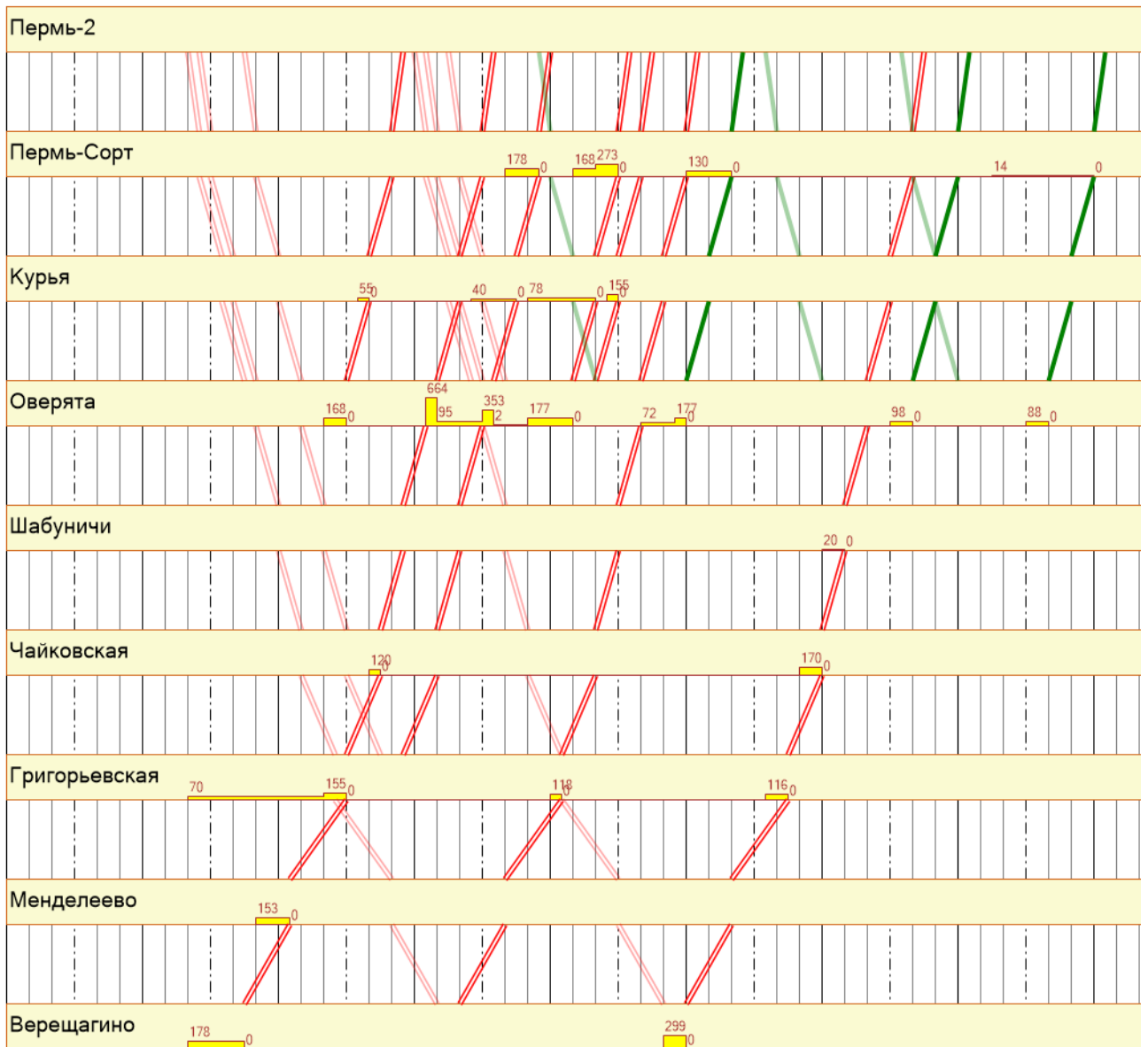


Рисунок 3.26 – ГИР по варианту 7''(4+4) с обратным направлением



Рисунок 3.27 – ГИР по варианту 8''(4+4) с обратным направлением

Таблица 3.4 – Обеспечение обратных ниток графика составами (4 серия)

Вариант	Сдвоенные поезда в обратном направлении		Обычные поезда в обратном направлении	
	дополнительно привлеченные составы	по обороту	дополнительно привлеченные составы	по обороту
5''(4+4)	4	0	3	1 (из числа дополнительных)
7''(4+4)	5	1	0	2 (1 сдвоенный)
8''(4+4)	5	2	0	1 (0,5 сдвоенного)

Анализ графиков исполненной работы показывает, что потребность в привлечении дополнительных сдвоенных составов для обеспечения ниток графика практически не изменилась по сравнению с третьей серией экспериментов. При этом количество привлеченных обычных четырехвагонных составов сократилось в последних двух вариантах, что свидетельствует о более рациональном использовании подвижного состава.

3.7. Анализ результатов

Анализ результатов экспериментальных расчетов показал, что оборот с разъединением получилось реализовать. В нечетном направлении по вариантам №2 и №3 (рисунки 3.15 и 3.16) назначены резервные поезда с головной станции (Пермь-2) под поезда утреннего часа пик, отправляющиеся с зонных станций (рисунок 3.28–3.29). Зелеными нитками обозначены электропоезда четырехвагонной составности, а красными – поезда по схеме «4+4».

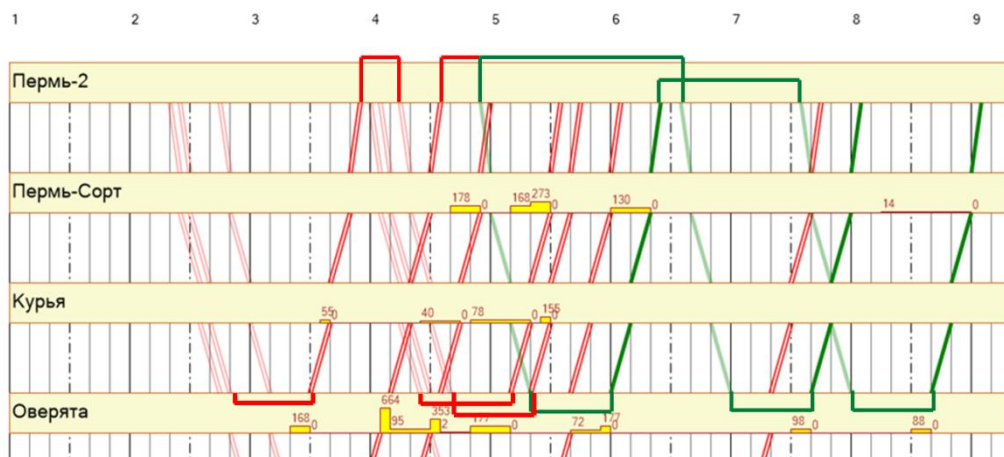


Рисунок 3.28 – Увязка составов по станции Пермь-2 (вариант 6(4+4) с обратным направлением)

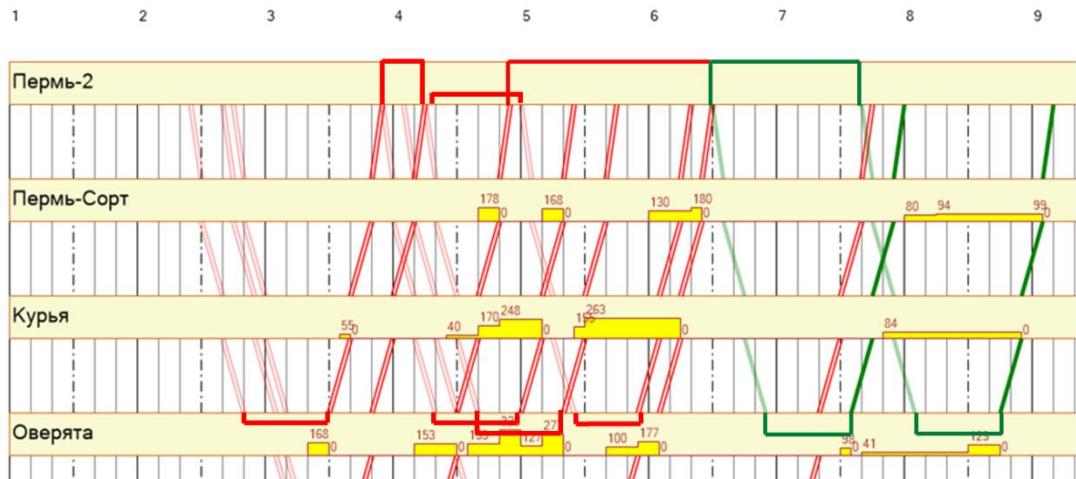


Рисунок 3.29 – Увязка составов по станции Пермь-2 (вариант 8(4+4) с обратным направлением)

Таким образом, на основании проведенных экспериментов на модели освоения пассажиропотока одного направления в час пик установлено, что модель способна поддерживать выбор составности поездов в зависимости от пассажиропотока и выполнять операции со сдвоенными составами.

Следует отметить, что модель способна рассчитать оборот составов и для вечернего часа пик. Основное отличие будет заключаться в том, что ожидание пассажирами отправления поездов будет формироваться на головной станции участка. При этом желаемое время отправления у пассажиров рассеивается, так как жесткая привязка ко времени прибытия на свою станцию отсутствует. Однако в модели возможно учитывать сформировавшиеся у пассажиров привычки и желаемое ими время возвращения в пункт проживания. В обратном направлении в связи с незначительными размерами пассажиропотока значимых требований к расписанию поездов не предъявляется.

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 и обеспечения соответствующих заказов железнодорожным машиностроительным предприятиям.

В регионах с незначительными размерами пассажиропотока возможно применять составы трех-четырёх типов в зависимости от конфигурации железнодорожной сети и объемов перевозок пассажиров на конкретных участках. Так, например, на полигоне АО «Пермская ПК» до внедрения электропоездов серии ЭС2Г применялись составы, состоящие из 4, 6 и 8 вагонов. Стоит отметить, что при такой схеме могут потребоваться операции в моторвагонном депо по корректировке составности (прицепка или отцепка вагонов), что в текущей версии модели не учтено.

В настоящее время на практике процедура построения графика оборота пригородных составов не является результатом решения задачи строгой оптимизации. В соответствующих дирекциях графики оборота электропоездов разрабатываются с учетом практического опыта, поэтому решения можно назвать лишь локально оптимальными (рисунок 3.30).

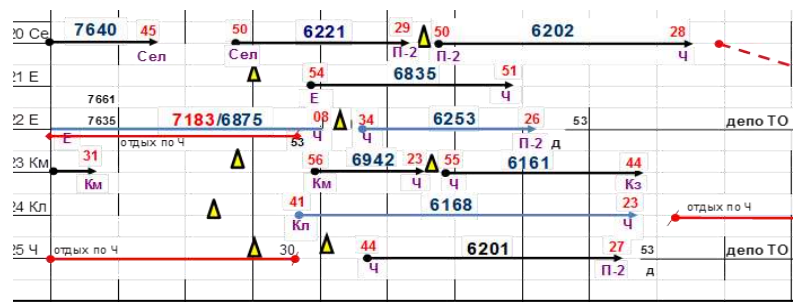


Рисунок 3.30 – Фрагмент графика оборота электропоездов

Существующие методики построения единого графика оборота подходят для крупных железнодорожных узлов, где обращаются электропоезда постоянной составности. В автоматизированной системе АС «Оборот» [93] система гибкого регулирования составности не предусмотрена.

Для осуществления гибкого регулирования составности, в том числе, с использованием модульного движения электропоездов, требуется разработка

методики оптимизации, результатом которой должен стать оптимальный график оборота составов пригородных электропоездов.

На основе предложенных положений методики было обосновано модульное движение на полигоне АО «Пермская пригородная компания» [92]. С помощью результатов экспериментальных расчетов на следующем этапе удалось построить постоянный замкнутый график оборота с использованием гибкого регулирования составности на одном из малоинтенсивных направлений, который представлен на рисунке 3.31.

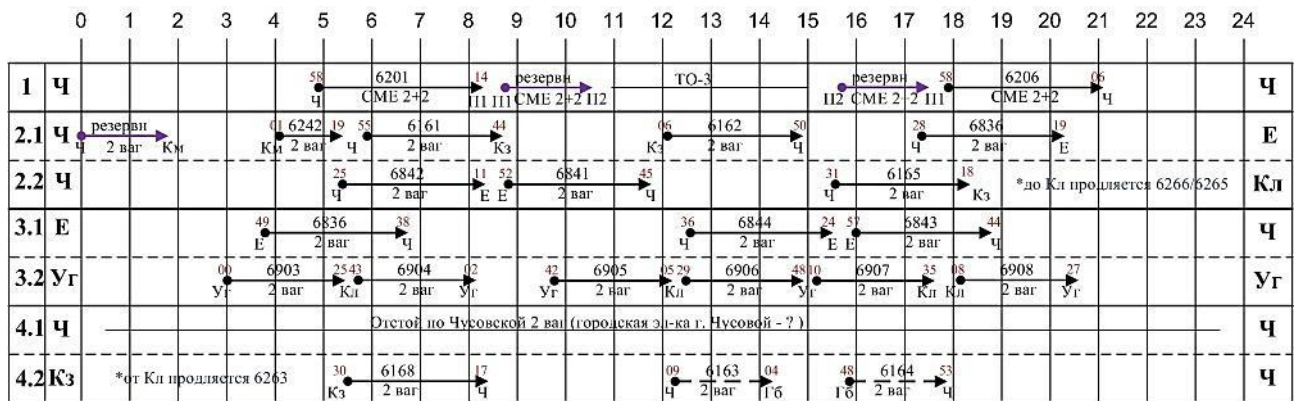


Рисунок 3.31 – Предлагаемый график оборота двухвагонных модулей

В таблице 3.5 приведено сравнение сегодняшнего и перспективного вариантов организации движения при условии использования нового подвижного состава. Значение эксплуатационных расходов вычислено в соответствии с используемой в России методикой.

Старая схема не подразумевала использование модульных составов, и для обслуживания представленного оборота требовалось шесть четырехвагонных составов (24 вагона). По итогам построения графика потребное количество вагонов уменьшилось до 16. Произведен расчет экономии эксплуатационных расходов за счет организации движения модульных электропоездов. В связи с сокращением потребного эксплуатируемого парка вагонов на 8 единиц, а также экономией расходов, зависящих от вагоно-километровой работы (техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт, а также услуги по использованию

инфраструктуры) экономический эффект составит около 65 млн рублей в год (в ценах 2021 г.).

Таблица 3.5 – 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%

Выводы по главе 3

1. Апробация функциональной модели была проведена для реального железнодорожного полигона. С этой целью для конкретного направления с использованием известного программного аппарата разработана технологическая модель.

2. На основании проведенных экспериментов установлено, что модель способна поддерживать выбор составности поездов в зависимости от пассажиропотока и выполнять операции с модульными составами. Таким образом, была доказана работоспособность модели в реальных условиях.

3. 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.

4. 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.

ГЛАВА 4. УПРАВЛЕНИЕ ОБОРОТОМ ПРИГОРОДНЫХ СОСТАВОВ

4.1. Системные основы управленческой деятельности

Концепцию управления работой перевозочной компании необходимо рассматривать с научной точки зрения. Конкретизацию и настройку управленческих процессов перевозчиков следует осуществлять с использованием методологических принципов. Методология представляет собой систему знаний о структуре, организации, методах и инструментах деятельности. Для исследования деятельности организации используются общенаучные подходы. Основным из них считается системный анализ. Управление рассматривается в качестве ключевого системного признака деятельности предприятий. Система должна иметь основную цель, которую поддерживает и сохраняет [65]. Реализация цели описывается набором параметров. Системы включают в себя механизмы мониторинга внешней и внутренней среды для определения потенциальных угроз. Реакцию на изменение внешних условий обеспечивает механизм регулирования и адаптивного управления (рисунок 4.1). Системный анализ тесно связан с основными функциями управления.

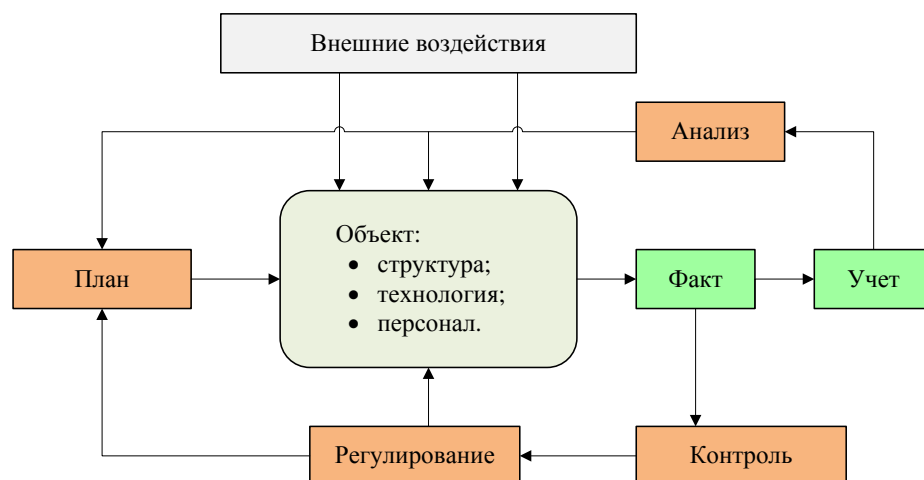


Рисунок 4.1 – Процесс адаптивного управления

Важная роль в управлении отводится реализации функции организации, под которой понимается внутренняя упорядоченность, согласованность. Свойства системы во многом определяются характером взаимодействия подсистем. Различают функциональное, структурное и структурно-функциональное взаимодействие. Функциональное взаимодействие обеспечивается разработкой сквозных, единых технологических процессов. Структурное – организационным проектированием. Особую роль играет структурно-функциональное взаимодействие, которое определяется содержательным наполнением приемов и способов управления и регулирования различных частей процессов, действий. С методологической точки зрения основные закономерности функционирования организационных систем являются предметом науки «Теория организации».

Управление предприятием имеет тесную связь с его экономикой. На этой основе происходит планирование, учет и анализ как для предприятия в целом, так и для отдельных его подразделений и процессов. В пригородном пассажирском комплексе необходимо, с одной стороны, увеличить доходные поступления от перевозок, что осуществляется путем внедрения транспортных проектов, комплекса маркетинга и инструментов клиентоориентированности. С другой стороны, требуется снижение затрат по расходным договорам. Изучение потребностей и поведения пассажиров, состояния рынка транспортных услуг, оптимизация использования ресурсов должны производиться с применением математических методов и моделей. Разработка моделей, учет и обработка информации невозможны без помощи цифровых технологий, поэтому знания в области информационных систем и информатики приобретают особую значимость.

Системные принципы различных объектов становятся все более схожими при повышении уровня организации. Этот фактор позволяет строить системную модель и на ней исследовать свойства объекта как системы. Конкретную реализацию функций управления, порядок подготовки и представления исходных данных, алгоритм действий специалистов по гибкому регулированию МВПС можно отработать на некоторой упрощенной системной модели.

4.2. Математическая модель гибкого регулирования и проверка ее работоспособности

Разработанная во второй главе модель не может решить задачу гибкого регулирования в полном объеме, так как не предполагает регулировку составности в депо и не допускает движение составов разных типов в одном поездном формировании. Для устранения этих недостатков и учета всех возможных способов управления составностью в рамках одной задачи была предложена доработанная модель (за основу модели также взята модель строгой оптимизации «Лабиринт»). Данная модель предусматривает наличие на станциях полигона трех подсистем [86] – подсистема входа (i), подсистема выхода (j) и пункт зарождения составов (q). В нашей постановке задачи эти системы называются соответственно: подсистема приема поездов, высадки пассажиров и отстоя МВПС (i) – далее для краткости будем называть её подсистемой приёма и отстоя, подсистема подачи поезда под посадку (q), подсистема посадки и отправления (j).

При этом, согласно [91], модульный МВПС (или одиночный модуль) должен освоить пиковую густоту пассажиропотока на участке. Поэтому для качественного обслуживания пассажиров должно выполняться условие:

$$n_{\text{ваг}}^j \geq \frac{\Gamma_{\text{max}}^j \cdot k^{\text{пер}}}{\alpha \cdot a}, \quad (4.1)$$

где $n_{\text{ваг}}^j$ – количество вагонов в электропоезде;

a – вместимость одного вагона (по количеству посадочных мест), пасс/ваг;

Так как постановка задачи требует поиска полигонов для модульного движения, то для простоты решения нам необходимо определить потребное

количество модулей в составе при заданной их композиции. Поэтому формула (4.1) преобразуется к виду:

$$m^j \geq \frac{\Gamma_{\max}^j \cdot k^{\text{неп}}}{n_{\text{ваг}}^j \cdot \alpha \cdot a}, \quad (4.2)$$

где m^j – количество модулей в конкретном поезде j .

Процессы посадки-высадки условного пассажиропотока (его пиковой густоты), а также перевозка пассажиров пригородными электропоездами по участкам отображаются в динамике (рисунок 4.2).

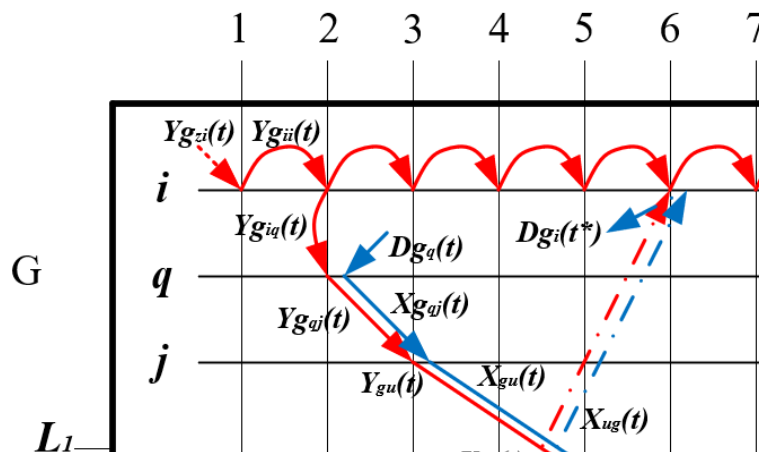


Рисунок 4.2 – Схема подвязки модулей под условный пассажиропоток

Пригородные поезда с пассажирами и резервные электропоезда принимаются в подсистему приема и отстоя станции. В первый момент времени на каждой из станций полигона производится начальная расстановка необходимого количества модульных составов (переменная $Yg_{zi}(t)$). Допускается не выполнять расстановку модулей в начальный момент времени, если одно из условий задачи состоит в определении потребного парка. В этом случае значение переменной будет найдено в ходе решения задачи.

Из подсистемы отправления отправляются пригородные поезда, осваивающие определенную максимальную (на участке) густоту пассажиропотока, либо

резервные составы. В соответствии с базовым расписанием пригородных поездов модули или модульные электропоезда появляются в подсистеме подачи под посадку. В ней же производится посадка пассажиров, то есть процесс соединения условного пассажиропотока с модулями. Пассажиропоток называем условным, так как посадка пассажиров на станции отправления не может быть использована для расчета потребного количества модулей (за исключением случая экспоненциального распределения пассажиропотока). В общем случае с модулями «соединяется» *пиковая плотность пассажиропотока*, которая представляет максимальное количество пассажиров, одновременно находящихся в поезде между определенными остановочными пунктами по маршруту следования.

Пиковую плотность пассажиропотока будем рассчитывать по формуле:

$$Xsb_{qq}(t) = \frac{\Gamma_{\max}^j \cdot k^{\text{неп}}}{\alpha}. \quad (4.3)$$

Далее детально рассмотрим подсистемы станций и все дуги, которые входят и исходят от них.

1. Моторвагонное депо d (рисунок 4.3).

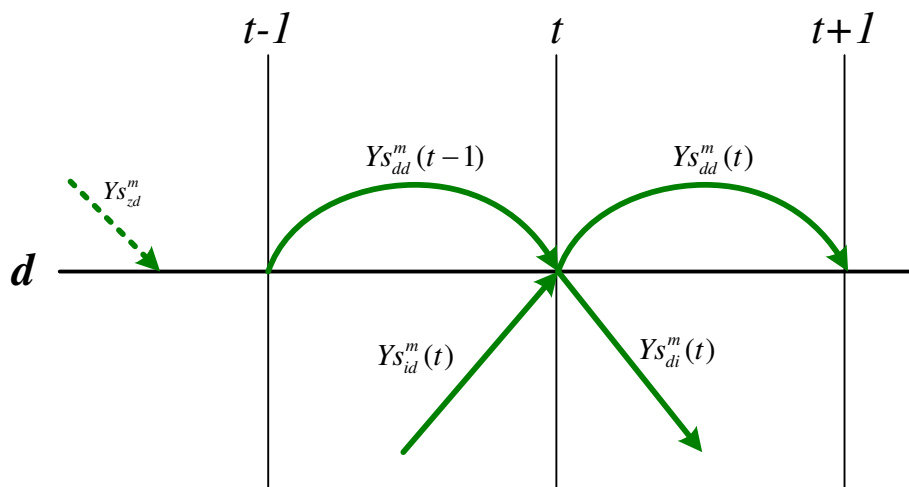


Рисунок 4.3 – Отображение работы моторвагонного депо

Для депо в каждый момент времени t будет достигаться баланс модулей:

$$Ys_{dd}^m(t) = Ys_{dd}^m(t-1) + Ys_{zd}^m(t) + Ys_{id}^m(t - \tau_{id}) - Yg_{di}^m(t), \quad (4.4)$$

где t – рассматриваемый такт времени;

$Ys_{dd}^m(t)$ – количество модулей, простаивающих в подсистеме депо;

$Ys_{dd}^m(t-1)$ – количество модулей, простаивавших в подсистеме депо с предыдущего такта;

$Ys_{zd}^m(t)$ – количество модулей, появившихся в подсистеме депо в первый такт времени;

$Ys_{id}^m(t - \tau_{id})$ – количество модулей, передаваемых из подсистемы приема и отстоя в подсистему депо;

$Yg_{di}^m(t)$ – количество модулей, выдаваемых из депо.

2. Подсистема приёма и отстоя i (рисунок 4.4).

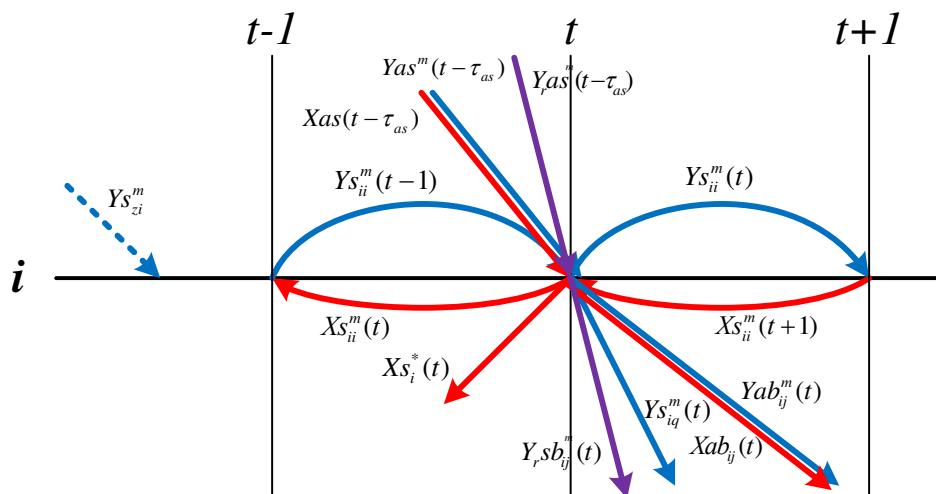


Рисунок 4.4 – Отображение работы подсистемы прибытия и отстоя

Для данной подсистемы в каждый момент времени t будет выполняться следующее уравнение баланса модулей:

$$Ys_{ii}^m(t) = Ys_{zi}^m(t) + Yas_{ij}^m(t - \tau_{as}) + Ys_{ii}^m(t - 1) - Yasb_{ij}^m(t) - Ys_{iq}^m(t) + Y_r as_{ij}^m(t - \tau_{as}) - Y_r sb_{ij}^m(t), \quad (4.5)$$

где $Ys_{ii}^m(t)$ – количество модулей, простаивающих в подсистеме отстоя;

$Ys_{zi}^m(t)$ – количество модулей, появившихся в подсистеме отстоя в первый такт времени;

$Yas_{ij}^m(t - \tau_{as})$ – количество модулей, прибывших на станцию S со станций отправления a ;

$Ys_{ii}^m(t - 1)$ – количество модулей, простаивавших в подсистеме приема и отстоя;

$Ys_{iq}^m(t)$ – количество модулей, передаваемых из подсистемы приема и отстоя в подсистему подачи под посадку;

$Yasb_{ij}^m(t)$ – количество модулей, передаваемых в подсистему отправления (транзитные);

$Y_r as_{ij}^m(t - \tau_{as})$ – количество модулей, прибывших на станцию S резервом;

$Y_r sb_{ij}^m(t)$ – количество модулей, следующих со станции S резервом;

τ_{as} – время хода от станций отправления a до станции S ;

Модуль МВПС простаивает на станции в ожидании подвязки под «нитку» графика, либо выдается из «пула» (в первом такте времени), или поступает с другой станции с прибывающим пригородным поездом.

Динамика густоты пассажиропотока в секторе приема описывается следующим уравнением:

$$Xs_{ii}(t) = Xas_{ij}(t - \tau_{as}) + Xs_{ii}(t + 1) - Xasb_{ij}(t) - Xs_i^*(t), \quad (4.6)$$

где $Xs_{ii}(t)$ – условный пассажиропоток в подсистеме приема станции;

$Xas_{ij}(t - \tau_{as})$ – условный пассажиропоток, прибывший со станции a ;

$Xs_{ii}(t + 1)$ – прибывший условный пассажиропоток;

$Xasb_{ij}(t)$ – транзитный условный пассажиропоток;

$Xs_i^*(t)$ – высадка условного пассажиропотока на станции S .

3. Подсистема подачи модулей под посадку q (рисунок 4.5).

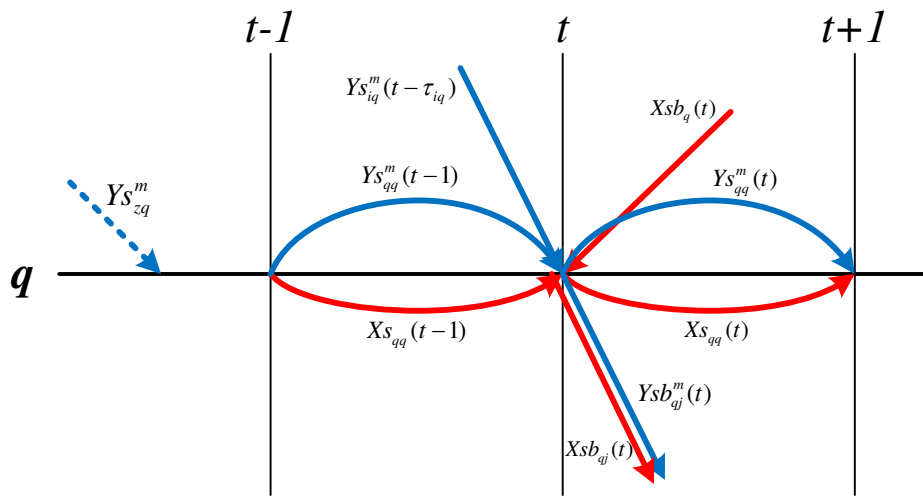


Рисунок 4.5 – Отображение работы подсистемы подачи модулей под посадку

Для данной подсистемы в каждый момент времени t будет выполняться следующее уравнение баланса модулей:

$$Ys_{qq}^m(t) = Ys_{zq}^m(t) + Ys_{iq}^m(t - \tau_{iq}) + Ys_{qq}^m(t - 1) - Ysb_{ij}^m(t), \quad (4.7)$$

где $Ys_{qq}^m(t)$ – количество модулей, простаивающих в подсистеме подачи под посадку (имеет место после начальной расстановки, если на втором такте времени зарождается пассажиропоток, под который нужно подать состав, но он не успевает перейти из подсистемы отстоя в подсистему q);

$Ys_{zq}^m(t)$ – количество модулей, появившихся в подсистеме подачи под посадку в первый такт времени;

$Ys_{iq}^m(t - \tau_{iq})$ – количество модулей, переданных из подсистемы отстоя в подсистему подачи под посадку при возникновении условного пассажиропотока;

$Ys_{qq}^m(t - 1)$ – количество модулей, простаивавших в подсистеме подачи под посадку в ожидании условного пассажиропотока;

$Ysb_{ij}^m(t)$ – количество модулей, поданных под посадку и передаваемых отправлению в подсистему отправления.

Динамика густоты пассажиропотока в секторе подачи под посадку описывается следующим уравнением:

$$Xsb_{qq}(t) = Xsb_q(t) + Xsb_{qq}(t - 1) - Xsb_{qj}(t), \quad (4.8)$$

где $Xsb_{qq}(t)$ – условный пассажиропоток назначением на станцию b , готовый к посадке;

$Xsb_q(t)$ – зарождение условного пассажиропотока назначением на станцию b ;

$Xsb_{qq}(t - 1)$ – условный пассажиропоток назначением на станцию b , готовый к посадке (с предыдущего такта времени);

$Xsb_{qj}(t)$ – условный пассажиропоток, готовый к отправлению на станцию b .

4. Подсистема отправления поездов (модулей и пассажиров) j (рисунок 4.6).

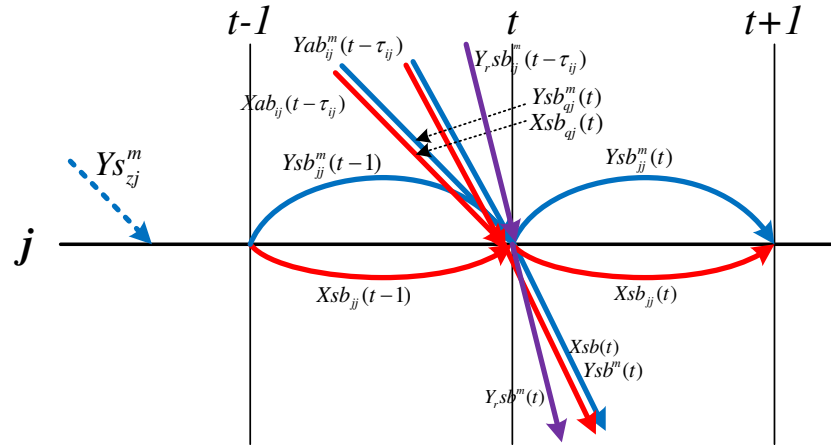


Рисунок 4.6 – Отображение работы подсистемы отправления

Для данной подсистемы в каждый момент времени t будет выполняться следующее уравнение баланса модулей:

$$\begin{aligned}
 Y_{sb_{ij}}^m(t) = & Y_{s_{zj}}^m(t) + Y_{sb_{ij}}^m(t-1) + Y_{asb_{ij}}^m(t-\tau_{ij}) + Y_{s_{qj}}^m(t-\tau_{qj}) - Y_{sb}^m(t) + \\
 & + Y_{r, sb_{ij}}^m(t-\tau_{ij}) - Y_{r, sb}^m(t),
 \end{aligned} \quad (4.9)$$

где $Y_{sb_{ij}}^m(t)$ – количество модулей, ожидающих отправления на станцию b ;

$Y_{s_{zj}}^m(t)$ – количество модулей, появившихся в подсистеме отправления в первый такт времени;

$Y_{sb_{ij}}^m(t-1)$ – количество модулей, ожидающих отправления с предыдущего такта времени на станцию b ;

$Y_{asb_{ij}}^m(t-\tau_{ij})$ – количество модулей транзитных поездов, готовых к отправлению на станцию b ;

$Y_{s_{qj}}^m(t-\tau_{qj})$ – количество модулей поездов своего формирования, готовых к отправлению на станцию b ;

$Y_{sb}^m(t)$ – количество модулей, отправляющихся на станцию b .

$Y_rsb_{ij}^m(t - \tau_{ij})$ – количество модулей резервных поездов, готовых к отправлению на станцию b ;

$Y_rsb^m(t)$ – количество модулей резервных поездов, отправляющихся на станцию b .

Баланс условного пассажиропотока в подсистеме отправления можно записать формулой:

$$Xsb_{jj}(t) = Xsb_{qj}(t - \tau_{qj}) + Xsb_{jj}(t - 1) + Xasb_{ij}(t) - Xsb(t), \quad (4.10)$$

где $Xsb_{jj}(t)$ – условный пассажиропоток, ожидающий отправление на станцию b ;

$Xsb_{qj}(t - \tau_{qj})$ – посадка пассажиров назначением на станцию b ;

$Xsb_{jj}(t - 1)$ – условный пассажиропоток, ожидающий отправление на станцию b (с предыдущего такта времени);

$Xasb_{ij}(t)$ – транзитный условный пассажиропоток;

$Xsb(t)$ – условный пассажиропоток, отправленный на станцию b .

Дополнительные ограничения

В связи с техническими и технологическими особенностями рассматриваемой системы необходимо наложить ряд дополнительных ограничений.

Количество модулей в одном составе вне зависимости от их перемещения между подсистемами одной станции или между станциями не может превышать заданную величину M (на инфраструктуре ОАО «РЖД» M равна двум):

$$\sum_m Y^m(t) \leq M. \quad (4.11)$$

Невозможность перехода пассажиропотока в сектор отправления без подачи модуля или модульного состава:

$$\sum_m Ysb_{qj}^m(t) \cdot a_m \geq Xsb_{qj}, \quad (4.12)$$

где a_m – вместимость модуля составности m ;

Условный пассажиропоток в подсистеме отправления не отделяется от состава МВПС:

$$\sum_m Ysb_{jj}^m(t) \cdot a_m \geq Xsb_{jj}(t). \quad (4.13)$$

Невозможность отправления пассажиров без состава МВПС:

$$\sum_m Ysb^m(t) \cdot a_m \geq Xsb(t). \quad (4.14)$$

Регулирование количества модулей в составе транзитных поездов при переломе пассажиропотока по транзитной станции:

$$\sum_m Yasb_{ij}^m(t) \cdot a_m \geq Xasb(t). \quad (4.15)$$

Количество одновременно отстаиваемых модулей не может превышать вместимость путей отстоя. При этом пренебрегаем технологией выполнения маневровой работы по подаче модулей под посадку.

Ограничение по отстояю модулей в подсистеме приема и отстоя i на любой из станций S рассматриваемого направления запишем следующим образом:

$$\sum_m Y_{S_{ii}}^m(t) \cdot l^m \leq \sum L_S^i, \quad (4.16)$$

где l^m – длина модуля составности m с учетом длины на точность установки состава МВПС, м;

$\sum L_S^i$ – суммарная полезная длина путей отстоя, предназначенных для отстоя МВПС на станции S , м.

Суммарная длина сцепленного МВПС не может превышать установленную на железнодорожных участках норму длины (или веса):

$$\sum_m Y_{Sb}^m(t) \cdot l^m \leq L_{Sb}^{\text{норм}}. \quad (4.17)$$

где $L_{Sb}^{\text{норм}}$ – норма длины пригородного поезда на участке Sb , м.

Количество поездов, подаваемых под посадку в момент времени t , ожидающих посадки и находящихся под посадкой, не должно превышать количество приемоотправочных путей (или значения, показывающего пропускную способность горловин станции S):

$$\begin{aligned} \sum_b Y_{S_{iq}}^m(t) &\leq N_{\text{ПОП}}; \\ \sum_b Y_{Sb_{qq}}^m(t) &\leq N_{\text{ПОП}}; \\ \sum_b Y_{Sb_{qj}}^m(t) &\leq N_{\text{ПОП}}; \end{aligned} \quad (4.18)$$

где $N_{\text{ПОП}}$ – количество приемоотправочных путей, предназначенных для приема-отправления пригородных поездов.

Для станции, на которой имеется моторвагонное депо, добавляются еще некоторые ограничения. Первое касается количества одновременно подаваемых (или выдаваемых) составов МВПС из депо.

$$\begin{aligned} \sum_m Y_{s_{id}}^m(t) &\leq D; \\ \sum_m Y_{s_{di}}^m(t) &\leq D. \end{aligned} \quad (4.19)$$

где D – количество одновременно подаваемых в депо модулей МВПС.

Следующий особо важный момент касается непосредственного осуществления регулирования составности на территории депо. Для этого в депо предусматривается изначальная дислокация фиктивных составов $Y_{s_{zd}}^m$, которые предназначены для условной прицепки-отцепки вагонов при заходе составов в депо. Регулирование составности будет происходить в том случае, если в депо постоянно будут дислоцироваться условные составы, образовавшиеся в результате обмена с прибывшими из подсистемы отстоя модулями. Количество условных составов должно быть не меньше определенного заданного значения:

$$\sum_m Y_{s_{dd}}^m(t) \geq \sum_m Y_{s_{zd}}^m(const). \quad (4.20)$$

Опишем процесс осуществления регулирования составности на конкретном примере. При заходе состава МВПС в депо по «нитке» $Y_{s_{id}}^m(t)$, если необходимо, производится прицепка-отцепка вагонов. Предположим, в депо зашел один двухвагонный модуль $Y_{s_{id}}^2(t)$, который после выдачи (по «нитке» $Y_{s_{di}}^m(t)$) из депо должен стать пятивагонным $Y_{s_{di}}^5(t)$. В течение определенного времени должна произойти прицепка трех вагонов. Предположим, в депо для прицепки имеется одна трехвагонная группа, одна – четырехвагонная и одна – пятивагонная. Эти группы вагонов не могут быть описаны в рамках нашей задачи какими-то иными переменными, кроме переменных модулей. Поэтому для осуществления регулирования, в нашем случае, трехвагонной группе будет соответствовать условный пятивагонный модуль $Y_{s_{dd}}^5(t)$, четырехвагонной – шестивагонный

модуль $Y_{sd}^6(t)$, а пятивагонной – семивагонный модуль $Y_{sd}^7(t)$. На последнем такте времени перед моментом выдачи состава из депо осуществляется обмен модулей – двухвагонного на пятивагонный. Этот процесс отражен на рисунке 4.7.

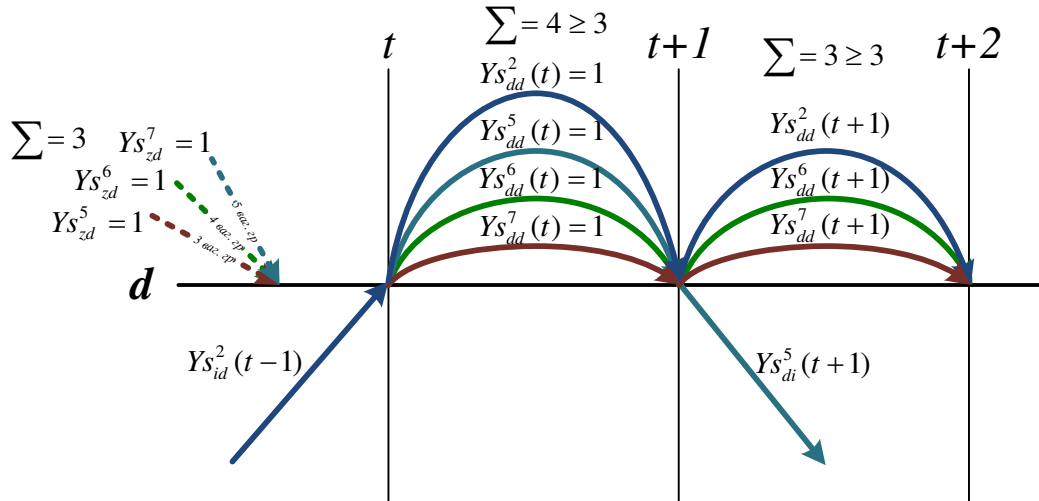


Рисунок 4.7 – Осуществление регулирования составности

Как можно увидеть, на такте времени t количество составов в депо превысило начально заданное количество, на следующем такте произошла выдача пятивагонного состава, а в депо остался условный двухвагонный состав. Если в дальнейшем в депо зайдет состав, у которого количество вагонов потребуется уменьшить до двух, то обмен произойдет аналогично, и условный двухвагонный состав (после отцепки группы из трех вагонов) покинет депо взамен нового условного состава.

Время для регулирования составности в депо возможно задать в качестве параметра дуги, соединяющей подсистему приема и отстоя с подсистемой депо.

Еще одним ограничением для депо является максимально возможное количество составов, которые могут одновременно находиться на путях моторвагонного депо:

$$\sum_m Y_{sd}^m(t) \leq D_d(\text{const}). \quad (4.21)$$

В задаче требуется найти такие значения переменных Y , чтобы эксплуатационные расходы, а также затраты пассажиро-часов ожидания в стоимостном выражении были минимальными. Значения всех переменных Y задают график гибкого регулирования составности посуточно по поездам. Затраты пассажиро-часов ожидания могут возникнуть при простое в подсистеме посадки, отправления либо при сдвиге нитки графика.

Для записи целевой функции необходимо определиться со всеми стоимостными параметрами c , всех нанесенных на расчетные схемы дуг. Сведем их в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Стоимостные параметры задачи

Параметр	Обозначение	Единица измерения
$c_{И}^m$	стоимость использования одного состава МВПС составностью m за рассматриваемый период моделирования T	Руб./состав
$c_{дв}^m$	стоимость одного составо-такта движения (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
$c_{дв}^{Rm}$	стоимость одного составо-такта движения резервом (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
$c_{i-пр}^m$	стоимость одного составо-такта простоя в подсистеме приема и отстоя i (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
$c_{q-пр}^m$	стоимость одного составо-такта простоя в подсистеме подачи под посадку q (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
$c_{j-пр}^m$	стоимость одного составо-такта простоя в подсистеме отправления j (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
c_{qj}^m	стоимость одного составо-такта простоя под посадкой (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
c_{iq}^m	стоимость одного составо-такта маневровых передвижений при подаче под посадку (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
c_{ij}^{Rm}	стоимость одного составо-такта маневровых передвижений при передаче резервного состава из подсистемы отстоя в подсистему отправления (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
c_{ij}^m	стоимость одного составо-такта простоя транзитного состава после прибытия до готовности к отправлению (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
c_{id}^m	стоимость одного составо-такта маневровых передвижений при подаче/выдаче из депо (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
$c_{d-пр}^m$	стоимость составо-такта простоя условных составов в депо (МВПС составностью m)	Руб./составо-такт
$c_{пасс}$	стоимость одного пассажиро-такта ожидания	Руб./пассажиро-такт
$c_{пасс}^{оп}$	стоимость опоздания пассажиров при сдвиге «нитки» графика	Руб./пассажиро-такт

Применительно к задаче целевая функция выглядит следующим образом [94]:

$$\begin{aligned}
 Z = & \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M (Y_{szd}^m + Y_{szi}^m + Y_{szq}^m + Y_{szj}^m) \cdot c_{И}^m + \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^S \sum_{b=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{ab}^m(t) \cdot c_{дв}^m + \sum_{t=1}^T \sum_{a=1}^S \sum_{b=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{Rab}^m(t) \cdot c_{дв}^{Rm} + \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{sii}^m(t) \cdot c_{i-пп}^m + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{sqq}^m(t) \cdot c_{q-пп}^m + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{sij}^m(t) \cdot c_{j-пп}^m + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{sqj}^m(t) \cdot c_{qj}^m + \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{Rsj}^m(t) \cdot c_{ij}^{Rm} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M Y_{sij}^m(t) \cdot c_{ij}^m + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=2}^M (Y_{sid}^m(t) + Y_{sdi}^m(t)) \cdot c_{id}^m + \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S (X_{sqq}(t) + X_{sqj}(t) + X_{sij}(t)) \cdot c_{пасс} + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S X_{sii}(t) \cdot c_{пасс}^{оп} \rightarrow \min.
 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Для того чтобы установить общую работоспособность модели, были проведены эксперименты в среде линейного программирования *LP Solve* [95], при этом сама модель была упрощена. Упрощение предполагает отсутствие деления станции на подсистемы; сдвигка ниток графика и наличие транзитных поездов не предусмотрены.

Эксперимент №1.

В первом эксперименте вводятся в обращение двух- и четырехвагонные составы вместимостью соответственно $a_m^2 = 160$ пассажиров и $a_m^4 = 320$ пассажиров. Требуется освоить пассажиропотоки Xsb :

- от ст. a до ст. b в первый такт времени (320 пасс.);
- от ст. a до ст. b в третий такт времени (320 пасс.);
- от ст. b до ст. c в третий такт времени (480 пасс.);
- от ст. c до ст. a во второй такт времени (480 пасс.).

Расходные ставки на движение и простои двухвагонных и четырехвагонных электропоездов (ставки для шестивагонных электропоездов приведены для оценки эффективности эксперимента), приближенно соответствующие структуре затрат в пригородном сообщении:

- стоимости использования одного состава МВПС за весь период моделирования $c_{И}^2$ (15 у.е./состав), $c_{И}^4$ (20 у.е./состав), $c_{И}^6$ (30 у.е./состав);

- стоимость одного составо-такта движения между станциями a и b , b и c – $c_{дв1}^2$ (2 у.е./составо-такт), $c_{дв1}^4$ (3 у.е./составо-такт), $c_{дв1}^6$ (5 у.е./составо-такт);
- стоимость одного составо-такта движения между станциями c и a – $c_{дв2}^2$ (4 у.е./составо-такт), $c_{дв2}^4$ (5 у.е./составо-такт), $c_{дв2}^6$ (7 у.е./составо-такт);
- стоимость одного составо-такта простоя на любой станции $c_{i-пр}^2$ (1 у.е./составо-такт), $c_{i-пр}^4$ (2 у.е./составо-такт), $c_{i-пр}^6$ (3 у.е./составо-такт).

В данном эксперименте введены ограничения на переменные: количество модулей в составе независимо от их составности составляет не более двух (ограничения установлены в секции BOUNDS). Графическая постановка задачи приведена на рисунке 4.8.

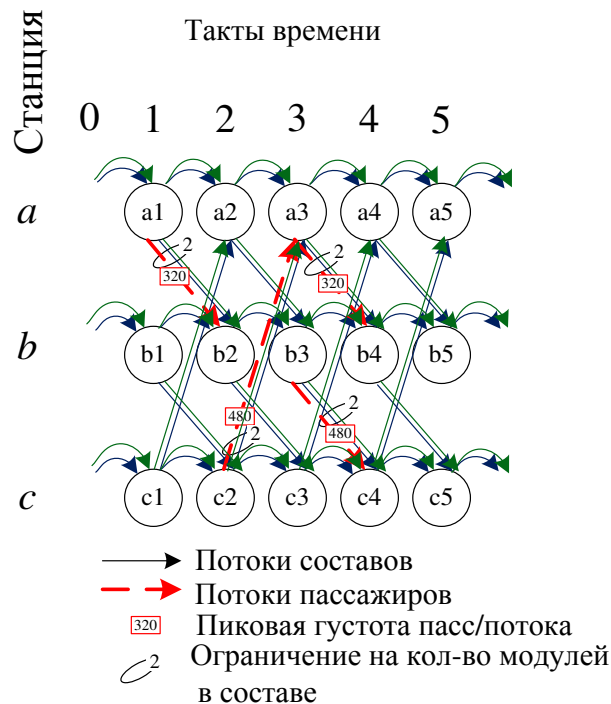


Рисунок 4.8 – Постановка задачи для первого эксперимента

Требуется построить график гибкого регулирования так, чтобы эксплуатационные расходы были минимальны.

По итогам решения можно отметить, что модульное движение осуществлялось от станции *b* до станции *c* в третий такт, а также от станции *c* до станции *a* во второй такт. Модульные поезда состояли из одного четырехвагонного и одного двухвагонного состава. На третьем такте на станции *a* произведено разъединение модулей: двухвагонный остался на станции *a*, а четырехвагонный отправился до станции *b*. Эксплуатационные затраты составили 100 у.е.

Результаты решения приведены на рисунке 4.9.

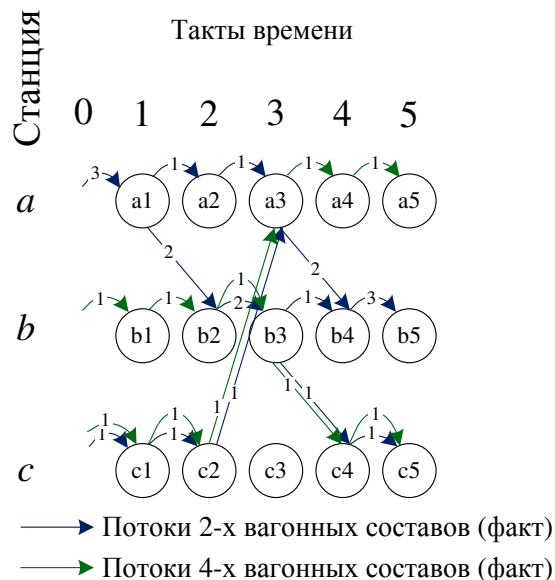


Рисунок 4.9 – Визуализация решения задачи эксперимента №1

При эксплуатации 6-вагонных составов затраты на привлечение и эксплуатацию составов составят 138 у.е. Таким образом, расходы уменьшились на 27 %. Эффективность использования вместимости выросла на 20,5 %.

Эксперимент №2.

В данном эксперименте добавляется дополнительная подсистема – моторвагонное депо *d*. Выделено две нитки графика для подачи состава со станции *a* в депо и из депо на станцию *a*. Постановка эксперимента аналогична

эксперименту 1, скорректированы нитки графика пригородных поездов, добавлен дополнительный такт времени (рисунок 4.10).

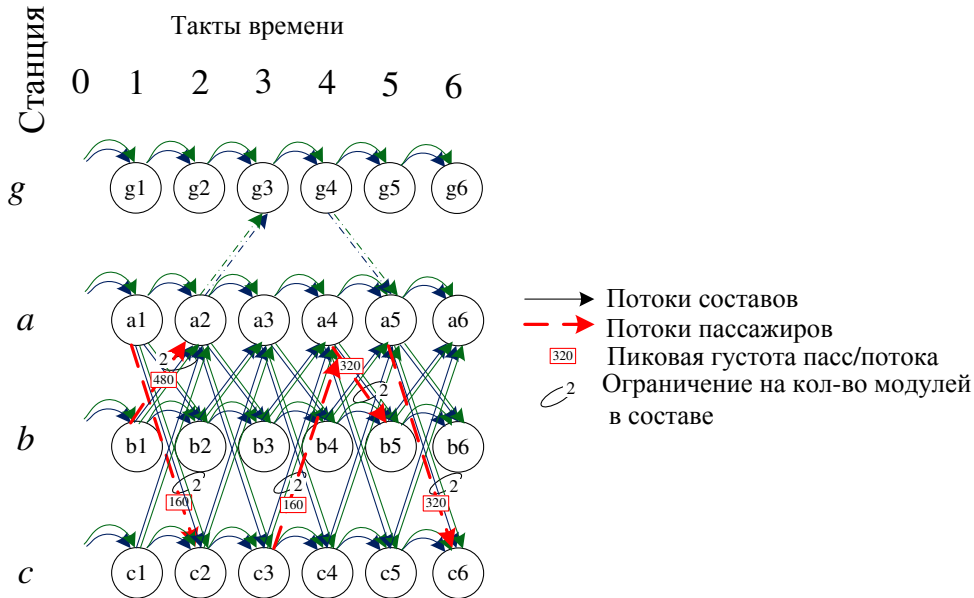


Рисунок 4.10 – Постановка задачи для второго эксперимента

Остальные условия эксперимента №2 приведены в приложении Б. Визуализация решения задачи приведена на рисунке 4.11.

По результатам проведенного эксперимента получено подтверждение работоспособности модели в части регулирования составности в депо: с первого по третий такт в депо простаивал условный двухвагонный состав (по факту в депо было 0 вагонов). На третий такт в депо прибыл четырехвагонный состав, от которого с третьего по четвертый такт отцепили промежуточную двухвагонную секцию. В четвертый такт на станцию отправился двухвагонный состав, а двухвагонная секция (условный четырехвагонный состав) осталась на территории депо до конца модельного времени. Модульный поезд по схеме «4+2» был назначен в первый такт со станции *b* до станции *a*.

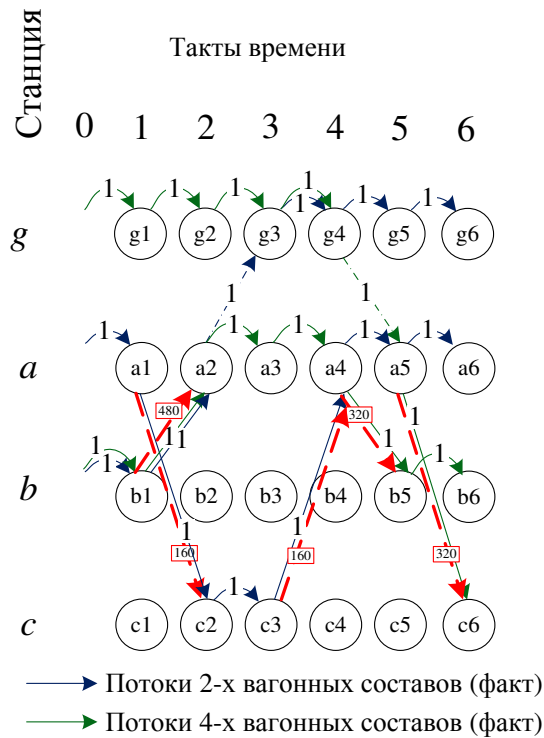


Рисунок 4.11 – Визуализация решения задачи эксперимента №2

Решение задачи в программном обеспечении *LPSolve* приведено в приложении Б. Значение целевой функции составило 115 у.е.

4.3. Организация гибкого регулирования на основе использования предложенной модели

Для разработки программного обеспечения и расчета гибкого регулирования на реальных полигонах железных дорог необходимо описать порядок действий по расчету графика оборота с использованием оптимизационных методов.

1. Настройка модельного времени.

Модельное время T целесообразно принять равным 9 дням, или 12960 минутам (с понедельника первой недели по вторник следующей недели

включительно). Выбор такого времени обусловлен необходимостью анализа переходных процессов в регулировании составности до и после выходных дней, когда изменяются размеры пассажиропотока.

2. Выбор шага моделирования t .

Принимается, исходя из необходимой детализации расчета (в идеальных условиях 1 такт равен 1 минуте). Шаг может быть равен 5 или 10 минутам.

3. Задание схемы полигона, станций и их параметров.

Схема полигона задается в виде шахматки, в которой при наличии прямой связи между станциями проставляется расстояние в километрах, а каждой станции присваивается определенный тип (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Пример задания схемы полигона в матричном виде

От станции	До станции (+тип)				
	А	Б	В	Г	Д
	<i>G</i> (головная станция с депо)	<i>S</i> (станция оборота)	<i>U</i> (узловая станция)	<i>S</i> (станция оборота)	<i>S</i> (станция оборота)
А		100	120	0	0
Б			60	0	0
В				100	80
Г					0
Д					

Полученная схема выглядит следующим образом (рисунок 4.12).

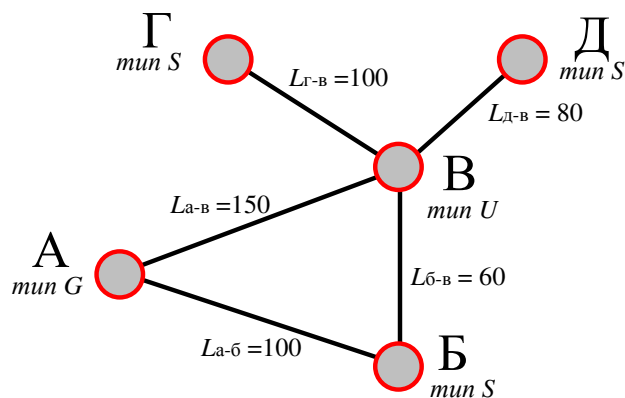


Рисунок 4.12 – Схема железнодорожного направления

4. Задание времени на передвижения (или простои) составов (таблица 4.3).

Времена хода τ_{sb} между станциями рассматриваемого полигона задаются конкретно по каждому из поездов в соответствии с их базовым расписанием (см. пункт 5).

Таблица 4.3 – Задание времени на передвижения (или простои) составов

Параметр	Время	Значение, мин	Количество тактов, ед
τ_{iq}	Маневровые передвижения при подаче состава под посадку	10	1
τ_{ij}^R	Маневровые передвижения состава МВПС, готовящегося к отправлению со станции резервом	10	1
τ_{ij}	Простой транзитного состава МВПС на станции под посадкой-высадкой пассажиров, сменой локомотивных бригад, изменением составности	20	2
τ_{qi}	Простой состава МВПС под посадкой	20	2
τ_{id}	Маневровые передвижения при подаче/выдаче из депо	20	2
τ_{sb}	Время хода между станцией отправления и станцией назначения (определяется расписанием с учетом правил округления, описанных в п.2.)	$T_{sb};$ $T_{sb}:10$	$T_{sb}/10$

5. Задание расписания и пассажиропотоков.

Применительно к нашей задаче зарождающийся условный пассажиропоток на станции S назначением на станцию b $Xsb_q(t)$ является пиковой (максимальной) прогнозной плотностью пассажиропотока конкретного поезда в конкретные сутки $\Gamma_{max}^{прог-р}$. Таким образом, условный пассажиропоток:

$$Xsb_q(t) = \Gamma_{max}^{прог-р}. \quad (4.23)$$

Схема продвижения пассажиропотока представлена на рисунке 4.13.

В соответствии со схемой:

$$Xsb_q(t) = Xsb_i(t + \tau_{qi} + \tau_{sb}). \quad (4.24)$$

Указание расписания, а также времени зарождения и погашения условных пассажиропотоков, значения пиковых густот производится по форме таблицы 4.4 в порядке такта времени зарождения пассажиропотока.

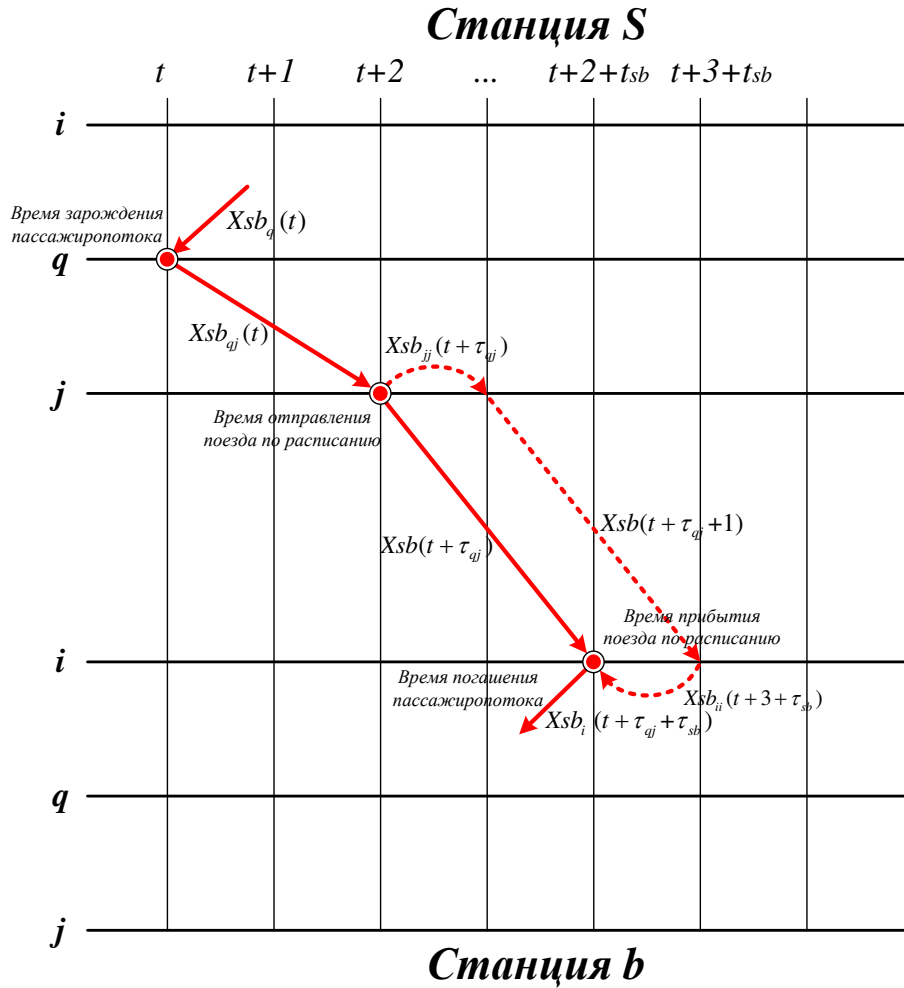


Рисунок 4.13 – Схема продвижения пассажиропотока конкретного поезда в определенные сутки

Таблица 4.4 – Задание расписания пригородных перевозок и значений пиковых густот (при величине такта $t = 10$ мин)

Сутки	№ поезда	Ст. отпр.	Ст. приб.	Время отпр.	Время приб.	Такт отпр.	Такт приб (погашения)	Такт зарождения	Пиковая густота
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6202	А	Б	08:00	11:20	48	68	46	250
...
1	6206	А	Б	20:00	23:20	120	140	118	150
...
9	6202	А	Б	08:00	11:20	1200	1220	1198	400
...
9	6206	А	Б	20:00	23:20	1272	1292	1270	100

Значения граф 7, 8, 9 рассчитываются программой на основании введенного расписания по формулам:

$$\begin{aligned} \text{гр7} &= \frac{\text{округлт (час (гр5) \cdot 60 + минуты (гр5); 10) + 1440 \cdot \text{гр1}}}{t}; \\ \text{гр8} &= \frac{\text{округлт (час (гр6) \cdot 60 + минуты (гр6); 10) + 1440 \cdot \text{гр1}}}{t}; \\ \text{гр9} &= \text{гр7} - \tau_{qj}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

6. Начальная расстановка МВПС:

1) Начальная расстановка задается пользователем.

По каждой из станций S рассматриваемого полигона заполняется таблица с указанием количества составов (модулей) и их составности (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Задание начальной расстановки пользователем

Составность, ваг (m)	Станция S				
	А	Б	В	Г	Д
2	$YA_{zi}^2(0)$	$YB_{zi}^2(0)$	$YB_{zi}^2(0)$	$Y\Gamma_{zi}^2(0)$	$YD_{zi}^2(0)$
4	$YA_{zi}^4(0)$	$YB_{zi}^4(0)$	$YB_{zi}^4(0)$	$Y\Gamma_{zi}^4(0)$	$YD_{zi}^4(0)$
6	$YA_{zi}^6(0)$	$YB_{zi}^6(0)$	$YB_{zi}^6(0)$	$Y\Gamma_{zi}^6(0)$	$YD_{zi}^6(0)$

При задаваемой начальной расстановке условимся, что все составы будут дислоцироваться в подсистеме прибытия (отстоя составов) станции i .

2) Начальная расстановка формируется программой, исходя из потребного размера моторвагонного парка.

Во втором случае происходит лишь задание возможных значений составности m модулей (составов).

7. Дислокация дополнительных секций в моторвагонном депо для корректировки составности.

Как указано в разделе 4.2, в депо предусматривается изначальная дислокация фиктивных составов Y_{zd}^m , которые задаются пользователем, исходя из возможных значений составности. При изменении составности один состав меняется на другой. Количество прицепляемых (отцепляемых) вагонов – это разность между составностью прибывшего в депо состава и условно выдаваемого взамен него.

8. Задание константных ограничений, предусмотренных в модели:

a – средняя вместимость одного вагона МВПС, пасс;

$\alpha_{исп}$ – коэффициент использования вместимости вагонов;

l_m – длины модулей составностью m , м (таблица 4.6)

Таблица 4.6 – Указание длин модулей разной составности

Составность, ваг (m)	Длина, м
2	l_2
4	l_4
6	l_6

$L_{Sb}^{норм}$ – норма длины пригородного поезда на участке Sb , м (таблица 4.7)

Таблица 4.7 – Указание норм длины пригородных поездов по участкам

Участок (Sb)	Норма длины, м
АБ	$L_{АБ}^{норм}$
БВ	$L_{БВ}^{норм}$
ВД	$L_{ВД}^{норм}$
АВ	$L_{АВ}^{норм}$
ВГ	$L_{ВГ}^{норм}$

$N_{ПОП}$ – количество приемоотправочных путей, предназначенных для приема-отправления пригородных поездов (таблица 4.8).

$\sum L_s^i$ – суммарная полезная длина путей отстоя, предназначенных для отстоя МВПС на станции S , м (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Указание количества приемоотправочных путей и суммарной полезной длины путей отстоя пригородных поездов

Станция (S)	Количество приемоотправочных путей, шт	Суммарная длина путей отстоя, м
А	$N_{ПОП}^A$	$\sum L_A^i$
Б	$N_{ПОП}^B$	$\sum L_B^i$
В	$N_{ПОП}^B$	$\sum L_B^i$
Г	$N_{ПОП}^Г$	$\sum L_Г^i$
Д	$N_{ПОП}^Д$	$\sum L_Д^i$

D – количество одновременно подаваемых в депо модулей МВПС

D_d – количество одновременно находящихся в депо составов

Кроме вышперечисленного, указываются стоимостные коэффициенты c , перечень которых приведен в таблице 4.1.

4.4. Планирование и прогнозирование пассажиропотоков

Прежде чем задать пассажиропотоки в модели, необходимо их вычислить для конкретных поездов на конкретные сутки. Для этого следует построить прогноз пассажиропотоков [96-99]. Воспользуемся методикой трехслойного прогнозирования пассажиропотоков, которая состоит из 7 этапов [100-101].

Этап 1. Определение значений макроэкономических и социально-экономических показателей на плановый период.

Данный этап может быть выполнен двумя способами:

- 1) на основе метода экстраполяции трендов;
- 2) на основе прогнозных значений федеральных и региональных министерств и ведомств, а также стратегических документов.

Два показателя определяются для региона в целом (ВРП, уровень автомобилизации населения), а остальные (численность тяготеющего к железной дороге населения, уровень занятости, средняя реальная заработная плата, уровень бедности) – для муниципальных районов, входящих в полигоны обслуживания ППК. Для прогноза по полигону определяются средние значения показателей по муниципалитетам:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m}, \quad (4.26)$$

где x_{ij} – i -й социально-экономический показатель j -го муниципального района;

m – число муниципальных районов в границах одного полигона.

Этап 2. Определение значения индекса удовлетворенности в поездах разных категорий на плановый период.

Вычисление прогнозного индекса базируется исключительно на основе метода экстраполяции трендов. Однако для его проведения необходимо систематически (ежеквартально) проводить реальный мониторинг уровня удовлетворенности. Исследование должно проводиться по выделенным полигонам обслуживания. При идеальном варианте за год должно быть проведено обследование всех поездов маршрутной сети.

Этап 3. Определение годового прогнозного пассажиропотока по полигонам.

Определение пассажиропотока – это задача маркетингового блока пригородных пассажирских компаний. Маркетинговым исследованиям в пригородных перевозках, а также исследованиям пассажиропотока, населенности пригородных поездов посвящены исследования Белозерова В.Л., Бывшева С.А., Гаусмана Р.Г., Голубкова Е.П., Гольц Г.А., Латышева А.Г., Лукашева В.И., Польшцева Е.П., Правдина Н.В., Сая В.М. и других ученых [102–112].

Ежегодно собирается статистика по годовому размеру пассажиропотока на полигоне, а также значения всех показателей. Проводится факторный анализ и определяется уравнение множественной линейной регрессии. На основе прогнозных значений факторов (из этапов 1 и 2) рассчитывается прогноз годового пассажиропотока на полигоне, а также среднемесячное его значение:

$$\begin{aligned} A_{\text{прог}}^{\text{год}} &= \sum_{i=1}^n a_i x_i + b; \\ A_{\text{прог}}^{\text{мес}} &= \frac{A_{\text{прог}}^{\text{год}}}{12}, \end{aligned} \quad (4.27)$$

где a_i – коэффициенты множественной линейной регрессии для i -х факторов;
 b – свободный член уравнения множественной линейной регрессии.

В настоящее время прогноз пассажиропотока, ввиду невысокой достоверности факторного анализа, можно осуществлять также при помощи метода экстраполяции трендов.

Этап 4. Определение характерной для полигона внутригодовой (месячной) неравномерности.

Несмотря на то что по итогам анализа месячный пассажиропоток можно назвать зависимым от климатических факторов, прогнозировать значения температуры и осадков на длительный период невозможно. Известно только, что в регионах исторически под влиянием уровня жизни людей, их привычек, традиций, ожиданий, сложилось особое распределение пассажиропотока в течение года. Разумеется, оно может изменяться. Поэтому каждый год определяются следующие величины.

1. Среднемесячный пассажиропоток на полигоне за предшествующие периоды:

$$A_{\text{ср}}^{\text{мес}} = \frac{\sum A_{\text{год}}}{n \cdot 12}, \quad (4.28)$$

2. Коэффициенты месячной неравномерности на полигоне за предшествующие периоды:

$$k_{\text{нер}}^{i-\text{мес}} = \frac{A_{\text{ср}}^{\text{мес}}}{A_{\text{ср}}^{i-\text{мес}}}, \quad (4.29)$$

где $A_{\text{ср}}^{i-\text{мес}}$ – средние значения пассажиропотока за i -й месяц года.

3) Определение коэффициента индексации пассажиропотока:

$$k_{\text{инд}}^{\text{мес}} = \frac{A_{\text{прог}}^{\text{мес}}}{A_{\text{ср}}^{\text{мес}}}, \quad (4.30)$$

Этап 5. Определение характерной для полигона внутринедельной неравномерности.

1. Среднесуточный пассажиропоток на полигоне за предшествующие периоды:

$$A_{\text{ср}}^{\text{сут}} = \frac{\sum A_{\text{год}}}{n \cdot 12 \cdot 365}, \quad (4.31)$$

2. Коэффициенты внутринедельной (посуточной) неравномерности на полигоне за предшествующие периоды:

$$k_{\text{нер}}^{i\text{-сут}} = \frac{A_{\text{ср}}^{\text{сут}}}{A_{\text{ср}}^{i\text{-сут}}}, \quad (4.32)$$

где $A_{\text{ср}}^{i\text{-мес}}$ – средние значения пассажиропотока за i -й день недели.

Этап 6. Оперативное прогнозирование на неделю в зависимости от климатических параметров.

1. Выполнение факторного анализа за предшествующие периоды с целью уточнения коэффициентов регрессии на конкретном полигоне обслуживания (производится раз в год во время годового планирования).

2. На предстоящую неделю по данным Гидрометцентра определяется прогнозная среднесуточная температура и уровни осадков. Согласно уравнению регрессии, полученного по итогам факторного анализа, рассчитываем потенциальное значение пассажиропотока:

$$A_{\text{прог-кл}}^{\text{сут}} = a_T \cdot x_T + a_O \cdot x_O + b_{\text{кл}}, \quad (4.33)$$

где $a_{T,O}$ – коэффициенты множественной линейной регрессии для климатических факторов (температура и осадки);

$b_{\text{кл}}$ – свободный член уравнения множественной линейной регрессии.

3. Находим коэффициент индексации пассажиропотока по климатическим параметрам:

$$k_{\text{инд}}^{\text{клим}} = \frac{A_{\text{прог-кл}}^{\text{сут}}}{A_{\text{ср}}^{\text{сут}}}, \quad (4.34)$$

Этап 7. Оперативное посуточное прогнозирование максимальной густоты пассажиропотока по поездам на предстоящую неделю.

1. Определение средней максимальной густоты пассажиропотока каждого поезда маршрутной сети за прошлые периоды на основе постанционной отчетности АСУ ППК (производится раз в год во время годового планирования).

2. Расчет плановой густоты по каждому поезду на каждые сутки путем произведения средней максимальной густоты пассажиропотока каждого поезда на найденные коэффициенты неравномерности и индексации:

$$\Gamma_{\text{мах}}^{\text{прог-р}} = \Gamma_{\text{мах}}^{\text{ср-р}} \cdot k_{\text{инд}}^{\text{мес}} \cdot k_{\text{нер}}^{i-\text{мес}} \cdot k_{\text{нер}}^{i-\text{сут}} \cdot k_{\text{инд}}^{\text{клим}}, \quad (4.35)$$

4.5. Годовое и месячное планирование

На основе проведённых исследований предлагается организовать систему гибкого регулирования составности пригородных поездов с использованием

автоматизированной системы управления пригородной пассажирской компанией (АСУ ППК) (рисунок 4.14).

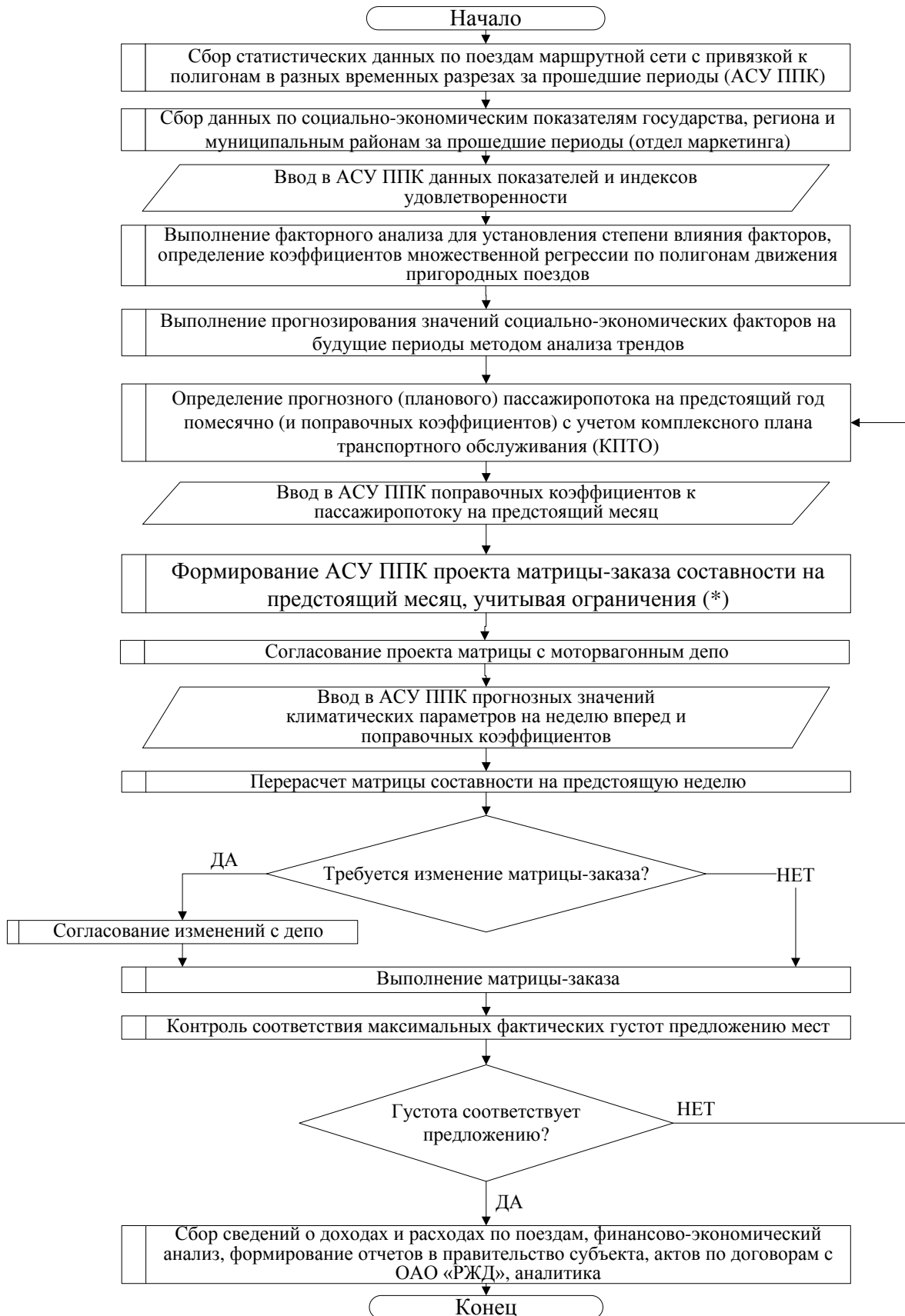


Рисунок 4.14 – Общий алгоритм гибкого регулирования составности [90]

АСУ ППК является источником данных о пассажиропотоках пригородных поездов большинства регионов страны. Разрабатываемая аналитическая подсистема АСУ ППК позволит выполнить исследование зависимости пригородных пассажиропотоков от социально-экономических, климатических и иных факторов, потенциально влияющих на пассажиропоток. На основе прогнозных данных о пассажиропотоке, а также при интеграции со смежными системами ОАО «РЖД» появится возможность реализации модуля поддержки принятия управленческих решений АСУ ППК (далее – модуль ППР) (рисунок 4.15).

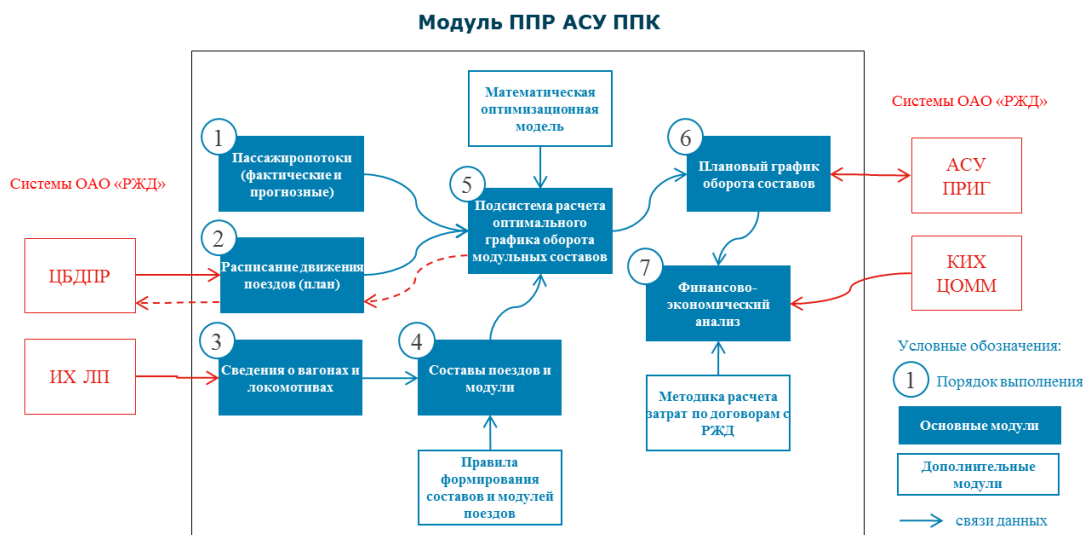


Рисунок 4.15 – Подсистема поддержки принятия решений АСУ ППК

Сведения о пассажиропотоках накапливаются в базе данных АСУ ППК отдельно по каждому поезду за каждые сутки курсирования. Прогнозный пассажиропоток может быть рассчитан в соответствии с разделом 4.4, а также на основании данных о предварительной продаже билетов на пригородные поезда с указанием мест, бронировании перевозок организованных групп пассажиров и иных факторов (организация фестивалей, экскурсий, паломнических поездок и прочее).

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 (совместимости вагонов, минимальной составности, возможности объединения составов по СМЕ, прицепки-отцепки вагонов в условиях депо) производится задание пула составов для перевозчика.

Расчетный модуль ППР использует предложенную модель для оптимального варианта, который в развёрнутом во времени виде представляет собой динамический график оборота составов. График в виде плана может быть выдан в депо (система АСУ ПРИГ).

С учетом оперативных изменений (в том числе непредвиденных отказов) фактический график оборота может отличаться от расчетного. Модуль финансово-экономического анализа позволяет перевозчику автоматизировать процесс вычисления плановых и фактических затрат для выполнения взаиморасчетов по договорам с ОАО «РЖД». Факт оборота моторвагонного подвижного состава может быть импортирован из системы КИХ ЦОММ (хранилище маршрутов машиниста).

Для выполнения транспортного заказа субъектов Российской Федерации от пригородной пассажирской компании требуется заблаговременно разработать и согласовать с ответственными подразделениями владельца инфраструктуры (региональная служба по развитию пассажирских сообщений и предоставления доступа к инфраструктуре, отдел разработки нормативных графиков службы движения поездов) маршрутную сеть.

Для определения затрат на организацию перевозок в предстоящем периоде ППК необходимо произвести их расчет, при этом затраты должны быть обоснованы. С целью планирования затрат на предстоящий период (календарный

год) выполняется предварительный расчет графика оборота модульных составов. Данный алгоритм выглядит следующим образом:

1. Сбор статистики из базы данных АСУ ППК по поездам, определение пиковых густот пассажиропотоков в каждом поезде на каждые сутки за предыдущий период с поправкой на дни недели (рисунок 4.16).

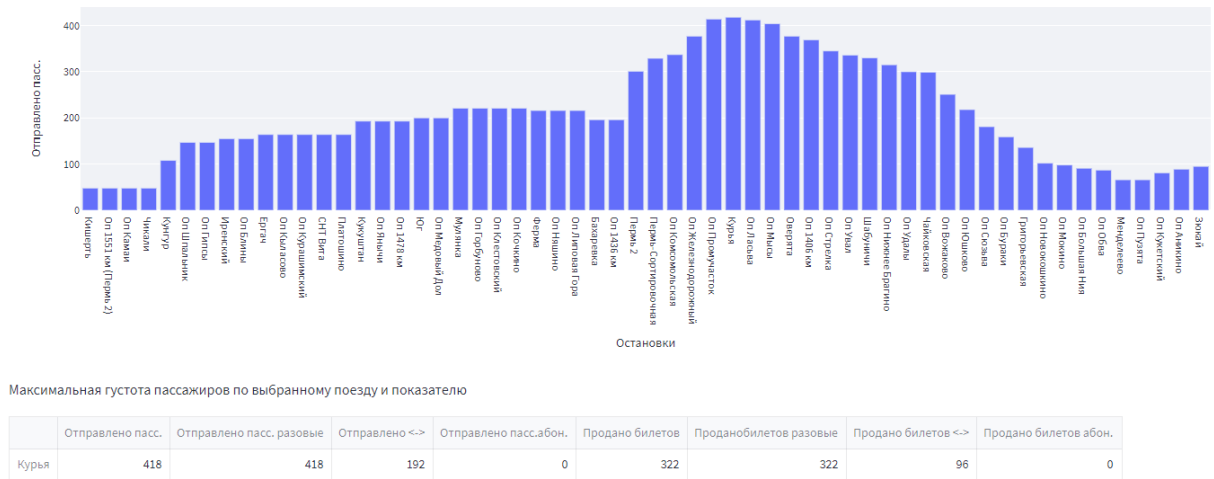


Рисунок 4.16 – Определение пиковых густот пассажиропотоков

Поправка приводит в соответствие дни недели предыдущего периода и последующего периода, так как пригородные перевозки имеют ярко выраженную внутринедельную неравномерность.

2. Выполняется прогнозирование пассажиропотока на предстоящий период (год) в соответствии с методикой, изложенной в разделе 4.4. По итогам расчетов вычисляются коэффициенты индексации по отношению к базовому периоду (для 2023 года базовым периодом будет 2021 год). Значения пиковых густот индексируются.

3. В систему АСУ ППК импортируется предварительный график движения поездов из ЦБДПР.

4. Выполняется расчет оптимального графика оборота:

– определяется необходимая (минимальная) составность поездов на каждые сутки предстоящего периода, исходя из параметров, задаваемых

перевозчиком (вместимости разных типов вагонов, коэффициент использования мест);

- выполняется непосредственно расчет графика оборота с использованием разработанной математической модели (в случае наличия на полигоне несовместимого подвижного состава потребуется постановка задачи по количеству типов поездов);

- определяется расчетная составность каждого поезда на каждые сутки предстоящего периода, исходя из сформированного динамического графика оборота;

- определяется потребный парк вагонов каждого типа подвижного состава для обслуживания заданной маршрутной сети и необходимые резервы.

5. АСУ ППК передаёт в систему АСУ ПРИГ информацию для согласования ее в моторвагонное депо, при необходимости выполняется расчет оптимального графика оборота с дополнительно внесенными ограничениями. При согласовании графика и матрицы-заказа составности моторвагонным депо, руководство депо планирует затраты на эксплуатацию моторвагонного парка, планово-предупредительные ремонты, техническое обслуживание, ТЭР и фонд заработной платы.

6. При возможности сдвижки ниток графика АСУ ППК формирует предложения по корректировке графика движения пригородных поездов для более эффективного использования подвижного состава. Предложения анализируются на предмет качества транспортного обслуживания жителей региона. В случае допустимости корректировки, они передаются владельцу инфраструктуры. При частичном принятии предложений выполняется перерасчет графика оборота и дополнительное согласование с моторвагонным депо.

7. На основе матрицы составности (рисунок 4.17) и потребного количества вагонного парка в соответствии с согласованным графиком оборота АСУ ППК автоматически формирует плановые затраты пригородной компании по

договорам с владельцем инфраструктуры (или собственные затраты, если моторвагонный парк находится в собственности перевозчика).

№ п/п	№ поезда	Станция отправления	Станция назначения	Время отправления	Время прибытия	Время в пути (в дождь)	Расстояние, км	Дискурсоразличия	Кол-во дней движения	Кол-во вагонов	Количество вагонов в составах по дням месяца										Вып. ваг.	Вып. чис.	Поездо-чис.	Поездо-ваг.	Средняя составность						
											Чт	Пт	Сб	Вс	Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб											
											1	2	3	4	5	6	7	8	9	10											
Полигон "Главное направление-Запад"																															
1	7151	Перьм-2	Верещагино	4:40	7:00	2,33	120	Ежедневно	31	132	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	15840	307,56	72,23	3720	4,26				
2,1	6061	Верещагино	Шныры	7:06	7:54	0,80	40	Ежедневно	31	132	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	5280	105,60	24,80	1240	4,26				
2,2	6061	Шныры	Балезино	7:54	9:39	1,75	83	Ежедневно	31	132	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	10956	231,00	54,25	2573	4,26				
3,1	7156	Балезино	Шныры	14:28	16:05	1,62	83	Ежедневно	31	132	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	10956	213,84	50,22	2573	4,26				
3,2	7156	Шныры	Верещагино	16:05	16:48	0,71	40	Ежедневно	31	132	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	5280	93,72	22,01	1240	4,26				
4	6010	Верещагино	Перьм-2	16:51	19:21	2,50	120	Ежедневно	31	132	4	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	15840	330,00	77,50	3720	4,26				
5	6007	Перьм-2	Верещагино	15:40	18:17	2,62	120	Ежедневно	31	134	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	16080	351,08	81,22	3720	4,32					
6,1	7155	Верещагино	Шныры	18:36	19:25	0,82	40	Ежедневно	31	134	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	5360	109,88	25,42	1240	4,32					
6,2	7155	Шныры	Балезино	19:25	21:01	1,60	83	Ежедневно	31	134	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	4	11122	214,40	49,60	2573	4,32					
7,1	7152	Балезино	Шныры	3:33	5:10	1,62	83	Ежедневно	31	134	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	11122	217,08	50,22	2573	4,32					
7,2	7152	Шныры	Верещагино	5:10	5:54	0,73	40	Ежедневно	31	134	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	5360	97,82	22,63	1240	4,32					
8	6004	Верещагино	Перьм-2	6:05	8:34	2,48	120	Ежедневно	31	134	4	4	6	4	4	4	4	4	4	4	6	16080	332,32	76,88	3720	4,32					
9	6003	Перьм-2	Верещагино	7:00	9:35	2,58	120	Ежедневно	31	204	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	8	24480	526,32	79,98	3720	6,58					
10	6006	Верещагино	Перьм-2	12:40	15:08	2,47	120	Ежедневно	31	204	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	8	24480	503,88	76,57	3720	6,58					
11	6005	Перьм-2	Верещагино	11:10	13:45	2,58	120	Ежедневно	31	204	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	8	24480	526,32	79,98	3720	6,58					
12	6008	Верещагино	Перьм-2	14:55	17:22	2,45	120	Ежедневно	31	204	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	8	24480	499,80	75,95	3720	6,58					
13	6009	Перьм-2	Верещагино	18:43	21:17	2,57	120	Ежедневно	31	142	4	6	4	6	4	4	4	4	4	4	6	4	17040	364,94	79,67	3720	4,58				
14	6002	Верещагино	Перьм-2	2:31	4:59	2,47	120	Ежедневно	31	142	4	4	6	4	6	4	4	4	4	4	6	17040	350,74	76,57	3720	4,58					
15	6022	Григорьевская	Перьм-2	4:20	5:49	1,48	65	Ежедневно	31	124	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	8060	183,52	45,88	2015	4,00					

Рисунок 4.17 – Матрица составности пригородных поездов

8. Плановые затраты компания использует при составлении собственного бюджета на предстоящий период и предъявляет субъекту для расчета экономически обоснованных тарифов для населения.

С учетом функционирования пригородного комплекса предложен бизнес-процесс годового планирования в соответствии с методологией ARIS (рисунок 4.18).

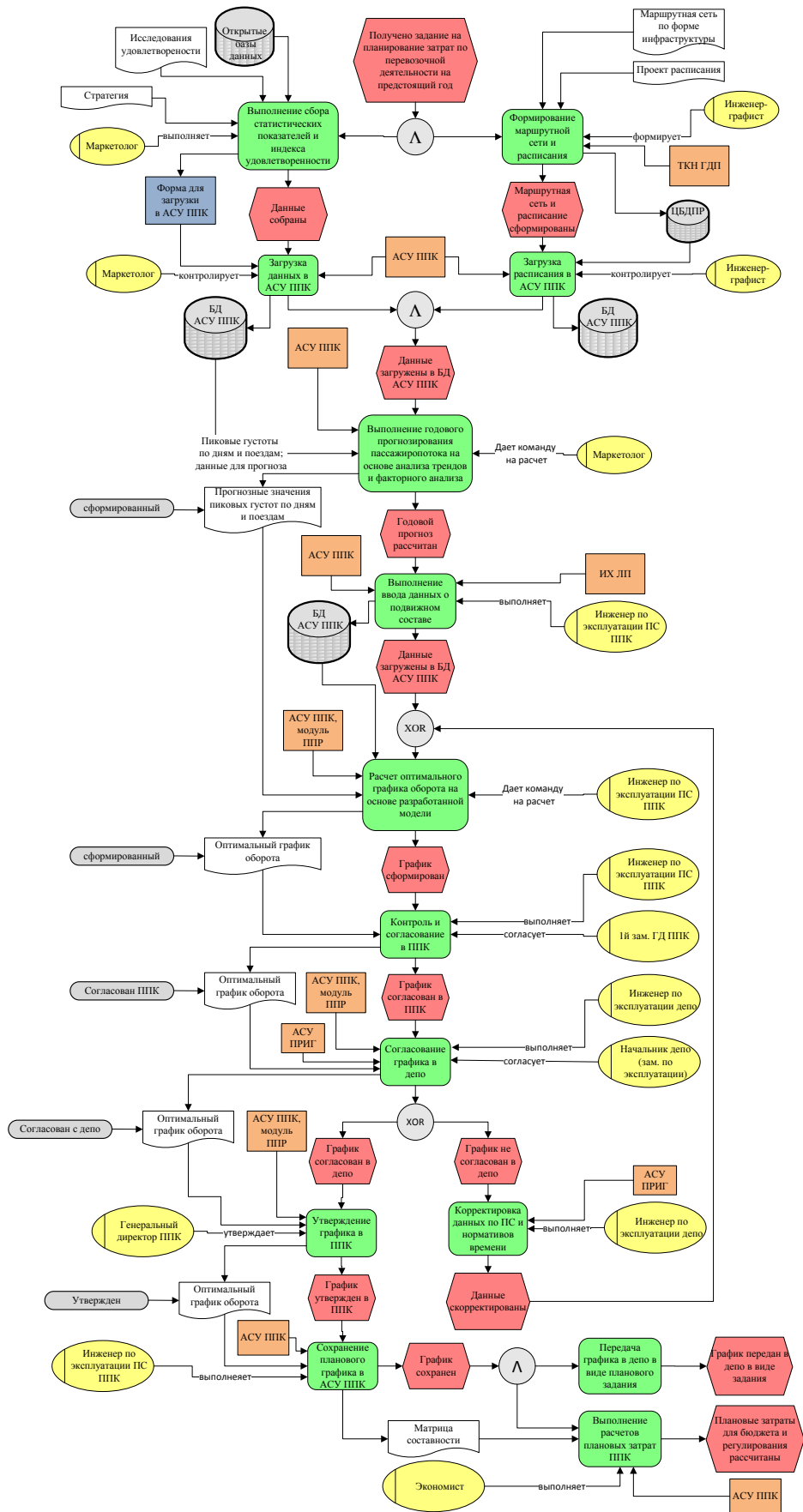


Рисунок 4.18 – Бизнес-процесс планирования на календарный год

Не позднее чем за 10 дней до начала месяца перевозчик выполняет процедуру месячного планирования размеров движения, исходя из маршрутной сети в соответствии с договорами транспортного обслуживания населения с субъектами РФ. Данный алгоритм выглядит следующим образом:

1. Инструментами АСУ ППК производится дополнительное прогнозирование пассажиропотока по конкретным поездам в зависимости от текущих объемов перевозок, наличия заявок на перевозку организованных групп, массовых событий, фестивалей, праздников, включения в график коммерческих (целевых) и туристических поездов и др.

2. В систему АСУ ППК импортируется график движения поездов на предстоящий месяц из ЦБДПР с учетом плановых изменений, наличия технологических окон.

3. Выполняется расчет оптимального графика оборота на предстоящий месяц, формируется матрица-заказ для моторвагонного депо. При выполнении расчета дислокация составов на полигоне задается в соответствии с расстановкой на конец предыдущего расчетного периода (месяца) или с учетом недельной оперативной корректировки.

4. АСУ ППК передаёт в систему АСУ ПРИГ информацию для согласования ее в моторвагонное депо, при необходимости выполняется перерасчет графика оборота.

5. Согласованная матрица-заказ и динамический график оборота являются плановым заданием эксплуатационной работы для моторвагонного депо.

Бизнес-процесс месячного планирования в соответствии с методологией ARIS представлен на рисунке 4.19.

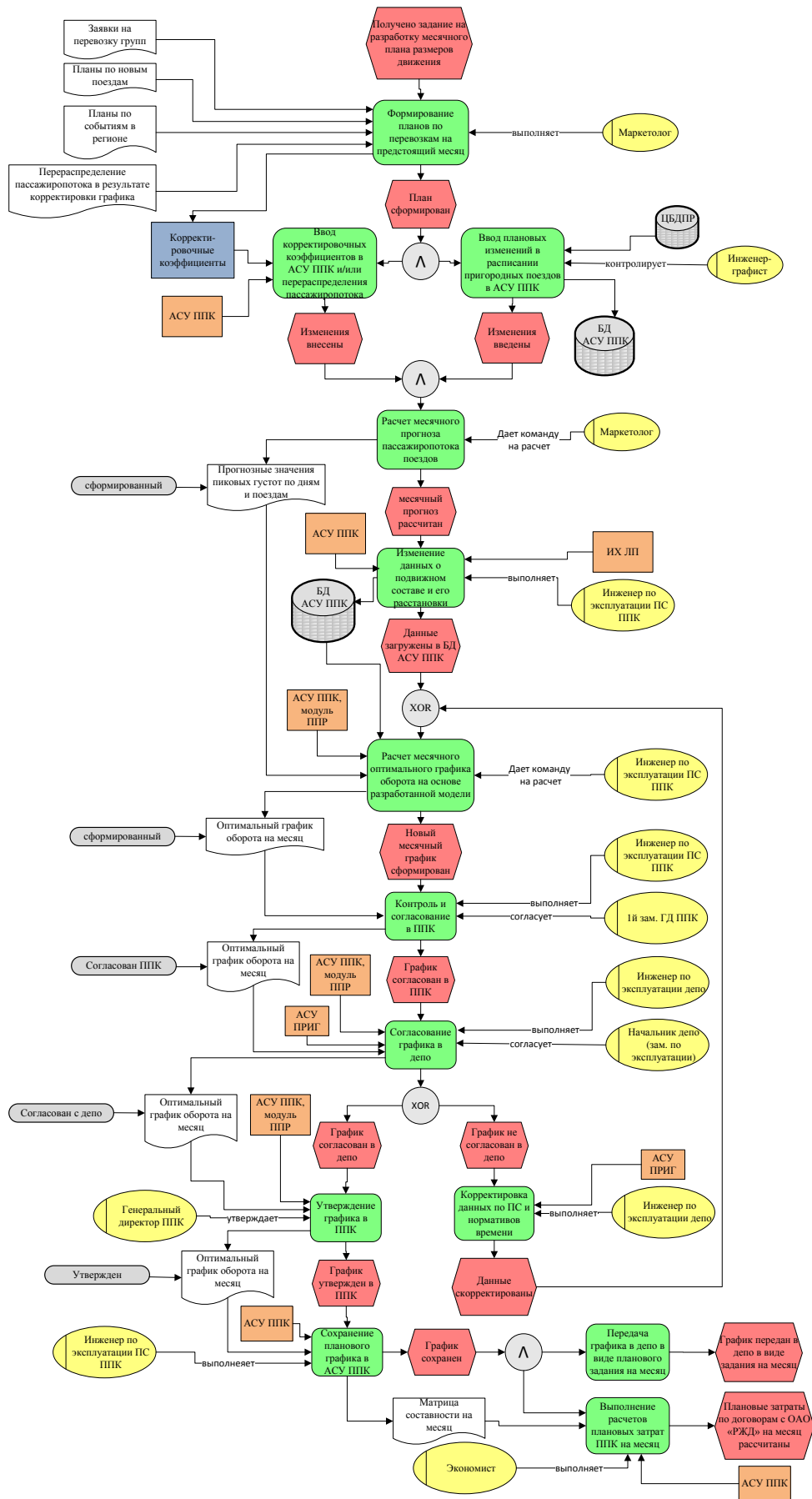


Рисунок 4.19 – Бизнес-процесс расчета планового задания на предстоящий месяц

4.6. Оперативное планирование и регулирование

Оперативное управление включает комплекс мероприятий, обеспечивающих рациональное использование пригородного подвижного состава и пропускных способностей железнодорожных участков при качественном удовлетворении потребностей населения городских агломераций.

Цикл процесса управления включает следующие основные этапы:

- контроль за состоянием перевозочного процесса в пригородном сообщении на основе собранной информации;
- выявление имеющихся и ожидаемых отклонений от планового графика оборота;
- разработка возможных вариантов предупреждения ожидаемых отклонений от нормального течения перевозочного процесса;
- оценка сравнительной эффективности возможных решений на основе формальных и неформальных критериев;
- оформление выбранного решения в виде приказа, указания и т. п.;
- контроль за исполнением принятых решений.

К числу регулировочных мероприятий относят оперативную корректировку вместимости составов, размеров движения пригородных поездов и протяженности маршрутов следования. Разработать оптимальный вариант оперативного решения позволяет применение метода расчета графика оборота модульных пригородных составов.

Значительные корректировки графика движения пригородных поездов возникают в связи с технологическими окнами. Перераспределение пассажиропотока происходит в связи с проведением ремонтных работ на автомобильных дорогах и из-за других факторов. Необходимо отслеживать наличие высокого спроса на пригородные перевозки, бронирование мест организованными группами пассажиров. Изменение спроса происходит и при резких скачках климатических параметров, особенно в летний период.

Для организации работы моторвагонного депо используется механизм оперативного регулирования графика оборота модульных составов. Оперативное планирование на предстоящую неделю выполняется не позднее четверга текущей недели и производится в соответствии с алгоритмом:

1. Инструментами АСУ ППК производится дополнительное прогнозирование пассажиропотока по конкретным поездам, выполняется ввод поправочных коэффициентов, при необходимости задается перераспределение пассажиропотока.

2. В систему АСУ ППК импортируется график движения поездов на предстоящую неделю из ЦБДПР с учетом плановых изменений и наличия технологических окон.

3. Выполняется расчет оптимального графика оборота составов на предстоящую неделю, формируется динамический график, а на его основе – скорректированная матрица-заказ на составность поездов для моторвагонного депо. При выполнении расчета дислокация составов на полигоне задается в соответствии с расстановкой на воскресенье текущей недели или с последней недельной оперативной корректировкой.

4. АСУ ППК передаёт в систему АСУ ПРИГ информацию для согласования ее в моторвагонное депо, при необходимости выполняется перерасчет графика оборота с дополнительными ограничениями.

5. Согласованная матрица-заказ и динамический график оборота являются оперативным заданием для эксплуатационной работы моторвагонного депо.

6. При оперативной корректировке на основании согласованных заявок и динамических графиков оборота АСУ ППК автоматически пересчитывает плановые месячные затраты пригородной компании по договорам с ОАО «РЖД».

Бизнес-процесс оперативного планирования приведен на рисунке 4.20.

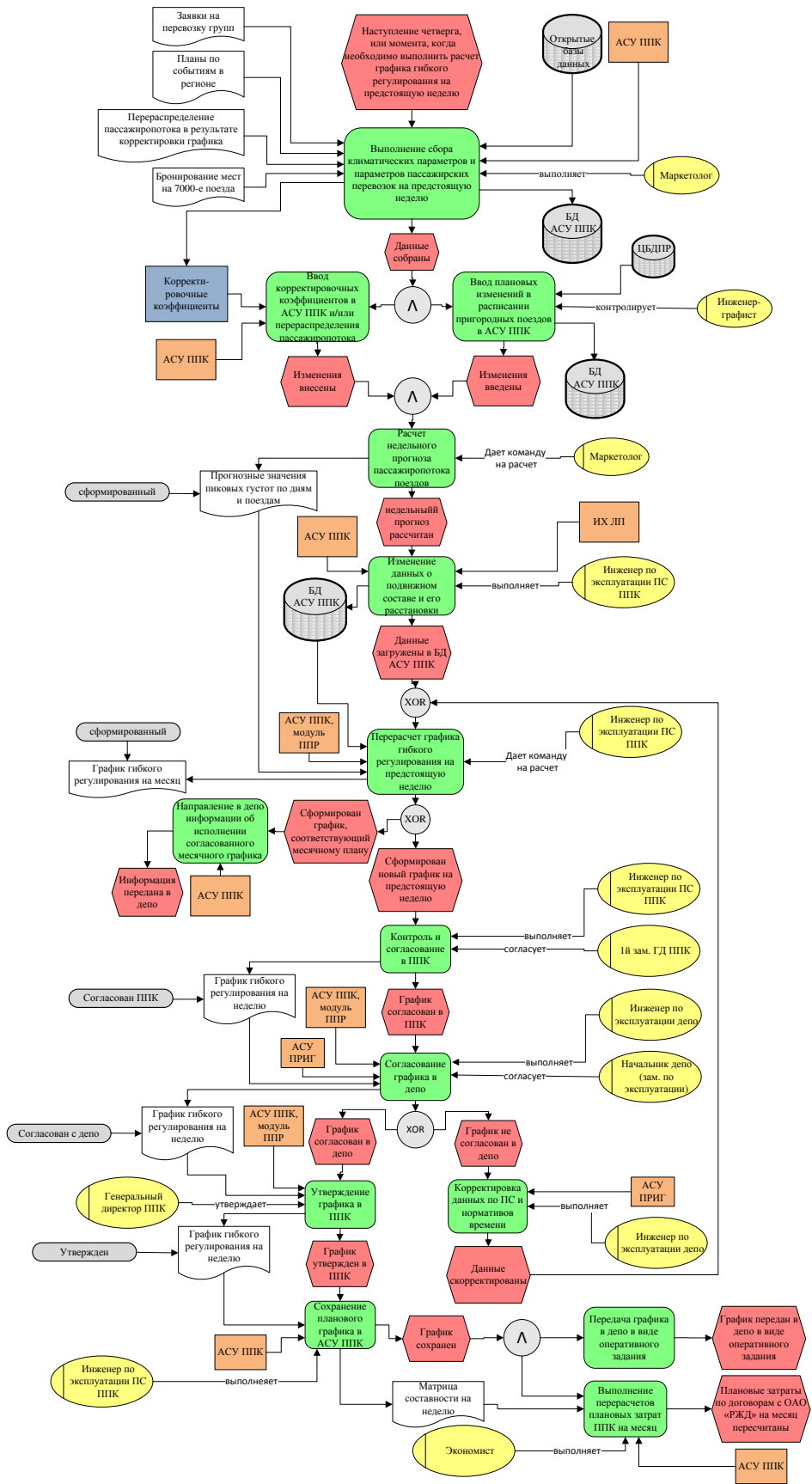


Рисунок 4.20 – Бизнес-процесс оперативного планирования на предстоящую неделю

4.7. Реализация функции учета и анализа

Согласованная матрица-заказ и динамический график оборота являются плановым заданием эксплуатационной работы для моторвагонного депо.

С учетом оперативных изменений и непредвиденных отказов исполненный график оборота может отличаться от расчетного. Модуль финансово-экономического анализа позволяет перевозчику импортировать данные из регистров учета системы КИХ ЦОММ. В этом хранилище находится информация с обработанных маршрутов машиниста. Затем наступает очередь автоматизированного процесса вычисления фактических показателей для анализа и выполнения взаиморасчетов по договорам с ОАО «РЖД».

Расчет фактических затрат по выполнению государственного заказа производится на основе информации из 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, если был выдан неполный состав, или по заявке – если количество вагонов больше планового.

После фиксирования учетных показателей выполняется план-фактный анализ. Производится сопоставление фактического предложения мест, как с плановым показателем, так и с фактическим пассажиропотоком. 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 и план-фактного анализа затрат 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 4.21.

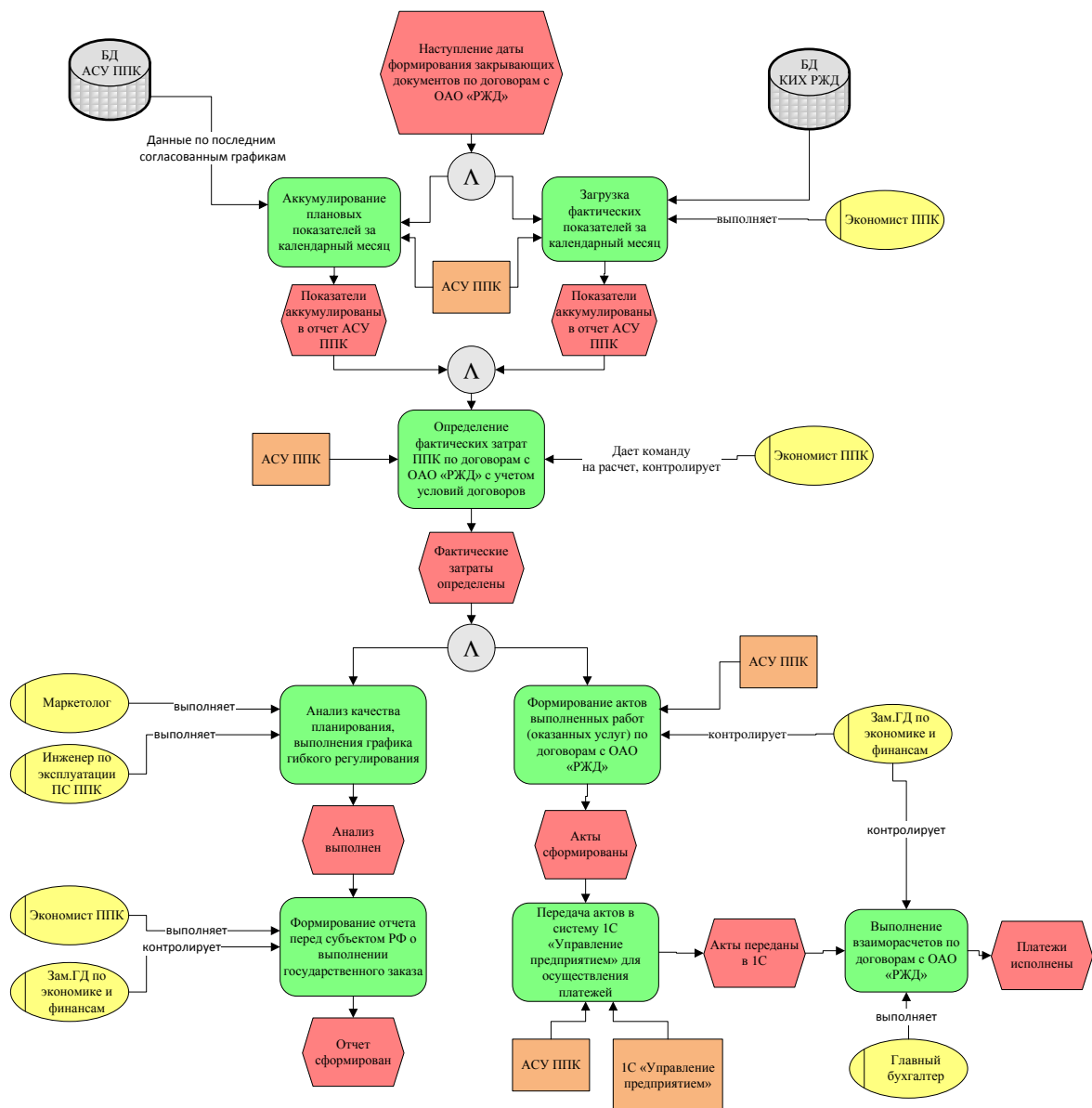


Рисунок 4.21 – Бизнес-процесс расчетов ППК по договорам с ОАО «РЖД»

4.8. Рекомендации для возможного применения гибкого регулирования составности

Анализ текущей структуры парка моторвагонного подвижного состава с учетом текущих и возможных технических характеристик, а также размеров пассажиропотоков на полигонах пригородных пассажирских компаний позволил сформировать рекомендации по регулированию составности и организации модульного движения.

Модули и их составность являются исходными данными в предложенной модели и не могут быть изменены по ходу расчета. Невозможность непосредственно рассчитать оптимальную комбинацию составов из разных эксплуатируемых модулей является одним из ограничений применения разработанной технологии. Поэтому при расчете рационального графика оборота необходимо проверять несколько вариантов с различной комбинацией модулей. Количество комбинаций зависит от технических характеристик подвижного состава. Возможные варианты эксплуатации моторвагонного подвижного состава разных типов и серий по пригородным компаниям приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Варианты эксплуатации моторвагонного подвижного состава разных типов и серий по пригородным компаниям

Наименование ППК	Тип ПС								
	МВПС переменного тока			МВПС постоянного тока			Автономный МВПС		
	Серии МВПС	Варианты эксплуатации и по СМЕ	Составность, ваг.	Серии МВПС	Варианты эксплуатации и по СМЕ	Составность, ваг.	Серии МВПС	Варианты эксплуатации и по СМЕ	Составность, ваг.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
АО "ПК "Сахалин""	-	-	-	-	-	-	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
АО "Экспресс Приморья"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭД9Т, ЭПЗД, ЭР9МК	4+4	4, 6	-	-	-	-	-	
АО "Забайкальская ППК"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭПЗД	4+4	4, 6	-	-	-	-	-	
АО "Байкальская ППК"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭД9Т, ЭПЗД, ЭР9Т	4+4	4, 6	-	-	-	РА-1	1+1	1
	-	-	-	-	-	-	РА-2	2+2	2
АО "Краспригород"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭД9Т, ЭД9Э, ЭПЗД	4+4	4, 6	-	-	-	-	-	
АО "Кузбасс-пригород"	-	-	-	ЭД4М, ЭД4МК, ЭР2К, ЭР2Т	4+4	4, 6	-	-	
	-	-	-	ЭП2Д*	4+4	4, 6	-	-	
АО "Алтай-Пригород"	ЭД9М, ЭД9Т, ЭД9Э	4+4	4, 6	-	-	-	-	-	
АО "Экспресс-пригород"	-	-	-	ЭД2Т, ЭД4М, ЭД4МК, ЭТ2М	4+4	4, 6, 8	-	-	
	-	-	-	ЭП2Д*	4+4	4, 6, 8	-	-	
АО "Омск-пригород"	-	-	-	ЭД4М, ЭР2К	4+4	4, 6	-	-	
	-	-	-	ЭП2Д*	4+4	4, 6	-	-	
АО "Свердловская ППК"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭД9Т	4+4	4, 6	ЭД2Т, ЭД4М, ЭД4МК, ЭТ2, ЭТ2М, ЭТ2МР	4+4	4, 6	РА-1	1+1	2
	ЭС1П "Ласточка"	5+5	5	ЭП2Д*	4+4	4, 6	РА-2	3+3	3
	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
АО "Пермская ППК"	-	-	-	ЭД2Т, ЭД4М, ЭД4М1, ЭД4МК	4+4	4, 6, 8	РА-2	3+3	3
	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка", ЭС1 "Ласточка"	5+5	5	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
АО "Башкортостанская ППК"	-	-	-	ЭД4М, ЭТ2М	4+4	4, 6	РА-1	1+1	1
	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5	РА-2	3+3	3

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	-	-		ЭП2Д*	4+4	4, 6	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
АО "Самарская ППК"	-	-		ЭД4М, ЭД4МК	4+4	4, 6	-	-	
	-	-		ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5	-	-	
АО "Саратовская ППК"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭД9Т, ЭД9Э, ЭПЗД, ЭР9Т	4+4	4, 6	-	-	-	РА-1	1+1	1
	-	-		-	-	-	РА-2	3+3	3
АО "Волгоградтрансп ригород"	ЭД9М, ЭД9Э, ЭПЗД	4+4	4, 6	-	-	-	РА-1	1+1	1
	-	-		-	-	-	РА-2	3+3	3
АО "Северо- Кавказская ППК"	ЭД9М, ЭД9Э, ЭПЗД	4+4	4, 6	ЭД4М	4+4	4, 6	РА-1	1+1	1
	ЭС1 "Ласточка"	5+5	5	-	-	-	РА-2	3+3	3
	-	-		-	-	-	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
АО "Кубань Экспресс- Пригород"	ЭД9М, ЭД9МК	4+4	4, 6	ЭД4М	4+4, 4+6	4, 6	РА-1	1+1	1
	-	-		ЭС1 "Ласточка "	5+5	5	-	-	
АО "ППК "Черноземье""	ЭД9М, ЭД9Т, ЭПЗД, ЭР9Т	4+4	4, 6	ЭД4, ЭД4М	4+4	4, 6	РА-1	1+1	1
	-	-		ЭП2Д*	4+4	4, 6	РА-2	3+3	3
АО "Содружество"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭД9Э	4+4	4, 6	-	-	-	РА-1	1+1	1
	-	-		-	-	-	РА-2	3+3	3
	-	-		-	-	-	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
АО "Волго- Вятская ППК"	ЭД9М, ЭД9МК, ЭД9Т, ЭД9Э, ЭПЗД	4+4	4, 6	-	-	-	РА-1	1+1	1
	-	-		-	-	-	РА-2	3+3	3
	-	-		-	-	-	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
АО "Северная ППК"	ЭД9М, ЭД9Т	4+4	4, 6	ЭД2Т, ЭД4М	4+4	4, 6	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
	-	-	-	ЭП2Д*	4+4	4, 6	-	-	
АО "Северо-Западная ППК"	ЭД9М, ЭД9Т	4+4	4, 6	ЭД2Т, ЭД4М, ЭД4МК, ЭР2К, ЭР2Т, ЭТ2, ЭТ2Л, ЭТ2М, ЭТ2МЛ, ЭТ2ЭМ, ЭТ4А	4+4, 4+6, 6+6	4, 6, 8, 10	РА-1	1+1	1
	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5, 7	РА-2	3+3	3
	-	-	-	-	-	-	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
АО "Московско-Тверская ППК"	-	-	-	ЭТ2М	4+4, 4+6	11	-	-	
	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5, 10	РА-1	1+1	1
АО "Калининградская ППК"	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5	-	-	
АО "Центральная ППК"	-	-	-	ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭД4, ЭД4М, ЭД4МК	4+4, 6+4, 6+6	4, 6, 8, 9, 11	РА-2	3+3	3
	-	-	-	ЭП2Д*	-	11	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5, 10	-	-	
	-	-	-	ЭГ2Тв "Иволга"	-	11	-	-	
ООО "Южная ППК"	-	-	-	ЭД4М	4+4	4, 6	РА-2	3+3	3
	-	-	-	ЭП2Д*	4+4	4, 6	РА-3	2+2, 2+3, 3+3	2, 3
ООО "Аэроэкспресс"	-	-	-	ЭД4М	-	-	-	-	-
	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	-	-	-	-	-
	-	-	-	ЭШ2	-	-	-	-	-
ДОСС (МЦК)	-	-	-	ЭС2Г "Ласточка"	5+5	5, 10	-	-	-

Базовыми технически возможными и универсальными вариантами эксплуатации моторвагонного подвижного состава в модульном движении являются:

– для серий ЭД, ЭТ и ЭП – «6+4» на полигонах крупных и средних компаний: АО «ЦППК», АО «МТ ППК», АО «СЗППК», АО «Экспресс-пригород»;

– для серий ЭД, ЭТ и ЭП – «4+4» на полигонах средних и крупных компаний: АО «ЦППК», АО «МТ ППК», АО «СЗППК», АО «ВВППК», АО «Содружество», АО «СПК», АО «Экспресс-пригород»;

– для серии ЭС2Г – «5+5» на полигонах отдельных компаний: АО «ЦППК», АО «МТ ППК», АО «СЗППК», АО «СПК», АО «КЭП», АО «Пермская ПК», АО «Калининградская ППК»;

– для серии РА-1 – «1+1» на неэлектрифицированных участках с низким пассажиропотоком отдельных пригородных компаний;

– для серий РА-2 и РА-3 – «2+2» или «3+2» на неэлектрифицированных участках отдельных пригородных компаний АО «ЦППК», АО «СЗППК», АО «СПК», АО «ВВППК».

Отметим, что на полигонах крупных пригородных компаний модульное движение можно организовать в дневной непиковый период времени. Сокращение составности целесообразно проводить за счет отцепки одного из модулей на станции оборота (Московский транспортный узел, в том числе МЦД и МЦК, Санкт-Петербургский транспортный узел).

На участках с незначительным объемом пассажиропотока, электрифицированных постоянным током, при наличии головных моторных вагонов имеется возможность эксплуатации более коротких составов. В настоящее время двухвагонные электропоезда серии ЭП2Д эксплуатируются на железных дорогах Армении. Варианты эксплуатации электропоездов постоянного тока ЭП2Д и ЭГ2Тв приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Варианты эксплуатации электропоездов постоянного тока ЭП2Д и ЭГ2Тв при наличии головных моторных вагонов

Наименование ППК	Тип ПС		
	МВПС постоянного тока		
	Серии МВПС	Варианты эксплуатации по СМЕ	Составность, ваг
АО "Кузбасс-пригород"	ЭП2Д	2+2, 2+4	4, 6
АО "Экспресс-пригород"	ЭП2Д	2+2, 2+4, 4+4	4, 6, 8
АО "Омск-пригород"	ЭП2Д	2+2, 2+4	4, 6
АО "Свердловская ПК"	ЭП2Д	2+2, 2+4	4, 6
АО "Башкортостанская ППК"	ЭП2Д	2+2, 2+4	4, 6
АО "ППК "Черноземье""	ЭП2Д	2+2, 2+4	4, 6
АО "Северная ППК"	ЭП2Д	2+2, 2+4	4, 6
АО "Центральная ППК"	ЭП2Д	6+4, 6+5, 6+6	11, 12
	ЭГ2Тв	5+6, 5+7	11, 12
ООО "Южная ППК"	ЭП2Д	2+2, 2+4	4, 6

Для электропоездов серии ЭП2Д имеется техническая возможность эксплуатации трехвагонных составов. Такой вариант требует предварительного обоснования с помощью тяговых расчетов. Одного моторного вагона на трехвагонную секцию может быть недостаточно.

Выводы по главе 4

1. Метод системного анализа 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.

2. Реализация функций управления, порядок подготовки и представления исходных данных, алгоритм действий специалистов по управлению оборотом модульного подвижного состава исследован и продемонстрирован на упрощенных моделях.

3. По итогам одного из проведенных экспериментов на упрощенной модели достигнуто сокращение эксплуатационных расходов на 27 %, при этом эффективность использования вместимости подвижного состава выросла на 20,5 %.

4. Эксперименты выявили порядок действий по расчету графика оборота с использованием оптимизационных методов. Важнейшим этапом расчетов является определение густоты потоков по направлениям и распределение пассажиров по поездам. Планирование пассажиропотоков предлагается выполнять с использованием методики трехслойного прогнозирования, которая состоит из 7 этапов.

5. Содержательное наполнение функций управления и формализация алгоритмов бизнес-процессов позволила разработать методические основы технологии гибкого регулирования составности в пригородном сообщении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложное экономическое состояние пригородного комплекса российских железных дорог ставит перед перевозчиками задачу по повышению доходов от перевозочной деятельности, с одной стороны, и сокращению затрат на перевозку – с другой. Актуальным направлением является 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 операционных систем железнодорожных сетей на уровне маршрута и отдельного поезда.

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 модульных пригородных составов позволяет совершенствовать методологические основы 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.

В регионах с незначительными размерами пассажиропотока возможно применять составы трех-четырёх типов на конкретных участках. Стоит отметить, что при такой схеме могут потребоваться операции в моторвагонном депо по прицепке или отцепке вагонов. В экспериментальной версии модели такой процесс не отражен. Внесение корректировок в модель связано с дальнейшими исследованиями по теме. Содержательное описание несколько усложнится, но принципиальный подход не изменится.

Системы управления с использованием искусственного интеллекта отличаются от информационных систем наличием механизма самообучения. Параметры оптимизационной модели должны настраиваться. Расчетный оптимальный график оборота пригородных составов следует проверять с помощью имитационных моделей. Полученные результаты позволят откорректировать исходные данные и параметры оптимизационной модели. Разработка методов совместного использования моделей разного класса с механизмом обратной связи создаст научную основу интеллектуальной динамической системы управления. Это может стать отдельным направлением будущих методических разработок.

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 моторвагонного парка предыдущего модельного ряда. Новый подвижной состав отечественной разработки позволяет формировать короткие модули, а также составы по системе многих единиц. Разработанная методика позволит обосновать структуру парка. ОАО «РЖД» сможет обновить парк МВПС в соответствии с размерами транспортного заказа субъектов РФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Резер, С. М. Логистика пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте : монография / С. М. Резер ; Российская акад. наук. – Москва : ВИНТИ РАН, 2007. – 516 с. – ISBN 978-5-902928-16-4.

2. Медведь, О. А. Назначение пригородных поездов в соответствии с целевой структурой пассажиропотока : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Медведь Оксана Анатольевна [Место защиты: Петерб. гос. ун-т путей сообщ.]. – Санкт-Петербург, 2014. – 137 с.

3. Пазойский, Ю. О. Оптимизация параметров системы освоения пригородных пассажиропотоков в условиях мегаполиса : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Пазойский Юрий Ошарович. – Москва, 2000. – 491 с.

4. Интермодальные перевозки в пассажирском сообщении с участием железнодорожного транспорта : учебное пособие для вузов ж.-д. трансп. / С. П. Вакуленко, П. В. Голубев, Е. В. Копылова, Е. Б. Куликова ; под ред. С. П. Вакуленко. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2013. – 263 с.

5. Гарбузова, В. В. Организация пригородных пассажирских перевозок по модульному принципу / В. В. Гарбузова. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. – 339 с.

6. Свыше 55 миллионов рублей в год составит экономия эксплуатационных расходов на Октябрьской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» при реализации пилотного проекта по организации модульного движения [Электронный ресурс]. Дата обновления: 31.10.2007. – Режим доступа: http://ozd.rzd.ru/news/public/ru?id=3848&layer_id=4069&STRUCTURE_ID=2.

7. Распоряжение ОАО «РЖД» от 01.12.2015 № 2806р «Об утверждении типового технологического процесса работы пассажирской и пассажирской технической станции» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71332484/?ysclid=lolkgo9vv8986000786>.

8. Система ведения сдвоенного электропоезда. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.avpt.ru/files/sdvoenny_elektropoezd.pdf.

9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 23.06.2022, № 250. – Екатеринбург : ИД «УралЮрИздат», 2016. – 272 с.

10. Шнейдер, М. А. Рынок пригородных железнодорожных перевозок: управление и экономика : монография / М. А. Шнейдер, Е. А. Проскуракова. – Санкт-Петербург : Изд-во ООО «Типография «НП-Принт», 2012. – 288 с.

11. Электропоезд серии 422 [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – 2010. – № 5. – Режим доступа: <https://zdmira.com/archive/2010/05#grid-item5>.

12. Дизель-поезда с механической передачей [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – 2006. – № 10. – Режим доступа: <https://zdmira.com/archive/2006/10>.

13. Опыт эксплуатации дизель-поезда Desiro Classic [Электронный ресурс] // Железные дороги мира. – 2006. – № 11. – Режим доступа: <https://zdmira.com/archive/2006/11>.

14. «Flügelzüge» – Bequemeres Reisen ohne Umsteigen [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fluegelzuege.de/>.

15. Braucht die Bahn Flügel? Ein Plädoyer für die Renaissance des Kurswagens von Jörg Schäfer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fluegelzuege.de/Fluegelkonzept-2004.pdf>.

16. NETZKONZEPTION 2020 / 2030 Abschlussbericht [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kvv.de/fileadmin/user_upload/kvv/Dateien/Broschueren/Abschlussbericht_Netzkonzeption_2020-2030_der_VBK_AVG_und_KVV.pdf.

17. Mehr Kapazität beim japanischen Shinkansen mittels dynamischem Flügeln [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elib.dlr.de/113141/1/Shinkansen_TUDresden_1707.pdf.

18. Пазойский, Ю. О. Организация дальних, местных и пригородных пассажирских перевозок в условиях функционирования пассажирских компаний / Ю. О. Пазойский, А. И. Жеребина, В. Н. Шмаль. – Москва : МИИТ, 2008 – 56 с.

19. Пазойский, Ю. О. Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте (примеры, задачи, модели, методы и решения) / Ю. О. Пазойский, В. Г. Шубко, С. П. Вакуленко. – Москва : ФГБОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп.», 2016. – 364 с.

20. Артынов, А. П. Исследование графика движения поездов на пригородных участках с интенсивными пассажиропотоками : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Артынов Александр Петрович. – Москва, ВНИИЖТ, 1968. – 19 с.

21. Артынов, А. П. Пригородные пассажирские перевозки / А. П. Артынов, Н. У. Дмитриев. – Москва : «Транспорт», 1975. – 128 с.

22. Артынов, А. П. Выбор типа графика движения пригородных поездов / А. П. Артынов // Железнодорожный транспорт. – 1970. – №5. – С. 26-30.

23. Гордеенко, П. Я. Совершенствование пригородного пассажирского движения / П. Я. Гордеенко // Сб. ст. ЛИИЖТ. – 1975. – Вып. 377. – С. 24-27.

24. Полынцев, Е. П. Определение размеров движения пригородных поездов с учетом колебаний пассажиропотоков / Е. П. Полынцев // Совершенствование эксплуатационной работы в транспортных узлах : сб. науч. трудов ; под общ. ред. А. К. Угрюмова. – Л. : ЛИИЖТ, 1981. – С. 78-89.

25. Полынцев, Е. П. Совершенствование пригородных перевозок / Е. П. Полынцев, А. К. Угрюмов // Железнодорожный транспорт. – 1982. – № 7. – С. 34-35.

26. Шубко, В. Г. Выбор схемы прокладки пригородных поездов / В. Г. Шубко, В. Г. Маневич, С. И. Паристый // Сборник трудов. – М. : МИИТ. – 1980. – Вып. 670.

27. Debasis Basu, John Douglas Hunt, Valuing of attributes influencing the attractiveness of suburban train service in Mumbai city: A stated preference approach, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 46, Issue 9, 2012, Pages

1465-1476 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.05.010>. – ISSN 0965-8564

28. Egidio Quaglietta, Meng Wang, Rob M.P. Goverde, A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Volume 15, 2020, 100195 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100195>. – ISSN 2210-9706.

29. Пазойский, Ю. О. Теоретические основы расчета графика движения пригородных поездов / Ю. О. Пазойский // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта : тез. 2-й межвуз. науч.-техн. конф. – Москва : МИИТ, 1996.

30. Вакуленко, С. П. Логистика пригородных пассажирских перевозок / С. П. Вакуленко, Е. В. Копылова, Е. Б. Куликова // Мир транспорта. – 2012. – (6). – С. 102-109.

31. Sara Gestrelus, Anders Peterson, Martin Aronsson, Timetable quality from the perspective of a railway infrastructure manager in a deregulated market: An interview study with Swedish practitioners, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Volume 15, 2020, 10020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100202>. – ISSN 2210-9706.

32. Bi, M. & He, Sanxiu & Li, H. & Yin, W. & Jing, Y.. (2018). Research on Optimization of Suburban Railway Stop Schedule Based on Random Traffic OD. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*. 40. – Pp. 1-7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2018.10.001>.

33. J. Pochet, S. Baro and G. Sandou, "Automatic train supervision for a CBTC suburban railway line using multiobjective optimization," 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, Japan, 2017. – Pp. 1-6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317670>.

34. Сай, В. М. Методология построения сетевых организационных структур на железнодорожном транспорте : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.22 / Сай Василий

Михайлович [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ]. – Екатеринбург, 2003. – 389 с.

35. Новоселова, И. С. Совершенствование методов управления перевозками пассажиров в пригородном сообщении : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Новоселова Ирина Сергеевна [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ]. – Москва, 2008. – 158 с.

36. Женере, Е. Пригородное сообщение: основные концепции, организация, эксплуатация и управление / Е. Женере // Железные дороги мира. – 1974. – № 3. – С. 49-69.

37. Белянкин, А. Ю. Экономическая эффективность автоматизированных систем контроля пассажиропотока в пригородном движении : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Белянкин Алексей Юрьевич [Место защиты: Междунар. межкадем. союз]. – Москва, 2007. – 37 с.

38. Ембулаев, В. Н. Совершенствовать пригородные пассажирские перевозки / В. Н. Ембулаев // Железнодорожный транспорт. – 1991. – № 12. – С. 12-13.

39. Жербина, А. И. О мерах по развитию и повышению качества пригородных пассажирских перевозок в 1992-1995 гг. / А. И. Жербина, Л. А. Пышкина // Автоматика, телемеханика и связь. – 1992. – № 7. – С. 38.

40. Кузнецова, Н. В. Система маркетингового планирования объема пассажирских перевозок на примере пригородного железнодорожного транспорта : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Кузнецова Наталья Викторовна. – Волгоград : ВГТУ, 2007. – 25 с.

41. Панк, Р. В. Совершенствование управления пригородными перевозками: На примере Новосибирского железнодорожного узла : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08. / Панк Римма Вячеславовна [Место защиты: Сиб. гос. ун-т путей сообщ.]. – Новосибирск, 2005. – 221 с.

42. Самарина, Н. А. Оптимизация графика оборота пригородных составов при заданном расписании движения / Н. А. Самарина, Ю. О. Пазойский //

Вопросы эксплуатации железных дорог [Сб. ст.] / под ред. Ф. П. Кочнева. – Москва, 1970. – Вып. 333. – С. 37-51.

43. Самарина, Н. А. Минимизация парка и резервного пробега в пригородном движении / Н. А. Самарина, Ю. О. Пазойский // Труды МИИТ.

44. Самарина, Н. А. Оптимизация графика оборота пригородных секций в условиях обращения поездов с переменным количеством вагонов в составе / Н. А. Самарина, Ю. О. Пазойский // Математические методы в эксплуатации железных дорог : сб. науч. тр. / под общ. ред. В. М. Акулиничева. – Москва : [б. и.], 1974. – С. 185-203.

45. Федотова, Т. Н. Организация длинносоставных пригородных поездов в крупных железнодорожных узлах / Т. Н. Федотова // Интенсивная технология работы на железных дорогах Урала и Сибири» : межвуз. сб. науч. тр. / Новосиб. ин-т инженеров ж.-д. трансп. ; под ред. И. Т. Колкова. – Новосибирск : НИИЖТ, 1990.

46. Кочнев, Ф. П. Оптимальные параметры пригородных пассажирских перевозок / Ф. П. Кочнев. – Москва : Транспорт, 1975. – 304 с.

47. Кочнев, Ф. П. Организация пригородных пассажирских перевозок на железных дорогах СССР / Ф. П. Кочнев. – Москва : Трансжелдориздат, 1971. – 232 с.

48. Кочнев, Ф. П. Пассажирские перевозки на железнодорожном : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ф. П. Кочнев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1980. – 496 с.

49. Бещева, Н. И. Проблемы повышения эффективности пригородных пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте / Н. И. Бещева // Развитие системы пассажирских сообщений : сб. ст. – Москва : Наука, 1984. – С. 98-123.

50. Пышкина, Л. А. Методика построения графика оборота пригородных составов в условиях их секционирования / Л. А. Пышкина // Труды МИИТ. – 1992. – № 7. – С. 38.

51. Организация пригородных железнодорожных перевозок : учебное пособие / Ю. О. Пазойский [и др.] ; под ред. Ю. О. Пазойского. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 270 с. – ISBN 978-5-89035-816-5.

52. Пазойский, Ю. О. Автоматизация разработки графика оборота пригородных составов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Пазойский Юрий Ошарович. – Москва, 1977. – 181 с.

53. Пазойский, Ю. О. Автоматизация составления схематического графика движения пригородных поездов / Ю. О. Пазойский // Вестник ВНИИЖТ. – 1996. – № 1. – С. 16-20.

54. Пазойский, Ю. О. Автоматизированная система разработки графика оборота пригородных поездов / Ю. О. Пазойский // Локомотив. – 1998. – № 6. – С. 47-48.

55. Бархатный, В. Д. Автоматизированное составление графика оборота составов и именных графиков работы локомотивных бригад в пригородном движении / В. Д. Бархатный, В. Н. Ковалев, В. Л. Сальченко // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 6. – С. 5-9.

56. Ленчук, Н. А. Электропоезд ЭП2Д с гибкой схемой формирования / Н. А. Ленчук, П. Г. Яковлев // Железные дороги мира. – 2016. – № 8. – 47-51. – ISSN 0321-1495.

57. Самуйлов, В. М. Развитие ускоренных пригородных пассажирских перевозок с применением инновационного подвижного состава «Ласточка» / В. М. Самуйлов, С. В. Кириленко, Т. А. Каргапольцева // Инновационный транспорт. – 2019. – № 2 (№ 32). – С. 16-22. – ISSN 2311-164X.

58. Конон, С. И. Принципы расчета числа пригородных поездов, осуществляющих оборот на пересадочных станциях / С. И. Конон // Технологическое и техническое обеспечение интенсификации поездной работы : сб. науч. тр. – Санкт-Петербург : ПИИТ, 1993. – С. 65-72.

59. Терёшина, Н. П. Экономика железнодорожного транспорта : учебник / Н. П. Терёшина, Л. П. Левицкая, Л. В. Шкурина. – М. : ФГБОУ «Учебно-

методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 536 с.

60. Издержки и себестоимость железнодорожных перевозок : учебное пособие / Н. Г. Смехова [и др.] ; под ред. Н. Г. Смеховой, Ю. Н. Кожевникова. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 472 с. – ISBN 978-5-89035-830-1.

61. Копылова, Е. В. Организация работы интермодальных транспортных систем для обслуживания пригородных пассажиропотоков в периоды предоставления «окон» : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Копылова Екатерина Витальевна. – Москва, 2006. – 253 с.

62. Козлов, П. А. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке / П. А. Козлов, С. П. Миловидов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – № 1. – С. 211-212.

63. Козлов, П. А. Динамическая транспортная задача с задержками / П. А. Козлов, С. П. Миловидов, С. Л. Блюмин // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 25. – С. 158-161.

64. Козлов, П. А. Оптимизация структуры транспортных потоков в динамике при приоритете потребителей / П. А. Козлов, С. П. Миловидов // Экономика и математические методы. – Т. XVIII. – М., 1982. – Вып. 3. – С. 521-531.

65. Козлов, П. А. О системах и системности на транспорте / П. А. Козлов // Транспорт Урала. – 2016. – № 2(49). – С. 3-8. – DOI 10.20291/1815-9400-2016-2-3-8.

66. Козлов, П. А. Системные исследования – новый подход / П. А. Козлов // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 1. – С. 46-50.

67. Козлов, П. А. Современные методы расчета систем железнодорожного транспорта / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, В. Ю. Пермикин // Механика и трибология транспортных систем (МехТрибоТранс-2016) : сб. докл. междунар. науч. конф. В 2 т. Ростов-на-Дону, 08–10 ноября 2016 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2016. – С. 30-36.

68. Козлов, П. А. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с помощью имитационного моделирования / П. А. Козлов, О. В. Осокин, В. С. Колокольников // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 6. – С. 12-16.

69. Козлов, П. А. Применение имитационного моделирования для исследования проектов развития железнодорожных станций и линий / П. А. Козлов, О. В. Осокин, В. С. Колокольников // Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление : сб. науч. тр. II междунар. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 07–08 февраля 2018 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 219-227.

70. Козлов, П. А. Проблема организации единой транспортной системы / П. А. Козлов, Н. А. Тушин, В. С. Колокольников // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14. – №3. – С. 748-755. – DOI 10.25559/SITITO.14.201803.748-755.

71. Козлов, П. А. Совместное использование аналитических методов и имитационных моделей / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, В. И. Сорокин // Транспорт Урала. – 2016. – № 3 (50). – С. 3-8. – DOI 10.20291/1815-9400-2016-3-3-8.

72. Козлов, П. А. Согласованная оптимизация составных технологических процессов / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко, В. С. Колокольников // Транспорт Урала. – 2018. – № 1 (56). – С. 3-6. – DOI 10.20291/1815-9400-2018-1-3-6.

73. Козлов, П. А. Теоретические аспекты взаимодействия потока и элементов структуры в транспортных системах / П. А. Козлов, В. С. Колокольников // Транспорт Урала. – 2019. – № 4 (63). – С. 3-7. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-4-3-7.

74. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / П. А. Козлов, В. С. Колокольников, Н. А. Тушин, О. В. Осокин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (41). – С. 60-69. – DOI 10.20291/2079-0392-2019-1-60-69.

75. Козлов, П. А. Оптимизация оборота составов по обеспечению ниток графика пригородного движения / П. А. Козлов, Е. В. Копылова // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 2. – С. 68-73. – ISSN 2074-9325.

76. Козлов, П. А. Технология организации пригородного пассажиропотока / П. А. Козлов, Е. В. Копылова, О. В. Осокин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (75). – С. 109-117.

77. Копылова, Е. В. Организация пригородных пассажирских перевозок на основе организации пассажиропотока : дис. ... д-ра техн. наук : 2.9.4. / Копылова Екатерина Витальевна. – Москва, 2006. – 253 с.

78. Приказ Федеральной антимонопольной службы от 08.08.2018 № 1109/18 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201809260021?ysclid=lolkqq6usf521907018&index=2>.

79. Приказ ФСТ России от 27.07.2010 N 156-т/1 (ред. от 27.04.2020, с изм. от 11.11.2022) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-fst-rf-ot-27072010-n-156-t1/?ysclid=loll6z23fd352208471>.

80. Александров, А. Э. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления / А. Э. Александров, Н. В. Якушев // UBS, 12–13 – 2006. – С. 5-14.

81. Kozlov, P. Model to calculate the optimal mode of train locomotives turnover / P. Kozlov, S. Vakulenko, N. Tushin, E. Timukhina // Transport Problems. – 2017. – № 12 (3). – P. 125-133.

82. Козлов, П. А. Распределительная динамическая транспортная задача с управляемыми задержками в сетевой постановке / П. А. Козлов, С. П. Миловидов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1983.

83. Акулиничев, В. М. Математические методы в эксплуатации железных дорог : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. И. Корешков. – М. : Транспорт, 1981. – 223 с.

84. Осокин, О. В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 /

Осокин Олег Викторович [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ]. – Москва, 2014. – 355 с.

85. Козлов, П. А. Оптимизация оборота локомотивов при заданных поездопотоках / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 10. – С 34-37. – ISSN 0044-4448.

86. Козлов, П. А. Проблема оптимизации оборота поездных локомотивов / П. А. Козлов, С. П. Вакуленко // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 9. – С. 48-52.

87. 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.

88. 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.

89. Шмидт, А. О. Перспективы организации движения модульных электропоездов в Пермском крае: отчет о НИР / А. О. Шмидт, Е. А. Жужгов. – Екатеринбург : Уральский государственный университет путей сообщения, 2016. – 26 с.

90. 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.

91. 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.

92. 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.

93. Автоматизированная система составления графика оборота пригородных поездов и локомотивных бригад [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ntpdubna.ru/ASRotation.shtml>.

94. 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.

95. MPS file format [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://np-soft.ru/nproject/quick_np/appendex/mps_format.htm.

96. Тимофеева, Г. А. Эконометрика : учебное пособие / Г. А. Тимофеева, А. В. Мартыненко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 111 с. – ISBN 978-5-94614-358-5.

97. Смирнова, О. Ю. Подходы к анализу факторов, влияющих на пригородное сообщение / О. Ю. Смирнова, К. Е. Герасимчук // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – № 4 (36). – С. 85-95. – ISSN 2079-0392.

98. Правдин, Н. В. Прогнозирование пассажирских потоков : методика, расчеты, примеры / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей. – Москва : Транспорт, 1980. – 222 с.

99. Сеницын, Е. В. Экономико-математическая модель прогнозирования пассажиропотоков на долгосрочном уровне / Е. В. Сеницын, С. В. Вихарев, Д. А. Брусянин // Транспорт Урала. – 2013. – № 3 (38). – С. 89-94. – ISSN 1815-9400.

100. Оценка научных результатов по прогнозированию региональных пассажирских транспортных потоков / Е. А. Макарова, К. В. Суржин, С. Б. Елизаров, С. С. Морозов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2017. – № 1. – С. 23-35.

101. 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.

102. Правдин, Н. В. Прогнозирование пассажирских потоков: методика, расчеты, примеры / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей. – Москва : Транспорт, 1980. – 222 с.

103. Латышев, А. Г. Моделирование населенности пригородных поездов на ЭВМ / А. Г. Латышев, В. И. Лукашев // Железнодорожный транспорт. – 1977. – № 2. – С. 38-40.

104. Бывшев, С. А. Анализ распределения пригородного пассажиропотока по часам суток / С. А. Бывшев, В. К. Курбатов. – Москва : Транспорт, 1988.

105. Елизарьев, Ю. В. Маркетинг пассажирских перевозок: проблемы и пути решения / Ю. В. Елизарьев, Н. А. Потапович, Е. В. Белкина // Железнодорожный транспорт. ЭИ / ЦНИИТЭИ. – 1995. – Вып. 4. – С. 1-25. – (Маркетинг и коммерческая деятельность).

106. Высоцкий, Ю. Л. Пути автоматизации учета распределения пригородных пассажиропотоков / Ю. Л. Высоцкий, Е. В. Семакин // Повышение эффективности эксплуатационной работы железных дорог : межвуз. сб. науч. тр. / НИИЖТ. – Новосибирск, 1987. – С. 114-118.

107. Белозеров, В. Л. Маркетинг пассажирских перевозок / В. Л. Белозеров. – Санкт-Петербург : Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 1997. – 119 с.

108. Голубков, Е. П. Маркетинговые исследования: теория, методология и практика / Е. П. Голубков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Финпресс, 2000. – 461 с.

109. Полынцев, Е. П. Определение размеров движения пригородных поездов с учетом колебаний пассажиропотоков / Е. П. Полынцев // Совершенствование эксплуатационной работы в транспортных узлах : сб. науч. тр. ; под общ. ред. А. К. Угрюмова. – Л. : ЛИИЖТ, 1981. – С. 78-89.

110. Гаусман, Р. Г. Общие вопросы планирования городского и пригородного сообщения / Р. Г. Гаусман // Железные дороги мира. – 1974. – № 1. – С. 66-80.

111. Гольц, Г. А. Анализ и классификация распределений трудовых передвижений населения по дальности в городских и пригородных зонах / Г. А. Гольц // Труды ИКТП. – М. : Транспорт, 1968. – Вып. 9.

112. Гольц, Г. А. Прогнозирование пригородных перевозок / Г. А. Гольц // Городское хозяйство Москвы. – 1967. – № 4. – С. 27-30.

113. Оптимизация структуры и технологии работы транспортных систем : методические указания к выполнению практических занятий / В. Ю. Пермикин [и др.]. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – 24 с.

114. Елизаров, С. Б. Расчет числа остановок пригородных поездов / С. Б. Елизаров // Проблемы применения вычислительной техники на железнодорожном транспорте : сб. науч. тр. – Москва : ВНИИЖТ, 1990.

115. Железные дороги стран Скандинавии // Железные дороги мира. – 1979. – № 5.

116. Иловайский, Л. В. Расчет числа и мест расположения зонных станций пригородного участка / Л. В. Иловайский // Вопросы эксплуатации железных дорог : труды БелИИЖТа. – Минск, 1963.

117. Федоров, В. А. Применение стереометрических моделей пассажиропотоков в организации пригородных пассажирских перевозок / В. А. Федоров, В. И. Лукашов // Моделирование процессов управления транспортными средствами. – Владивосток : ДВНЦАН СССР, 1977. – С. 46-48.

118. Важный резерв овладения пассажирскими перевозками / М. М. Филиппов, М. М. Уздин, Л. Е. Блюдов, С. Н. Фисенко // Вопросы совершенствования эксплуатации и развития железнодорожных узлов : сб. тр. ; под общ. ред. А. К. Угрюмова. – Л. : ЛИИЖТ, 1982.

119. Некрашевич, В. И. Управление эксплуатацией локомотивов : учебное пособие / В. И. Некрашевич, В. И. Апатцев ; Федеральное агентство ж.-д. трансп., Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Московский гос. ун-т путей сообщ.» ; Российская открытая акад. транспорта. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Московский гос. ун-т путей сообщ., 2014. – 340 с. – ISBN 978-5-7374-0637-0.

120. Интермодальные перевозки в пассажирском сообщении с участием железнодорожного транспорта : учебное пособие / С. П. Вакуленко [и др.] ; под ред. С. П. Вакуленко. – Москва : ФГБОУ «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп.», 2013. – 262 с.

121. Мишарин, А. С. Эффективное функционирование железнодорожного транспорта на основе информационных технологий / А. С. Мишарин ; Российская акад. наук, ВНИТИ. – Москва [б. и.], 2007. – 298 с.

122. Кобзев, В. П. Освоение пригородных пассажиропотоков на линиях с интенсивным движением / В. П. Кобзев // Железнодорожный транспорт. – 1980. – № 8.

123. Муковнина Н. А. Организация пригородных перевозок с учетом размеров и структуры пассажиропотока : дис. канд. техн. наук : 05.22.08 / Муковнина Наталья Анатольевна [Место защиты: Петерб. гос. ун-т путей сообщ.]. – Санкт-Петербург, 2008. – 174 с.

124. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009>.

125. Отчетность компании ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9471>.

126. Kostenko V., Golubtsov V., Pank R., Shmidt A. Optimization of regional transport networks based on a mathematical model of passenger preferences // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021). Journal of Physics: Conference Series. Parallel algorithms and programs for solving time-consuming problems of modeling and forecasting complex systems and processes. 2021. – Vol. 2131. – P. 274–283. – ISSN 1742-6596

127. Pank R., Kostenko V., Shmidt A. Logistics Issues in Railway Passenger Transportation Organization // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. – Vol. 403(2). – P. 274–283. – ISBN 978-3-030-96382-8.

128. Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р «Об утверждении Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cipi.samgtu.ru/sites/cipi.samgtu.ru/files/belaya_kniga.pdf

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЭКСПЕРИМЕНТ НА УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ №1

Таблица А.1 – Программа для эксперимента №1

NAME	z1	fyal	f	20	c3c4	c4	1	
ROWS		fyal	ya1	1	c4c5	f	1	
N	f	fyb1	f	20	c4c5	c4	-1	
E a1		fyb1	yb1	1	c4c5	c5	1	
E a2		fyс1	f	20	a1b2	f	2	
E a3		fyс1	yc1	1	a1b2	a1	-1	
E a4		ya5f	f	9999	a1b2	b2	1	
E b1		ya5f	ya5	1	a1b2	x1	160	
E b2		yb5f	f	9999	a2b3	f	2	
E b3		yb5f	yb5	1	a2b3	a2	-1	
E b4		yc5f	f	9999	a2b3	b3	1	
E c1		yc5f	yc5	1	a3b4	f	2	
E c2		a1a2	f	1	a3b4	a3	-1	
E c3		a1a2	a1	-1	a3b4	b4	1	
E c4		a1a2	a2	1	a3b4	x2	160	
E ya1		a2a3	f	1	a4b5	f	2	
E ya2		a2a3	a2	-1	a4b5	a4	-1	
E ya3		a2a3	a3	1	a4b5	b5	1	
E ya4		a3a4	f	1	b1c2	f	2	
E yb1		a3a4	a3	-1	b1c2	b1	-1	
E yb2		a3a4	a4	1	b1c2	c2	1	
E yb3		a4a5	f	1	b2c3	f	2	
E yb4		a4a5	a4	-1	b2c3	b2	-1	
E yc1		a4a5	a5	1	b2c3	c3	1	
E yc2		b1b2	f	1	b3c4	f	2	
E yc3		b1b2	b1	-1	b3c4	b3	-1	
E yc4		b1b2	b2	1	b3c4	c4	1	
G x1		b2b3	f	1	b3c4	x4	160	
G x2		b2b3	b2	-1	b4c5	f	2	
G x3		b2b3	b3	1	b4c5	b4	-1	
G x4		b3b4	f	1	b4c5	c5	1	
L d1		b3b4	b3	-1	c1a2	f	4	
L d2		b3b4	b4	1	c1a2	c1	-1	
L d3		b4b5	f	1	c1a2	a2	1	
L d4		b4b5	b4	-1	c2a3	f	4	
COLUMNS		b4b5	b5	1	c2a3	c2	-1	
fa1	f	15	c1c2	f	1	c2a3	a3	1
fa1	a1	1	c1c2	c1	-1	c2a3	x3	160
fb1	f	15	c1c2	c2	1	c3a4	f	4
fb1	b1	1	c2c3	f	1	c3a4	c3	-1
fc1	f	15	c2c3	c2	-1	c3a4	a4	1
fc1	c1	1	c2c3	c3	1	c4a5	f	4
a5f	f	9999	c3c4	f	1	c4a5	c4	-1
a5f	a5	1	c3c4	c3	-1	c4a5	a5	1
b5f	f	9999						
b5f	b5	1						
c5f	f	9999						
c5f	c5	1						
ya1ya2	f	1	ya4yb5	f	3	RHS1	yb2	0
ya1ya2	ya1	-1	ya4yb5	ya4	-1	RHS1	yb3	0
ya1ya2	ya2	1	ya4yb5	yb5	1	RHS1	yb4	0
ya2ya3	f	1	yb1yc2	f	3	RHS1	yc1	0
ya2ya3	ya2	-1	yb1yc2	yb1	-1	RHS1	yc2	0
ya2ya3	ya3	1	yb1yc2	yc2	1	RHS1	yc3	0

ya3ya4 f 1	yb2yc3 f 3	RHS1 yc4 0
ya3ya4 ya3 -1	yb2yc3 yb2 -1	RHS1 x1 320
ya3ya4 ya4 1	yb2yc3 yc3 1	RHS1 x2 320
ya4ya5 f 1	yb3yc4 f 3	RHS1 x3 480
ya4ya5 ya4 -1	yb3yc4 yb3 -1	RHS1 x4 480
ya4ya5 ya5 1	yb3yc4 yc4 1	RHS1 d1 2
yb1yb2 f 1	yb3yc4 x4 320	RHS1 d2 2
yb1yb2 yb1 -1	yb4yc5 f 3	RHS1 d3 2
yb1yb2 yb2 1	yb4yc5 yb4 -1	RHS1 d4 2
yb2yb3 f 1	yb4yc5 yc5 1	BOUNDS
yb2yb3 yb2 -1	yc1ya2 f 5	UI BOUND a1b2 2
yb2yb3 yb3 1	yc1ya2 yc1 -1	UI BOUND a3b4 2
yb3yb4 f 1	yc1ya2 ya2 1	UI BOUND ya1yb2 2
yb3yb4 yb3 -1	yc2ya3 f 5	UI BOUND ya3yb4 2
yb3yb4 yb4 1	yc2ya3 yc2 -1	UI BOUND b3c4 2
yb4yb5 f 1	yc2ya3 ya3 1	UI BOUND c2a3 2
yb4yb5 yb4 -1	yc2ya3 x3 320	UI BOUND yb3yc4 2
yb4yb5 yb5 1	yc3ya4 f 5	UI BOUND yc2ya3 2
yc1yc2 f 1	yc3ya4 yc3 -1	ENDATA
yc1yc2 yc1 -1	yc3ya4 ya4 1	
yc1yc2 yc2 1	yc4ya5 f 5	
yc2yc3 f 1	yc4ya5 yc4 -1	
yc2yc3 yc2 -1	yc4ya5 ya5 1	
yc2yc3 yc3 1	a1b2 d1 1	
yc3yc4 f 1	a3b4 d2 1	
yc3yc4 yc3 -1	b3c4 d4 1	
yc3yc4 yc4 1	c2a3 d3 1	
yc4yc5 f 1	ya1yb2 d1 1	
yc4yc5 yc4 -1	ya3yb4 d2 1	
yc4yc5 yc5 1	yb3yc4 d4 1	
ya1yb2 f 3	yc2ya3 d3 1	
ya1yb2 ya1 -1	RHS	
ya1yb2 yb2 1	RHS1 a1 0	
ya1yb2 x1 320	RHS1 a2 0	
ya2yb3 f 3	RHS1 a3 0	
ya2yb3 ya2 -1	RHS1 a4 0	
ya2yb3 yb3 1	RHS1 b1 0	
ya3yb4 f 3	RHS1 b2 0	
ya3yb4 ya3 -1	RHS1 b3 0	
ya3yb4 yb4 1	RHS1 b4 0	
ya3yb4 x2 320	RHS1 c1 0	
	RHS1 c2 0	
	RHS1 c3 0	
	RHS1 c4 0	
	RHS1 ya1 0	
	RHS1 ya2 0	
	RHS1 ya3 0	
	RHS1 ya4 0	
	RHS1 yb1 0	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ЭКСПЕРИМЕНТ НА УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ №2

Пусть на условном полигоне, состоящем из станций a , b и c , а также моторвагонным депо, обращаются двухвагонные модули вместимостью $a_m^2 = 160$ пассажиров и четырехвагонные – вместимостью $a_m^4 = 360$ пассажиров. Требуется освоить пассажиропотоки Xsb :

- от ст. a до ст. c в первый такт времени (160 пасс.);
- от ст. b до ст. a в первый такт времени (480 пасс.);
- от ст. c до ст. a в третий такт времени (160 пасс.);
- от ст. a до ст. b в четвертый такт времени (320 пасс.);
- от ст. a до ст. c в пятый такт времени (320 пасс.).

Ставки на движение и простои подвижного состава:

- стоимость использования одного двухвагонного состава МВПС за весь период моделирования $c_{\text{и}}^2$ (15 у.е./состав);
- стоимость одного составо-такта движения двухвагонного состава между станциями a и b – $c_{\text{дв1}}^2$ (5 у.е./составо-такт);
- стоимость одного составо-такта движения двухвагонного состава между станциями c и a – $c_{\text{дв2}}^2$ (7 у.е./составо-такт);
- стоимость одного составо-такта простоя двухвагонного состава на любой станции $c_{i-\text{пр}}^2$ (2 у.е./составо-такт);
- стоимость использования четырехвагонного состава МВПС за весь период моделирования $c_{\text{и}}^4$ (20 у.е./состав);
- стоимость одного составо-такта движения четырехвагонного состава между станциями a и b – $c_{\text{дв1}}^4$ (8 у.е./составо-такт);
- стоимость одного составо-такта движения четырехвагонного состава между станциями c и a – $c_{\text{дв2}}^4$ (10 у.е./составо-такт);
- стоимость одного составо-такта простоя двухвагонного состава на любой станции $c_{i-\text{пр}}^4$ (2 у.е./составо-такт);

Введены «нити» графика для подачи-уборки состава в моторвагонное депо:

- в депо во второй такт времени (время на передвижение 1 такт);
- из депо в четвертый такт времени (время на передвижение 1 такт);

Стоимости передвижения состава в депо и обратно, а также простоев на территории депо:

- стоимость одного составо-такта простоя состава в депо $c_{d-пр}^{2,4}$ (1 у.е./составо-такт);
- стоимость передвижения состава из/в депо $c_{дв-d}^{2,4}$ (1 у.е./составо-такт).

Таблица Б.1 – Программа для эксперимента №2

NAME	z1	COLUMNS	a3a4	a3	-1	a5c6	a5	-1		
ROWS		fg1	f	0	a3a4	a4	1	a5c6	c6	1
N f		fg1	g1	1	a4a5	f	2	a5c6	x5	160
E g1		fa1	f	15	a4a5	a4	-1	a5c6	d5	1
E g2		fa1	a1	1	a4a5	a5	1	b1a2	f	5
E g3		fb1	f	15	a5a6	f	2	b1a2	b1	-1
E g4		fb1	b1	1	a5a6	a5	-1	b1a2	a2	1
E g5		fc1	f	15	a5a6	a6	1	b1a2	x2	160
E a1		fc1	c1	1	b1b2	f	2	b1a2	d2	1
E a2		g6f	f	9999	b1b2	b1	-1	c3a4	f	7
E a3		g6f	g6	1	b1b2	b2	1	c3a4	c3	-1
E a4		a6f	f	9999	b2b3	f	2	c3a4	a4	1
E a5		a6f	a6	1	b2b3	b2	-1	c3a4	x3	160
E b1		b6f	f	9999	b2b3	b3	1	c3a4	d3	1
E b2		b6f	b6	1	b3b4	f	2	yg1yg2	f	1
E b3		c6f	f	9999	b3b4	b3	-1	yg1yg2	yg1	-1
E b4		c6f	c6	1	b3b4	b4	1	yg1yg2	yg2	1
E b5		fyg1	f	0	b4b5	f	2	yg2yg3	f	1
E c1		fyg1	yg1	1	b4b5	b4	-1	yg2yg3	yg2	-1
E c2		fya1	f	20	b4b5	b5	1	yg2yg3	yg3	1
E c3		fya1	ya1	1	b5b6	f	2	yg3yg4	f	1
E c4		fyb1	f	20	b5b6	b5	-1	yg3yg4	yg3	-1
E c5		fyb1	yb1	1	b5b6	b6	1	yg3yg4	yg4	1
E yg1		fyb1	f	20	c1c2	f	2	yg4yg5	f	1
E yg2		fyb1	yb1	1	c1c2	c1	-1	yg4yg5	yg4	-1
E yg3		yc1	yc1	1	c1c2	c2	1	yg4yg5	yg5	1
E yg4		yg6f	f	9999	c2c3	f	2	yg5yg6	f	1
E yg5		yg6f	yg6	1	c2c3	c2	-1	yg5yg6	yg5	-1
E ya1		ya6f	f	9999	c2c3	c3	1	yg5yg6	yg6	1
E ya2		ya6f	ya6	1	c3c4	f	2	ya1ya2	f	2
E ya3		yb6f	f	9999	c3c4	c3	-1	ya1ya2	ya1	-1
E ya4		yb6f	yb6	1	c3c4	c4	1	ya1ya2	ya2	1
E ya5		yc6f	f	9999	c4c5	f	2	ya2ya3	f	2
E ya6		yc6f	yc6	1	c4c5	c4	-1	ya2ya3	ya2	-1
E yb1		g1g2	f	1	c4c5	c5	1	ya2ya3	ya3	1
E yb2		g1g2	g1	-1	c5c6	f	2	ya3ya4	f	2
E yb3		g1g2	g2	1	c5c6	c5	-1	ya3ya4	ya3	-1
E yb4		g2g3	f	1	c5c6	c6	1	ya3ya4	ya4	1
E yb5		g2g3	g2	-1	g4a5	f	1	ya4ya5	f	2
E yc1		g2g3	g3	1	g4a5	g4	-1	ya4ya5	ya4	-1
E yc2		g3g4	f	1	g4a5	a5	1	ya4ya5	ya5	1
E yc3		g3g4	g3	-1	a2g3	f	1	ya5ya6	f	2
E yc4		g3g4	g4	1	a2g3	a2	-1	ya5ya6	ya5	-1
E yc5		g4g5	f	1	a2g3	g3	1	ya5ya6	ya6	1
G x1		g4g5	g4	-1	alc2	f	7	yb1yb2	f	2
G x2		g4g5	g5	1	alc2	a1	-1	yb1yb2	yb1	-1
G x3		g5g6	f	1	alc2	c2	1	yb1yb2	yb2	1
G x4		g5g6	g5	-1	alc2	x1	160	yb2yb3	f	2
G x5		g5g6	g6	1	alc2	d1	1	yb2yb3	yb2	-1
L d1		a1a2	f	2	a4b5	f	5	yb2yb3	yb3	1
L d2		a1a2	a1	-1	a4b5	a4	-1	yb3yb4	f	2
L d3		a1a2	a2	1	a4b5	b5	1	yb3yb4	yb3	-1
L d4		a2a3	f	2	a4b5	x4	160	yb3yb4	yb4	1
L d5		a2a3	a2	-1	a4b5	d4	1	yb4yb5	f	2
		a2a3	a3	1	a5c6	f	7	yb4yb5	yb4	-1
		a3a4	f	2						

yb4yb5	yb5	1	RHS			UI BOUND	yb1ya2	2
yb5yb6	f	2	RHS1	g1	0	UI BOUND	c3a4	2
yb5yb6	yb5	-1	RHS1	g2	0	UI BOUND	a4b5	2
yb5yb6	yb6	1	RHS1	g3	0	UI BOUND	yc3ya4	2
yc1yc2	f	2	RHS1	g4	0	UI BOUND	ya4yb5	2
yc1yc2	yc1	-1	RHS1	g5	0	UI BOUND	a5c6	2
yc1yc2	yc2	1	RHS1	a1	0	UI BOUND	ya5yc6	2
yc2yc3	f	2	RHS1	a2	0	ENDATA		
yc2yc3	yc2	-1	RHS1	a3	0			
yc2yc3	yc3	1	RHS1	a4	0			
yc3yc4	f	2	RHS1	a5	0			
yc3yc4	yc3	-1	RHS1	b1	0			
yc3yc4	yc4	1	RHS1	b2	0			
yc4yc5	f	2	RHS1	b3	0			
yc4yc5	yc4	-1	RHS1	b4	0			
yc4yc5	yc5	1	RHS1	b5	0			
yc5yc6	f	2	RHS1	c1	0			
yc5yc6	yc5	-1	RHS1	c2	0			
yc5yc6	yc6	1	RHS1	c3	0			
yg4ya5	f	1	RHS1	c4	0			
yg4ya5	yg4	-1	RHS1	c5	0			
yg4ya5	ya5	1	RHS1	yg1	0			
ya2yg3	f	1	RHS1	yg2	0			
ya2yg3	ya2	-1	RHS1	yg3	0			
ya2yg3	yg3	1	RHS1	yg4	0			
ya1yc2	f	10	RHS1	yg5	0			
ya1yc2	ya1	-1	RHS1	ya1	0			
ya1yc2	yc2	1	RHS1	ya2	0			
ya1yc2	x1	320	RHS1	ya3	0			
ya1yc2	d1	1	RHS1	ya4	0			
ya4yb5	f	8	RHS1	ya5	0			
ya4yb5	ya4	-1	RHS1	yb1	0			
ya4yb5	yb5	1	RHS1	yb2	0			
ya4yb5	x4	320	RHS1	yb3	0			
ya4yb5	d4	1	RHS1	yb4	0			
ya5yc6	f	10	RHS1	yb5	0			
ya5yc6	ya5	-1	RHS1	yc1	0			
ya5yc6	yc6	1	RHS1	yc2	0			
ya5yc6	x5	320	RHS1	yc3	0			
ya5yc6	d5	1	RHS1	yc4	0			
yb1ya2	f	8	RHS1	yc5	0			
yb1ya2	yb1	-1	RHS1	x1	480			
yb1ya2	ya2	1	RHS1	x2	320			
yb1ya2	x2	320	RHS1	x3	160			
yb1ya2	d2	1	RHS1	x4	320			
yc3ya4	f	10	RHS1	x5	160			
yc3ya4	yc3	-1	RHS1	d1	2			
yc3ya4	ya4	1	RHS1	d2	2			
yc3ya4	x3	320	RHS1	d3	2			
yc3ya4	d3	1	RHS1	d4	2			
			RHS1	d5	2			
			BOUNDS					
			UI BOUND	a1c2	2			
			UI BOUND	bla2	2			
			UI BOUND	ya1yc2	2			

The figure consists of three side-by-side screenshots of the LPSolve IDE software interface, each showing the 'Results' window with a table of variables and their corresponding MILP Feasible values. The software title bar for all windows is 'LPSolve IDE - 5.5.2.0 - H:\Диссертация 2\10'.

Window 1 (Left): Shows the objective value as 115. The table lists variables from fg1 to a5a6.

Variables	MILP Feasible
fg1	0
fa1	1
fb1	0.9999999999999998
fc1	0
g6f	0
a6f	0
b6f	0
c6f	0
fyg1	0.9999999999999997
fya1	0
fyb1	1
fyc1	0
yg6f	0
ya6f	0
yb6f	0
yc6f	0
g1g2	0
g2g3	0
g3g4	0.9999999999999998
g4g5	0.9999999999999998
g5g6	0.9999999999999998
a1a2	0
a2a3	0
a3a4	0
a4a5	1
a5a6	1

Window 2 (Middle): Shows the objective value as 0.9999999999999998. The table lists variables from b1b2 to ya5ya6.

Variables	MILP Feasible
b1b2	0
b2b3	0
b3b4	0
b4b5	0
b5b6	0
c1c2	0
c2c3	1
c3c4	0
c4c5	0
c5c6	0
g4a5	0
a2g3	0.9999999999999998
a1c2	1
a4b5	0
a5c6	0
b1a2	1
c3a4	1
yg1yg2	0.9999999999999997
yg2yg3	0.9999999999999997
yg3yg4	0.9999999999999999
yg4yg5	0
yg5yg6	0
ya1ya2	0
ya2ya3	0.9999999999999999
ya3ya4	0.9999999999999999
ya4ya5	0
ya5ya6	0

Window 3 (Right): Shows the objective value as 0.9999999999999999. The table lists variables from yg1yg2 to yc3ya4.

Variables	MILP Feasible
yg1yg2	0.9999999999999997
yg2yg3	0.9999999999999997
yg3yg4	0.9999999999999999
yg4yg5	0
yg5yg6	0
ya1ya2	0
ya2ya3	0.9999999999999999
ya3ya4	0.9999999999999999
ya4ya5	0
ya5ya6	0
yb1yb2	0
yb2yb3	0
yb3yb4	0
yb4yb5	0
yb5yb6	0.9999999999999999
yc1yc2	0
yc2yc3	0
yc3yc4	0
yc4yc5	0
yc5yc6	0
yg4ya5	0.9999999999999999
ya2yg3	0
ya1yc2	0
ya4yb5	1
ya5yc6	1
yb1ya2	1
yc3ya4	0

Рисунок Б.1 – Результаты решения задачи эксперимента №2

ПРИЛОЖЕНИЕ В

**ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ**



ОАО «РЖД»
**ЦЕНТР ПО КОРПОРАТИВНОМУ
 УПРАВЛЕНИЮ ПРИГОРОДНЫМ
 КОМПЛЕКСОМ**

Новая Басманная ул. 2/1, стр. 1,
 г. Москва, 107174, тел.: (499) 260-30-26
 www.rzd.ru

«20» 11 2023 г. № _____

На № _____ от _____

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования
 на соискание ученой степени кандидата технических наук
 по специальности 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические
 науки), выполненного Шмидтом Артемом Олеговичем
 на тему «Технология гибкого регулирования составности в пригородном
 сообщении»

Представленное диссертационное исследование Шмидта А.О. проанализировано специалистами Центра по корпоративному управлению пригородным комплексом ОАО «РЖД». Работа затрагивает актуальные вопросы, связанные с оптимизацией параметров пригородных пассажирских перевозок и управлением оборотом моторвагонного подвижного состава.

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, будут использованы при планировании обновления парка подвижного состава, маршрутной сети пригородных пассажирских компаний и параметров регионального транспортного заказа, а именно:

- 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.

Заместитель начальника Центра



Р.В.Лисневский



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Пермская пригородная компания»
(АО «ППК»)

Петропавловская ул., д. 66, Пермь, 614068
Тел.: +7 (342) 237-10-00
E-mail: ppk.perm@pbk.ru, www.ppk59.ru

от 15.11.2023
На № _____ от _____

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки),
выполненного Шмидтом Артемом Олеговичем
на тему «Технология гибкого регулирования составности в пригородном
сообщении»

Разработанные в диссертации Шмидта А.О. методические основы гибкого регулирования составности в пригородном сообщении приняты к внедрению на полигоне деятельности АО «Пермская пригородная компания».

Полученные в диссертационном исследовании результаты использованы при организации пригородных пассажирских перевозок, в том числе, при согласовании с моторвагонным депо графика оборота электропоездов.

Генеральный директор

С.А. Канцур

