

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

Николаев Константин Юрьевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ  
НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ ИНТЕГРАЦИИ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В ПАССАЖИРСКИЕ  
ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ  
(НА ПРИМЕРЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ «ТРАМВАЙ-ПОЕЗД»)**

2.9.4 – Управление процессами перевозок (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Бородин Андрей Федорович

Москва — 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК В ПРИГОРОДНО- ГОРОДСКОМ СООБЩЕНИИ .....	14
1.1 Развитие пассажирских рельсовых транспортных систем в городских агломерациях в России и за рубежом.....	14
1.2 Развитие теории об эффективности видов транспортных систем в различных условиях .....	22
1.3 Современные условия и требования к системе транспортного обслуживания в агломерациях .....	26
1.4 Сравнительная характеристика агломерационных транспортных систем .....	29
1.5 Пути повышения качества транспортного обслуживания населения с применением системы «трамвай-поезд». Постановка задачи исследования.....	32
Выводы по 1 главе.....	36
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ «ТРАМВАЙ-ПОЕЗД» .....	38
2.1 Основные положения.....	38
2.2 Эксплуатационные требования к подвижному составу.....	39
2.3 Эксплуатационные требования к путевой инфраструктуре и пассажирским обустройствам.....	47
2.3.1 Основные положения.....	47
2.3.2 Примеры существующих трамвайно-железнодорожных соединительных линий. Классификация трамвайно-железнодорожных соединительных линий ..	49
2.3.3 Система типизации трамвайно-железнодорожных соединительных линий	57

2.3.4 Рекомендуемые схемы путевого развития трамвайно-железнодорожных соединительных линий для применения в России .....	58
2.3.5 Пассажирская инфраструктура .....	63
2.4 Эксплуатационные требования к системам безопасности и управления движением.....	64
2.4.1 Основные положения.....	64
2.4.2 Структура диспетчерского управления транспортной системы «трамвай-поезд».....	65
2.4.3 Требования к системам диспетчерского управления .....	68
2.5 Принципы построения маршрутной сети .....	70
2.6 Основные требования к нормативным графикам движения и порядок расчета их эффективных параметров.....	75
2.6.1 Основные положения.....	75
2.6.2 Резервы в нормативном графике движения «трамваев-поездов» .....	76
2.6.3 Увязка графика движения «трамваев-поездов» с графиком движения городского трамвая .....	77
2.6.4 Выбор схемы прокладки ниток «трамваев-поездов» по участкам железной дороги .....	79
Выводы по 2 главе.....	83
<b>ГЛАВА 3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ .....</b>	<b>86</b>
3.1 Влияние тактового графика движения поездов в различных видах пассажирского движения на съём наличной пропускной способности.....	86
3.1.1 Расчет наличной пропускной способности при тактовом графике движения поездов.....	86
3.1.2 Расчет наличной пропускной способности при наложении нескольких маршрутов тактового движения на одном участке .....	92

3.1.3 Расчет потерь в пропускной способности горловин станций от организации движения поездов по тактовому графику.....	95
3.2 Гибридная технология имитационного моделирования работы узла .....	98
3.2.1 Принципы гибридной технологии имитационного моделирования .....	98
3.2.2 Сетевая потоковая модель транспортно-технологической системы .....	101
3.2.3 Типовой имитационный модуль пассажирской (пассажирской технической) станции .....	102
3.3 Методика расчета показателей надежности транспортных систем в пригородно-городском сообщении .....	105
3.3.1 Основные положения.....	105
3.3.2 Показатели надежности графика движения поездов.....	106
3.3.3 Имитационное исследование показателей надежности графика движения поездов.....	108
3.4 Надежность работы трамвайно-железнодорожной соединительной линии (гейта) .....	112
3.5 Разработка решений по повышению функциональной надежности транспортных систем.....	119
Выводы по 3 главе.....	123
<b>ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ И СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ «ТРАМВАЙ-ПОЕЗД» В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ.....</b>	<b>125</b>
4.1 Технология взаимодействия систем при организации движения по принципу «трамвай-поезд» .....	125
4.2 Методические принципы определения технико-экономической эффективности применения транспортных систем в пригородно-городском сообщении .....	131
4.3 Влияние применяемой технологии организации пассажирского сообщения на показатели спроса на транспортную услугу.....	132

4.4 Сопоставление натуральных технических показателей пригородно-городских транспортных систем.....	138
4.5 Расходные показатели пригородно-городских транспортных систем .....	148
4.6 Социально-экономические эффекты от внедрения пригородно-городской транспортной системы «трамвай-поезд» .....	156
4.7 Рекомендуемая сфера и условия применения транспортной системы «трамвай-поезд» .....	158
4.7.1 Методические положения по отбору потенциальных транспортных узлов .....	158
4.7.2 Рассмотрение городов Российской Федерации как потенциальных полигонов внедрения технологии «трамвай-поезд».....	161
4.7.3 Техничко-экономическое сопоставление технологий транспортного обслуживания .....	162
Выводы по 4 главе.....	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	180
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	182
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	197
Приложение А. Существующие трамвайно-железнодорожные соединительные линии .....	197
Приложение Б. Графики значений зависящих эксплуатационных затрат и потребных размеров движения поездов .....	207

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Одной из глобальных проблем современных российских городов является совершенствование транспортного обслуживания населения.

За два первых десятилетия XXI века продолжилась и ускорилась модернизация экономики России по модели, связанной с концентрацией деловой и трудовой активности на диверсифицированных рынках крупных городских агломераций. В данный момент на 18 крупнейших городов России приходится около 25 % общей численности населения страны<sup>1</sup> [1].

Российские агломерационные образования непрерывно развиваются: за счет районов новой жилой застройки увеличиваются их территории, растет население, появляются новые предприятия. Эти процессы сопровождаются ростом автомобилизации населения и увеличением доли перевозок на личных автомобилях, что провоцирует повышение интенсивности движения в рамках уличных дорожных сетей. Повышается нагрузка на транспортную инфраструктуру, которая соединяет ядро агломерации и пригороды; магистрали плохо справляются с возросшими потоками, растет аварийность, ухудшаются условия движения. Кроме того, следствием автомобилизации является увеличение выбросов вредных веществ, которые влияют на природу и здоровье населения. Развитие в России альтернативных автомобилю пассажирских транспортных систем существенно отстаёт от динамичного развития городов с их возрастающими потребностями в сфере транспорта. Вышеперечисленное выводит вопросы транспортного обслуживания в агломерациях России на первый план — всё более высокие требования предъявляются к мощностям пассажирских транспортных сетей, к скорости транспорта, к соблюдению графика движения и т.п.

Транспортная стратегия РФ до 2030 года, утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. [2], ориентирует на создание в стране условий

---

<sup>1</sup> Доля городского населения в общей численности населения на 1 января 2019 г.

повышения качества жизни населения путем предоставления доступа к качественным и безопасным транспортным услугам, ставит целью снижение зависящих от транспорта финансовых издержек общества. Достичь этих целей предполагается путем «инновационной, социальной и экологической направленности развития транспортной отрасли» [2].

В Послании Федеральному собранию Российской Федерации от 21 апреля 2021 года Президент России В.В.Путин подчеркивал необходимость модернизации транспорта, ставил приоритетной задачей развитие общественного транспорта при планировании и реализации инфраструктурных проектов в регионах России [3]. Требования Президента России в сфере транспорта следует обеспечивать технически реализуемыми и экономически эффективными способами. Одним из перспективных направлений решения этой комплексной проблемы является применение бимодальных транспортно-технологических систем — «трамваев-поездов».

**Степень разработанности темы исследования.** Научно-методической базой настоящего исследования являются труды отечественных и зарубежных научных школ, коллективов и отдельных специалистов в области эксплуатации железнодорожного транспорта, надежности транспортных систем, интеграции железных дорог в систему общественного транспорта городов. Прежде всего, — это исследования Н.В.Правдина, В.Я.Негрия, Ф.П.Кочнева, Ю.О.Пазойского, А.Э.Александрова, И.Н.Шапкина, С.П.Вакуленко, З.В.Азаренковой, Э.В.Шабаровой, Н.И.Бещевой, А.Ф.Бородина, П.А.Козлова, В.С.Колокольникова, В.А.Кудрявцева, В.И.Сорокина, Е.И.Лещинского, Н.А.Тушина, В.Ю.Пермикина, В.А.Мурашова, Р.Л.Бранзия, В.В.Кондратенко, А.К.Угрюмова, В.В.Гранквиста, А.П.Петрова, И.И.Васильева, Н.А.Воробьева, А.Д.Каретникова, А.Д.Чернюгова, G.Drechsler, D.Ludwig, R.Meufahrt, L. Naegeli, Ul.Weidmann, A. Nash, V.R. Vuchic и др.

В то же время отсутствуют научно обоснованные рекомендации по эффективной интеграции железнодорожной инфраструктуры в пассажирские транспортные системы городских агломераций с применением бимодальной транспортной пассажирской системы «трамвай-поезд» в российских условиях.

**Областью исследования** являются: планирование, организация и управление транспортными потоками, технология транспортных процессов, взаимодействие различных видов транспорта.

**Объектами исследования** являются: транспортная сеть железных дорог и городского рельсового транспорта, структуры и линейные предприятия этой сети, транспортные и информационные потоки внутри сети и между ними.

**Предметами исследования** являются: развитие городских транспортных систем во взаимодействии с предприятиями железнодорожного транспорта; параметры технологии взаимодействия сопрягаемых инфраструктур и участников перевозочного процесса, влияющие на надежность и технико-экономические результаты функционирования транспортных систем.

**Целью исследования** является разработка научно-методических решений в области организации движения пригородно-городского железнодорожного транспорта с использованием железнодорожной (рельсовой) инфраструктуры различного назначения, определение функциональной надежности таких систем.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

определение технологических параметров транспортной системы «трамвай-поезд»;

создание модели расчета параметров надежности транспортных систем;

разработка методических принципов определения сферы применения транспортных систем в городских агломерациях.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в разработке новой научной идеи комплексного повышения эффективности и качества транспортного обслуживания населения в городских агломерациях за счет применения бимодальных рельсовых пассажирских транспортных систем, для чего:

— сформулированы эксплуатационные требования к техническим средствам транспортной системы «трамвай-поезд» и технологии их работы, подход к определению перспективных полигонов внедрения и методика отбора транспортных узлов для внедрения технологии «трамвай-поезд»;

— предложена классификация принципиальных вариантов построения маршрутной сети и взаимодействия участников перевозочного процесса по технологии «трамвай-поезд»;

— разработана методика оценки надежности работы транспортных систем и их взаимодействия, предложены методы повышения надежности функционирования бимодальных рельсовых пассажирских транспортных систем;

— предложены принципы технологической и организационно-правовой регламентации взаимодействия транспортных предприятий (перевозчиков, владельцев инфраструктур, заказчиков перевозок) в рамках функционирования бимодальной рельсовой пассажирской агломерационной транспортной системы;

— сформулированы эффектообразующие факторы и обоснованы методические принципы оценки финансового результата, предусматривающие гибкую настройку на различные варианты структур и функций взаимодействующих транспортных предприятий;

— разработана методика оценки сфер применения бимодальной пассажирской рельсовой транспортной системы.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Сформулированные в диссертации научные выводы, теоретические и практические результаты могут быть использованы для повышения эффективности организации пассажирских транспортных систем городских агломераций.

Применение результатов исследования даст возможность организовать новый вид пассажирского транспортного сообщения, а также более точно рассчитывать надёжность функционирования взаимодействующих транспортных систем и их пропускную способность, уменьшить капитальные затраты на строительство новой пассажирской транспортной инфраструктуры и повысить эффективность использования существующей железнодорожной и трамвайной инфраструктуры.

### **Методы исследования, использованные в диссертации:**

— изучение и анализ отечественных и зарубежных научных разработок по вопросам надежности и пропускной способности железнодорожной инфраструктуры;

- статистические методы обработки данных;
- структурно-функциональный анализ;
- методы математического моделирования работы узлов и станций;
- методы технико-экономического сопоставления вариантов технического развития и технологии организации внутриагломерационных пассажирских перевозок.

**Положения диссертации, выносимые на защиту:**

- эксплуатационные требования к техническим средствам в бимодальной транспортной системе «трамвай-поезд», обеспечивающие безопасное и надежное функционирование за счет гармонизации положений правил проектирования и технической эксплуатации смежных видов транспорта;

- принципы отбора транспортных узлов для организации маршрутов бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд», позволяющие конкретизировать возможные полигоны внедрения технологии организации пассажирского сообщения «трамвай-поезд» с учетом местных градостроительных и социальных условий;

- методика расчета пропускной способности железнодорожных линий в условиях интенсивного пассажирского тактового движения поездов;

- методика расчета функциональной надежности бимодальной транспортной системы на основе имитационного моделирования её работы, обеспечивающая выбор решений по повышению функциональной надежности за счет эффективных параметров инфраструктуры, маршрутной сети, организации движения и оперативного управления в транспортных системах;

- технологические принципы нормативно-правового регулирования взаимодействия транспортных предприятий для организации работы бимодальной рельсовой пассажирской транспортной системы;

- методические принципы определения эффективности и сферы применения транспортной системы «трамвай-поезд» для перевозчиков, владельцев инфраструктуры и заказчиков перевозок с использованием методологии компромиссного управления.

### **Реализация результатов работы.**

Расчетные формулы наличной пропускной способности в условиях тактового графика движения поездов включены в «Инструкцию по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» и используются АО «ИЭРТ» при функциональном развитии автоматизированной системы «Паспорт наличной пропускной способности железных дорог ОАО «РЖД» (АС Паспорт НПС).

Расчет наличной пропускной способности в условиях тактового графика движения поездов проведен при разработке «Концепции по развитию железнодорожной инфраструктуры в целях организации пригородных и внутригородских пассажирских перевозок в Санкт-Петербургском железнодорожном узле» [4] (одобрена Правлением ОАО «РЖД» 09.04.2020 протокол №20, утверждена ОАО «РЖД» 29.04.2020 №597 совместно с Правительством Санкт-Петербурга и Правительством Ленинградской области).

Гибридная технология имитационного моделирования применена АО «ИЭРТ» в работе «Организация движения поездов в Санкт-Петербургском железнодорожном узле» на 2025 — 2030 гг.

**Достоверность и обоснованность научных положений и выводов** подтверждается согласованностью научных положений с современным уровнем развития теории управления перевозочным процессом, расчетами на аналитических и имитационных моделях, корректной логикой построения исследования, учетом прогрессивного зарубежного опыта и отечественных условий пригородно-городских пассажирских перевозок, использованием действующих научно-методических положений по расчетам экономической эффективности, а также проверяемыми данными транспортной статистики и информационных систем ОАО «РЖД».

**Апробация работы.** Результаты исследований, составляющих основное содержание работы, доложены на:

— IV-й Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов», Беларусь, Гомель, БелГУТ, 11 — 12 октября 2018 г.;

— II-й Национальной научно-практической конференции «Современные технологии управления транспортным комплексом России: инновации, эффективность, результативность», Россия, Москва, РУТ (МИИТ), 19 апреля 2019 г.;

— 12-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019), Россия, Москва, ИПУ РАН им. В.А.Трапезникова, 1 — 3 октября 2019 г.;

— Третьей международной научно-практической конференции «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (РИЛТТРАНС-2019), Россия, Санкт-Петербург, ПГУПС, 23 — 25 октября 2019 г.;

— Восьмой научно-практической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019), Россия, Москва, 21 ноября 2019 г.;

— Международной научно-практической конференции «Тихомировские чтения: синергия технологии перевозочного процесса», Беларусь, Гомель, БелГУТ, 10 — 11 декабря 2020 г.;

— Международной научно-практической конференции «Фёдор Петрович Кочнев — выдающийся организатор транспортного образования и науки в России», Россия, Москва, РУТ (МИИТ), 22 — 23 апреля 2021 г.;

— на I-й Международной научно-практической конференции «НАУКА 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт», Россия, Москва, 26 — 27 августа 2021 г.;

— на Ученом Совете акционерного общества «Институт экономики и развития транспорта» (протокол № 1 от 29 апреля 2021 г.);

— на расширенном заседании кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» РУТ (МИИТ) 17 сентября 2021 г.

**Публикации.** Материалы, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 14 печатных работах, в том числе — в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. Статьи [5, 6, 7, 8, 9] подготовлены единолично.

Личный вклад автора диссертации в рамках публикаций [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], подготовленных в соавторстве: разработка эффективных маршрутов пропуска вагонопотоков в условиях интенсивного пассажирского движения, параметров графика движения поездов [15]; разработка принципов расчета наличной пропускной способности железнодорожного участка в условиях тактового графика движения поездов [10]; структура целевых функций и модель распределения пассажиропотоков между терминалами [17]; разработка параметров пассажирских транспортных систем [12, 13]; разработка типового имитационного модуля пассажирской станций [14]; оценка надежности взаимодействующих транспортных систем и резервов времени в графике движения поездов [11]; разработка положений гибридной технологии моделирования работы железнодорожных узлов [15, 16]; технические и технологические требования к системам диспетчеризации и управления движением в системе «трамвай-поезд» [18].

# ГЛАВА 1. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК В ПРИГОРОДНО-ГОРОДСКОМ СООБЩЕНИИ

## 1.1 Развитие пассажирских рельсовых транспортных систем в городских агломерациях в России и за рубежом

Появление и развитие городского общественного транспорта в Европе и России стало следствием серии промышленных революций XIX и начала XX века, которые сопровождались не только многократным увеличением протяженности железных дорог, но и бурным ростом городов. Усложнение промышленной инфраструктуры постепенно дифференцировало длину поездок по железной дороге: потребовались не только трансконтинентальные или междугородные маршруты, но и локальные, в пределах прилегающих к промышленным центрам областей.

С сер. XIX в. в странах Запада появился внутригородской общественный транспорт — конки, а с 1890-х годов конки сменил электрический трамвай. Сети трамвая в течение двух десятилетий перед I Мировой войной плотно покрывают районы городской застройки крупных европейских городов. Электрический трамвай проник в США, Китай, Японию, в страны Южной Америки. Трамвайные сети были построены в английских, французских и немецких колониях в Африке и Юго-Восточной Азии. На этот же период пришлось и возникновение первых пригородных поездов. В крупных европейских городах — по мере роста спроса на перевозки — часть внутригородских пассажирских потоков вобрал в себя метрополитен.

Российская Империя не оставалась в стороне от общеевропейского технического прогресса. Значительно увеличившееся во второй половине XIX в. население российских городов — промышленных центров и потребности этого населения в способах быстрого внутригородского и пригородного перемещения естественным образом поставили перед городскими властями задачу развития общественного транспорта. Первая линия электрического трамвая на территории современной России появилась в 1895 г. в Калининграде (правда, в то время город назывался Кёни-

гсбергом и принадлежал Германии), вторая — в Киеве в 1892 году. Далее трамвайные маршруты возникли в Нижнем Новгороде (1896), Екатеринославе и Елисаветграде (1897), Курске, Севастополе (1898), Москве, Казани (1899) и — до конца XIX в. — еще в двух десятках городов. В Санкт-Петербург трамвайное сообщение пришло лишь в 1907 г. [19]

Следует отметить, что в России до 1917 г. существовали как минимум три трамвайных маршрута, выходящих в пригороды крупных городов. В 1887 году из центра Москвы были пущены маршруты паровых трамваев (впоследствии заменённые на электрические) в пригородный район Петровско-Разумовское и на Воробьёвы Горы. В Санкт-Петербурге трамвайные пути были проложены в Ораниенбаум через Стрельну и Петергоф, однако фактически конечной остановкой маршрута являлась Стрельна. Эта уникальная пригородная линия, получившая название ОРАНЭЛ (Ораниенбаумская электрическая линия), была включена в ленинградскую городскую трамвайную сеть лишь в 1929 году [20].

До 1917 г. трамвайные сети в основном были узкоколейными. При этом количественно большее число вагонов эксплуатировалось на широкой колее, поскольку ширококолейными являлись две самые крупные сети России — Петроградская и Московская. Трамвай Ростова-на-Дону ездил по степенсоновской колее в 1435 мм, а в Киеве колея составляла 1511 мм (однако, киевские вагоны были совместимы со стандартной колеёй в 1524 мм). Вагоны использовались преимущественно французские и английские [19].

Дореволюционное железнодорожное пригородное сообщение было представлено несколькими линиями т.н. «дачных» поездов в пригородах Москвы и Санкт-Петербурга. Их отличительной особенностью были короткие (до 20-30 км от городских вокзалов) маршруты, небольшая составность (1-2 вагона) и наличие нескольких десятков остановок в пригородных зонах. Дачные поезда ходили на паровой тяге. Электрификация пригородного сообщения была начата уже после Октябрьской революции 1917 г. [21].

В к. XIX — перв. пол. XX вв. в центральной Европе возник тип внутригородского/пригородного сообщения, связывающий между собой железные дороги и

трамвайные линии. Пионером в данной области выступил город Сараево, принадлежавший Австро-Венгрии (ныне — столица Боснии и Герцеговины). В 1885 году, после запуска сараевского трамвая, железнодорожные и трамвайные линии города были соединены в единую сеть, по которой осуществлялось грузовое сообщение — в основном для подвоза сырья на крупную табачную фабрику. Специально для этой цели в Сараево для трамвая была выбрана т.н. «боснийская железнодорожная колея» в 760 миллиметров. В г. Берне (Швейцария) в период 1901-1965 гг. пригородные поезда трех линий курсировали на части пути по трамвайным рельсам. К концу XX в. из трех бернских линий сохранилась одна. С первой половины XX в. аналогичные технические решения применялись в австрийских городах Зальцбурге и Больцано (после Первой мировой войны Больцано был передан Италии), а также в швейцарском Люцерне (1900-1961).

В 1920–60-х гг. в германских городах Карлсруэ, Штутгарт и Вайнгартен на нескольких участках внутригородских и пригородных маршрутов применялся трёхниточный путь, по которому одновременно могли ходить поезда и трамваи. В тот же период в Германии параллельно функционировала несколько иная технологическая схема соединения железных дорог и трамвайных путей. Так, часть маршрута 120-й линии берлинского трамвая с 1923 по 1945 г. была совмещена с местной железной дорогой. Линия была разрушена во время штурма Берлина в 1945 году и впоследствии демонтирована. В г. Фленсбург (Шлезвиг-Гольштейн) трамвай 4-й линии ходил с 1925 по 1935 год в соседний город Глюксбург. За городскими пределами трамвай использовал железнодорожные рельсы, идущие вдоль Балтийского моря. Все эти примеры говорят о том, что именно в центральной Европе, особенно — в Германии, уже до Второй мировой войны существовали технические предпосылки для появления в дальнейшем «трамваев-поездов».

В России, а позже — и в СССР также были примеры взаимодействия железнодорожных и трамвайных систем. В 1914 году в г. Петрограде был запущен городской грузовой электротранспорт на базе трамвая. Трамвайные рельсы использовались в качестве подъездных путей к ведущим петроградским промышленным предприятиям, выпускавшим военную и иную продукцию. По рельсам подавались

вагоны под погрузку, выгрузку при помощи маневровых локомотивов или трамвайных вагонов. Петроградский — а затем ленинградский — грузовой трамвай функционировал до 1997 г., перевозя на пике своего развития ежегодные объемы грузов в размере 40 тыс. железнодорожных вагонов [22]. В 1915 году была открыта первая линия московского грузового трамвая (впоследствии их стало две). Он активно использовался в транспортной системе города лишь два периода: 1915–1921 — время Первой мировой и Гражданской войн; 1931–1945 — время индустриализации и Великой Отечественной войны. Далее роль грузового трамвая в Москве неуклонно снижалась, вплоть до окончательного закрытия линий в 1972 г. [19]. Однако можно констатировать, что опыт взаимодействия железнодорожно-трамвайных инфраструктур есть и в России.

На развитие мировых транспортных систем в послевоенные (1950-1980-е) годы большое влияние оказала продолжающаяся урбанизация. Города повсеместно вбирали в себя пригороды, распространялись на пустующие околгородские земли. Этот процесс сопровождался возникновением новой проблемы – если раньше житель города мог дойти до завода, фабрики, офиса пешком, то с ростом городов все труднее стало обходиться без транспорта. Некоторое время казалось, что потребность горожан в средствах мобильности будет разрешена за счет приобретения личных автомобилей, становившихся всё более доступными в связи с общим ростом благосостояния.

Процесс, называемый автомобилизацией населения, шёл в мире разными темпами. В США он начался в 1920–1930-х гг.; в Западной Европе личные автомобили появились с 1950-х гг., Россию, Китай, Индию массовая автомобилизация затронула лишь с 1990-х гг. Однако, практически во всех странах мира (некоторым исключением являлись США) по мере увеличения количества автомобилей личное благо владения транспортным средством вступило в противоречие с общественным интересом. «Автомобилизация стала мощным фактором, оказавшим влияние на конфигурацию городов и их удобство для жизни, — отмечает современный специалист в области транспортных систем В.Р.Вучик. — ... Одновременно она вызвала хронические заторы на улицах и скоростных магистралях» [23].

Для послевоенной Европы, где многие городские агломерации исторически сформировались вокруг компактной средневековой застройки, массовое появление автовладельцев и развитие грузовых автомобильных перевозок оказалось очень серьезной проблемой. В 1960–70-е гг. повсеместные «пробки» на городских улицах зачастую приводили к парализации хозяйственной жизни. Ответом на этот вызов стала политика европейских государств, направленная на развитие общественного транспорта, в том числе и рельсового.

К середине XX века десятки городских агломераций в Европе сформировали специализированные сети пассажирского рельсового транспорта с собственной инфраструктурой. Эти линии были отделены от грузовых путей и ориентированы исключительно на пригородно-городское пассажирское движение. В ряде городов центральной Европы в 1950–70-е гг. продолжалось совместное использование связи железнодорожных и трамвайных сетей, а также участков трёхниточного пути. В СССР исторически сложилось так, что пригородные поезда делили рельсовые пути с грузовым железнодорожным транспортом и поездами дальнего следования. В то же время города Советского союза до конца 1980-х гг. динамично развивали все виды общественного транспорта.

Тенденция широкого использования при перевозке пассажиров внутри крупных транспортных узлов преимуществ общественного рельсового транспорта продолжала свое развитие в Европе и во второй половине XX — нач. XXI вв. Эффективность использования рельсового транспорта в связке «город-пригород» подтверждена опытом ряда стран (Германия, Франция, Великобритания, Япония, СССР и др.).

Одним из ответов на возникавшие в ходе развития европейских городских агломераций требования к транспортным системам стало появление «трамваев-поездов». Идея создания «трамвая-поезда» принадлежит немецким транспортным инженерам Д.Людвигу и Х.Эммериху [24, 25]. Первый проект этой транспортной системы был разработан в 80-е годы XX века для города Карлсруэ (ФРГ, земля Баден-Вюртемберг). Дело в том, что во время послевоенной реконструкции железнодорожная пассажирская станция Карлсруэ была перенесена из центра города на его

южную окраину. Людям, прибывающим на вокзал, требовалось пересаживаться на городской наземный транспорт и далее совершать ещё одну поездку в центр города [26]. Для экономии времени пассажиров между пригородом и городским центром был запущен пробный маршрут специального гибридного подвижного состава. Эксперимент оказался удачным и получил высокую оценку специалистов [27]. В 1992 г. первый маршрут «трамвая-поезда» Карлсруэ был введен в постоянную эксплуатацию [28].

На сегодняшний день легкорельсовая транспортная система Карлсруэ — она получила название «модель Карлсруэ» — является не только в первой в мире, но и самой крупной. По городу проходит 22 трамвайных маршрута; на 17-ти из них городская инфраструктура используется для движения внутри города, а железнодорожная — для движения в пригороды и близлежащие города Среднего и Верхнего Рейна. Общая длина всех линий «трамвай-поезда» Карлсруэ, на которых расположены 363 остановки, составляет 503,6 км [29]. В постоянной эксплуатации находится 256 вагонов «трамваев-поездов», которые могут развивать скорость до 100 км/ч [29].

На рисунке 1.1 представлена схема линий рельсового транспорта г. Карлсруэ и его окрестностей. Красным обозначены городские линии трамвая. Зелёным — линии железной дороги, которые используются совместно как поездами (грузовыми и пассажирскими), так и трамваями, следующими в соседние города. Например, маршрут «S5» начинается в городе Вёрт-ам-Рейне, для перехода через реку Рейн использует железнодорожный мост, затем выходит на трамвайную сеть г. Карлсруэ, по которой пересекает весь город с запада на восток, а далее следует в пригород по железной дороге ещё 64 километра.

Вскоре по типу «модели Карлсруэ» была запущена линия «трамвай-поезда» в г. Саарбрюккен (земля Саар, ФРГ). Магистрالی этого города, находящегося на границе Германии и Франции, в 1980-е годы были сильно перегружены автомобилями. «Трамвай-поезд» помог сгладить остроту транспортной проблемы [31]. Единственный 43-х километровый маршрут «трамвай-поезда» начинается на юге,

во французском городе Саргёмин, и далее, проходя через границу, пригород и пересекая город насквозь, заканчивается в Лебахе, северном пригороде Саарбрюккена. Южные и северные железнодорожные пригородные пути соединяются со сквозной трамвайной линией, идущей по городу. «Трамвай-поезд» Саарбрюккена успешно функционирует с 1997 г. Длина маршрута увеличивалась дважды [32].

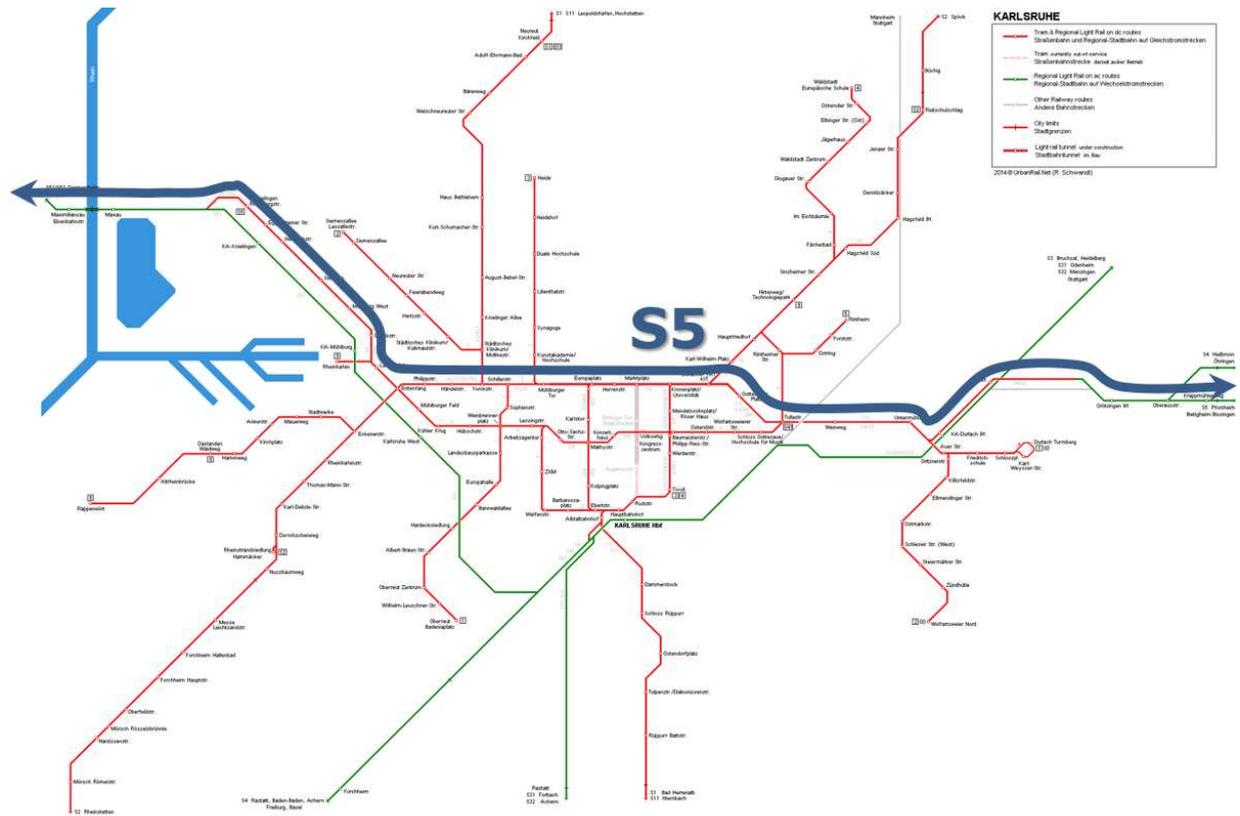


Рисунок 1.1 — Схема линий рельсового транспорта г. Карлсруэ [30]

Следующим городом, где были соединены преимущества железнодорожного и городского рельсового транспорта, стал г. Кассель (земля Гессен, ФРГ). Здесь в 2006 году из пригородов в центр были запущены сразу три линии «трамваев-поездов», получивших в Касселе название «регио-трамы» (RegioTram). Спецификой местных линий является то, что часть кассельских «регио-трамов» работает на городских трамвайных маршрутах по типу экспрессов, давая тем самым возможность жителям пригородов максимально быстро доехать до центральных районов города. К началу 2021 года в Касселе работает семь маршрутов «регио-трамов», общая длина путей — 122 км [33].

В течение первого десятилетия XXI века линии «трамваев-поездов» были открыты еще в двух немецких городах: Хемнице (Саксония) и Нордхаузене (округ Эрфурт). Кроме того, гибридные системы, соединяющие в разных вариациях трамвайные и железнодорожные пути для проезда по ним легкорельсового транспорта, существуют в Кёльне (Сев. Рейн-Вестфалия), Гейдельберге и Мангейме (Баден-Вютемберг) [34]. В Цвиккау (Саксония) трамвайные вагоны, работающие на дизельном топливе, используют совмещённое с трамваем полотно (трёхниточный путь) для заезда в центр города [35].

Удачный опыт внедрения системы «трамвай-поезд» был воспринят и другими европейскими странами. К началу третьего десятилетия XXI века «трамвай-поезда» эксплуатируются в 20 европейских городских агломерациях: в Иль-де-Франсе (Парижский регион, Франция), в Лионе, Нанте, Мюлузе (Франция), в Орхус-Летбейне (Дания), в Вене и Гмундене (Австрия), в Шеффилде (Великобритания), в Кальяре и Сассари (Италия), в Аликанте и Кадисе (Испания) [36] и др.

С 2018 года велись работы по строительству системы «трамвай-поезд» в городе Сегед, Венгрия [37]. Внутри города была произведена реконструкция 22-километрового участка неэлектрифицированной железной дороги. Запуск линии произошёл 29 сентября 2021 г. Сегедские трамвайные поезда используют для тяги дизельный двигатель. На дальнейшую перспективу существуют планы по созданию межгосударственного маршрута до г. Суботица, Сербия [38]. С 2019 года идёт строительство линии «трамвая-поезда» в г. Кардифф (Уэльс, Великобритания), запуск которой планируется в 2022-2023 гг. [39]. По состоянию на конец 2021 года продолжают работы по созданию линий «трамваев-поездов» в Лугано (Швейцария) [40]. Создан проект двух линий «трамвая-поезда» в итальянском городе Варесе (провинция Ломбардия); линии предполагается строить одновременно, соединив город с четырьмя городскими коммунами, расположенными на расстоянии 4-7 км от Варесе [41]. Предложен проект применения системы «трамвай-поезд» в Верхнесилезской агломерации (Польша) [42]. В её разветвленной трамвайной сети, связывающей 19 городов, наблюдается дефицит пропускной способности междугород-

ных участков. Кроме того, в связи с удаленностью городов друг от друга значительны затраты времени на поездку. Перенос части трамвайных маршрутов на проходящие параллельно участки железной дороги позволит решить указанные проблемы.

Проекты строительства линий «трамваев-поездов» разрабатываются и для городских агломераций за пределами Европы, в частности — для Калгари (Канада), Аделаиды (Австралия), Килугна (Тайвань), Хайфы (Израиль; работы уже начаты и запуск линии запланирован к 2025 г.) [43].

Пандемия COVID-19, безусловно, внесла коррективы в развитие пассажирского транспорта европейских городов, однако дальнейшее развитие гибридных транспортных систем продолжает быть актуальным.

На территории современной России нет систем «трамвай-поезд», но есть другие системы-гибриды. Например, в 1984 г. в Волгограде запущен скоростной трамвай — гибрид метрополитена и трамвая [44]. Кроме того, трамвайные рельсы ранее часто использовали как подъездные пути к предприятиям. По ним подавались вагоны под погрузку, выгрузку при помощи маневровых локомотивов или трамвайных вагонов. Оставшаяся от СССР производственная трамвайно-рельсовая инфраструктура, волгоградский опыт проектирования и эксплуатации скоростного трамвая — всё это может оказаться полезным для создания транспортных систем «трамвай-поезд» в российских городах.

## **1.2 Развитие теории об эффективности видов транспортных систем в различных условиях**

Отечественная наука внесла большой вклад в теорию организации и эффективной работы транспортных систем в городских агломерациях.

Так, в исследованиях, выполненных Правдиным Н.В. и Негреем В.Я. решены задачи по разработке методов прогнозирования пассажиропотоков с использованием методов корреляционно-регрессионного анализа в условиях крупных городов [45].

Кочнев Ф.П., Пазойский Ю.О., Вакуленко С.П. рассматривали вопросы зонного движения пригородных поездов, в их трудах определены методы расчета размеров движения пригородных поездов в зависимости от густоты пассажиропотока и обоснован выбор оптимального графика движения пригородных поездов [46, 47, 48]. В.И. Терзи проведены исследования в области влияния интервала и очередности отправления пригородных поездов на населенность вагонов, ему же принадлежат разработки метода расчета среднесуточных пассажиропотоков [49]. Вопросами взаимодействия железнодорожного транспорта и метрополитена в системе транспортного обслуживания крупных городов и их пригородных зон занимался Голубев П.В. [50]. Самарцев П.В. проводил исследования в области оценки возможности использования пригородных электропоездов как городского вида транспорта [51] и др.

Также в области исследования и развития пассажирских перевозок в городских агломерациях проводили исследования Азаренкова З.В. [52], Шабарова Э.В. [53], Бещева Н.И. [54], Мурашов В.А. [55], Бранзия Р.Л. [56], Кондратенко В.В. [57], Угрюмов А.К., Кудрявцев В.А. [58].

В области методов моделирования и оптимизации работы транспортных систем исследования вели ученые Лещинский Е.И. [59], Акулиничев В.М. [60, 61], Персианов В.А. [62], Моисеев Н.Н. [63], Мугинштейн Л.А. [64].

И.Н. Шапкиным в начале 1980-х годов впервые был выполнен комплекс исследований по пассажирским техническим станциям на основе новых математических методов [65]. Им была разработана статистическая имитационная модель пассажирской технической станции, позволяющая анализировать ее работу с учетом схемы путевого развития. На основе теории чувствительности автором была разработана методика планирования работ по увеличению технического оснащения пассажирских станций, а также оптимизации технологического цикла и структуры работы этих станций.

Разработкой научных и прикладных исследований с использованием аппарата имитационного моделирования транспортных процессов занимались Козлов П.А. [66], Тушин Н.А. [67], Пермикин В.Ю. [68].

Колокольников В.С. [69] предложил принципиальную структуру и функции автоматизированной системы для построения имитационных моделей железнодорожных станций с целью проведения их детального структурно-технологического исследования. При этом определяются методические основы проведения автоматизированного структурно-технологического исследования и его основные этапы.

В диссертации Тимухиной Е.Н. [70] исследована природа функциональной надежности железнодорожных станций и характер влияния на нее технологических сбоев, разработана методология оценки уровня функциональной надежности методом имитационного моделирования с оптимизирующими процедурами, предложена методика определения функциональной уязвимости транспортных систем при нарушении работоспособности того или иного ее элемента, разработаны способы повышения функциональной надежности за счет повышения адаптивности транспортной системы и специальных режимов управления.

Докторская диссертация Александрова А.Э. посвящена методологии моделирования транспортных систем, которая позволяет использовать модели строгой оптимизации, оптимизацию на имитационных моделях, а также применять двухуровневую систему оптимизации [71]. Методология позволяет выбрать способ моделирования в зависимости от поставленной задачи и заданных свойств объекта.

В диссертации Слободянюк И. Г. [72] применены рационализированные методы моделирования работы станционный инфраструктуры. Для этого применен функциональный подход к моделированию, когда технологический процесс использования элементов станций задается в виде последовательности укрупненных операций. Такой подход позволяет ускорить проведение моделирования крупных станций и железнодорожных узлов.

В [73] предложена технология обслуживания пригородных перевозок на малоделятельных линиях с использованием облегченных рельсовых автобусов (серийные автобусы ЛИАЗ, МАЗ, ПАЗ на комбинированном железнодорожном ходу). Однако, применение такого подвижного состава накладывает ограничение на производство других передвижений обычного (тяжелого) подвижного состава по желез-

нодорожной инфраструктуре внутри станций и на перегонах. Как вариант технологии, рельсовому автобусу предложено начальные и конечные участки маршрута следовать по автомобильным дорогам, с конечным пунктом на привокзальной площади. К сожалению, отсутствие в современной России нормативной базы, регулирующей применение подвижного состава на комбинированном ходу для регулярных пассажирских перевозок, не позволило организовать такие маршруты до настоящего времени.

При подготовке диссертационной работы было проведено исследование мировых тенденций в области организации транспортных систем «трамвай-поезд». Первые труды в этой области появились в 1980–90-х годах и принадлежали немецким ученым: Ludwig, D.; Drechsler, G. В них впервые была разработана концепция единого маршрута, использующего инфраструктуру городского трамвая и железной дороги для организации прямого пассажирского сообщения между пригородными зонами и городским центром [27]; в дальнейшем она получила название «модель Карлсруэ».

Исследования воплотились в региональный план развития общественного транспорта г. Карлсруэ 1979 года [26], после реализации которого «трамвай-поезд» стал полноценным видом агломерационного транспорта, выполняющим одну из главных ролей в обеспечении пригородно-городских перевозок.

Группой специалистов Института транспортного планирования и систем (Цюрих, Швейцария) [74] проанализированы запущенные в Европе системы «трамвай-поезд» и внешние условия их функционирования. На основе анализа факторов и особенностей работы систем разработан перечень критериев, по которым возможно оценить возможную нишу эффективного использования такой бимодальной технологии.

### 1.3 Современные условия и требования к системе транспортного обслуживания в агломерациях

Одним из главных условий динамичного развития любой агломерации является устойчивое и эффективное транспортное обслуживание населения. Для всех групп населения, включенных в региональные экономические и социально-политические процессы, важна исправная, работающая по графику сеть городского общественного транспорта с надежной и развитой инфраструктурой. При этом, к сожалению, запросы общества на социальную услугу перевозки пассажиров вступают в противоречие с финансовыми реалиями. Во всем мире общественный городской транспорт является убыточным (иногда крупные транспортные компании десятилетиями закрывают годовые балансы с дефицитом<sup>2</sup>) [57]; в России он также существует с постоянным привлечением федеральных и местных дотаций.

В этих условиях особое значение приобретают инструменты экономического развития городских и пригородных транспортных систем. Названные инструменты подкреплены рядом российских законодательных актов стимулирующего характера. В частности — законами о государственно-частном и муниципально-частном партнерстве [75], о лизинге [76], о концессиях [77] и др.

Например, применяются лизинговые инструменты для приобретения нового моторвагонного подвижного состава пригородными перевозчиками [78]. Лизинг — это кредитная финансовая услуга (финансовая аренда), с помощью которой предприятие пользуется взятым в кредит техническим средством, зарабатывает на нем, постепенно расплачиваясь с лизингодателем, а в итоге получает объект лизинга в собственность.

Всё чаще операторами городского транспорта при закупке подвижного состава у производителя покупается и обслуживание этого подвижного состава на срок, равный сроку службы приобретаемого подвижного состава — т.н. контракт жизненного цикла (КЖЦ). Такая система позволяет повысить заинтересованность

---

<sup>2</sup> Например, канадская частно-государственная компания «Via Rail» больше 30 лет вела бизнес в сфере железнодорожных пассажирских перевозок, оставаясь устойчиво убыточной.

производителя в поставке продукции высокого качества, упростить для оператора эксплуатацию подвижного состава, при производстве которого были применены новые технологии и технические решения, и обслуживание которого требует особых компетенций. Подвижной состав по КЖЦ приобрели ГУП «Московский метрополитен», ГУП «Мосгортранс» [79].

Частно-государственное партнерство в сфере транспортного обслуживания осуществляются в форме концессионных соглашений, для чего в России создана необходимая правовая база [80]. Концессия — одна из форм инвестиционной деятельности, закрепленная Гражданским кодексом РФ и соответствующим законом [77]. Концессионное соглашение представляет собой договор, по которому фирма-концессионер за счет собственных средств строит или реконструирует некий имущественный объект. Сам объект продолжает оставаться в федеральной, региональной либо муниципальной собственности, однако концессионер получает на определенный срок право эксплуатации объекта с извлечением прибыли в свою пользу. Примером частно-государственного партнерства в форме концессионного соглашения является трамвайная сеть под брендовым названием «Чижик», построенная частной Транспортной концессионной компанией. Маршрут «Чижика» идет от ст. метро «Ладожская» до пригородной станции железной дороги «Ржевка». Соглашение между концессионером и городской администрацией Санкт-Петербурга заключено на 30 лет, из них три года заняла реконструкция сети в районе Красногвардейский. Далее «Чижик» будет работать в пользу концессионера 27 лет [81].

К началу 2019 года в сфере транспорта была начата реализация 87 проектов государственно-частного партнерства в сфере транспорта и транспортной инфраструктуры с общим объемом частных инвестиций в размере 1,03 млрд. руб. [82], однако доля транспортных концессионных проектов находится на уровне 3 % от общего количества заключаемых в России концессионных соглашений (по состоянию на начало 2020 г.) [83]. Большую часть концессий вбирает в себя сфера жилищно-коммунального хозяйства. Пандемия COVID-19 временно приостановила заключение концессионных соглашений, однако заключенные ранее договоры продолжают выполняться.

Еще одним экономическим инструментом, имеющим потенциал к улучшению ситуации с транспортным обслуживанием населения, является внедрение брутто-контрактов. В настоящее время в большинстве регионов России частные перевозчики соревнуются на тендере с конкурентами за возможность предоставить услугу перевозки пассажиров. Таким образом, каждый перевозчик заинтересован перевезти в своих транспортных средствах наибольшее число людей (чтобы компенсировать себе затраты на подвижной состав и получить прибыль), следовательно, ему выгодно работать в часы «пик» и невыгодно — в периоды малого спроса на перевозку. Удивительно, но такая практика десятилетиями сохраняется в регионах России и у местных властей нет экономических средств для борьбы с подобной практикой, кроме прямого регулирования и контроля.

Брутто-контракты меняют акценты: компания-перевозчик выполняет задание муниципалитета не по объему перевозок, а по километражу, и вне зависимости от количества пассажиров получает оплату за пробег транспортных средств в километрах, за соблюдение определенных местными властями интервалов и графика движения. При этом оплата за билеты, купленные пассажирами, поступает в бюджет муниципалитета, а не перевозчика.

В западных странах брутто-контракты распространены практически повсеместно. При всей выгоде этого вида соглашения его дальнейшему распространению мешает отсутствие в России правовой базы для заключения брутто-контрактов.

Тарифная политика в транспортных системах агломераций должна быть нацелена на стимулирование использования жителями общественного транспорта. Требуется введение скидок на «длинные» по сроку проездные (месячные, полугодовые, годовые), введение пересадочных тарифов на билеты городского общественного транспорта (тариф, при котором пассажир платит за поездку, а не за количество входов в каждое следующее маршрутное транспортное средство). При этом система оплаты пригородных железнодорожных перевозок должна быть интегрирована в городскую систему оплаты. Следовательно, транспортная система

должна предлагать понятное пассажиру общее «тарифное меню» на поездки внутри города, из города в пригород, внутри пригородной зоны.

Одной из проблем транспортного обслуживания в крупных городах, где перевозки осуществляются несколькими видами общественного транспорта, является низкое качество информации для пассажиров. Чем крупнее город, тем острее ощущается этот недостаток — как для трудового населения города, туристов, так и для людей с ограниченными возможностями. В 2011 г. был утвержден ГОСТ «Интеллектуальные транспортные системы. Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем» [84]. Реализация приказа сталкивается на практике с недостатком финансирования в регионах. Поэтому проблема перестройки местных информационных сервисов в соответствии с принятым стандартом продолжает стоять перед местными властями достаточно остро.

Руководствуясь Транспортной стратегией РФ до 2030 года [2], Министерство транспорта Российской Федерации в 2017 году приняло социальный стандарт транспортного обслуживания [85], под которым понимается «выполнение работ по осуществлению перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом по маршрутам регулярных перевозок» [85]. Стандарт определяет для общественного транспорта три главных качественных показателя транспортного обслуживания: доступность, надежность и комфортность. Для пригородно-городских железных дорог подобного стандарта пока не создано, однако положения существующего могут быть экстраполированы на весь пассажирский рельсовый транспорт в городах и его окрестностях.

Применение указанных новаций в работе пригородно-городских транспортных систем позволит значительно повысить качество предоставляемой пассажирам транспортной услуги.

#### **1.4 Сравнительная характеристика агломерационных транспортных систем**

В значительной части крупных городов США перевозки полностью или по-

чти полностью осуществляются легковым автомобильным транспортом [86]. Данная тенденция в целом сохранилась до начала XXI в. Общественный транспорт, если не принимать в расчёт достаточно массовые и недорогие легковые такси, в США почти полностью отсутствовал. Его мало и в наши дни. Такой транспортной ситуации способствует планировка сети городских улиц в американских городах — в подавляющей части городов прямоугольная или приближающаяся к ней, с большим количеством пригодных для движения автотранспорта (но тоже не чрезмерно широких) городских улиц при сравнительно малой длине сторон городских кварталов (в среднем 150 м) [87].

В Европе исторически, учитывая планировку улично-дорожной сети городов и параметры городских улиц, всегда уделяли большое внимание общественному пассажирскому транспорту. В европейских городах этому не помешала и достаточно быстрая автомобилизация общества, пришедшаяся на 1950-60-е годы. Одно время проявилась тенденция сокращения, а кое-где и полная ликвидация трамвая, как мешающего движению легковых автомобилей. В настоящее время эта тенденция полностью себя исчерпала и во многих городах Европы трамвай (в виде систем LRT — light rail transport — легкий рельсовый транспорт) возвращает своё лидирующее положение в области перевозки городских пассажиров (во Франции, Швейцарии, Швеции, Германии, Великобритании, Италии, Словакии и других странах). Это происходит на фоне общей транспортной политики, направленной на снижение использования личного автотранспорта для ежедневных поездок, и стимуляции использования общественного транспорта.

Следует признать, что общих черт у российских и зарубежных агломераций больше, чем различий. Поэтому для российских властей представляется логичным и оправданным взять на вооружение зарубежный опыт, особенно европейский, в решении транспортных проблем агломераций и всемерного развития в них общественного транспорта. Применение бимодальных транспортных систем (использующих два вида транспорта) — это способ улучшения качества агломерационных транспортных систем. Анализ технологии «трамвай-поезда» в российских условиях приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Анализ технологии «трамвай-поезд» в российских условиях

Параметр	Фактор
Сильные стороны	Экономия времени пассажиров на передвижение в корреспонденциях город-пригород, повышение удобства для пассажиров и, как следствие, — улучшение связанности территорий. Капитальные вложения в инфраструктуру меньше, чем при организации отдельных линий трамвая или железной дороги. Меньшая вместимость подвижного состава системы «трамвай-поезд» относительно железнодорожного на линиях с низким пассажиропотоком, которая позволит более эффективно использовать подвижной состав.
Слабые стороны	Усложнение системы взаимодействия транспорта. Требуется разработка специального подвижного состава. Требуется модернизация инфраструктуры на участках обращения «трамваев-поездов» <sup>3</sup> . Требуется разработка правовых механизмов взаимодействия участников перевозочного процесса. Требуется финансирование.
Возможности	Возможность создания маршрутов рельсового транспорта с использованием двух инфраструктур (городского трамвая и железной дороги). Использование общей деповской и пассажирской инфраструктуры. Использование уже существующей, но малонагруженной железнодорожной инфраструктуры для организации пассажирского сообщения. Возможность использования более легких норм проектирования при прокладке инфраструктуры рельсового транспорта в стесненных условиях.
Угрозы	Нарушения графика движения поездов на железной дороге из-за дорожной обстановки в городе. Меньшая вместимость подвижного состава относительно железнодорожного на линиях с высоким пассажиропотоком, которая создает угрозу необеспечения потребной провозной способности.

В городах с развитой сетью легкого рельсового транспорта люди затрачивают меньше времени на поездки по городу. Предлагаемая технология призвана

<sup>3</sup> Потребную степень реконструкции будет возможно определить по результатам дополнительных исследований и в рамках конкретных проектов.

ещё больше сократить время в пути для пассажиров, убрав необходимость в совершении пересадки и связанных с этим затрат времени (рисунок 1.2). Благодаря этому система будет перетягивать на себя пассажиров не только с традиционных видов транспорта, но и снижать использование личного автомобиля для поездок.



Рисунок 1.2 — Сравнение вариантов маршрута следования пассажира при наличии и / отсутствии «трамвай-поезда»

### 1.5 Пути повышения качества транспортного обслуживания населения с применением системы «трамвай-поезд». Постановка задачи исследования

Применение системы «трамвай-поезд» позволит на технологическом уровне увязать расписание городского и пригородного транспорта и предложить пассажирам единую тарифную систему. Таким образом, снижается нагрузка на пересадочные комплексы, уменьшается общее время ожидания пассажирами транспорта на остановках в городе и на железнодорожных платформах, сокращаются затраты времени и сил пассажиров на пересадку между разными видами транспорта, облегчается для них прохождение процедур транспортной безопасности.

В условиях тенденции к сокращению и выведению за пределы городов крупных промышленных предприятий инфраструктура, которая раньше обеспечивала работу этих предприятий, большую часть времени не загружена [6].

При этом ценнейшим ресурсом в городе является земля, в т.ч. и под железнодорожными путями, которая используется неэффективно для города в случае малоинтенсивного движения. Совместное использование инфраструктуры рельсового транспорта позволит снизить издержки на организацию пассажирского сообщения [6].

Для достижения цели исследования, указанной во введении настоящей диссертации, решаются следующие задачи:

- определение технологических параметров транспортной системы «трамвай-поезд»;
- создание модели расчета параметров надежности транспортных систем;
- разработка методических принципов определения сферы применения транспортных систем в городских агломерациях.

Структура задач диссертационного исследования имеет следующее формализованное описание.

Исходное состояние транспортной системы узла характеризуют наборы параметров, описывающих:

- инфраструктуру рельсового транспорта

$$W^0 = \{W_{\text{жд}}^0; W_{\text{тс}}^0; W_{\text{ноп}}^0\}, \quad (1.1)$$

- технологию перевозочного процесса, включая графики движения,

$$X^0 = \{X_{\text{жд}}^0; X_{\text{тс}}^0; X_{\text{ноп}}^0\}, \quad (1.2)$$

- парк пассажирского подвижного состава

$$M^0 = \{M_{\text{жд}}^0; M_{\text{тс}}^0\}, \quad (1.3)$$

- пассажиропотоки

$$A^0 = \{A_{\text{жд}}^0; A_{\text{тс}}^0; A_{\text{пер}}^0\}. \quad (1.4)$$

Переменные, составляющие вектор  $W_{\text{жд}}^0$ , характеризуют путевое развитие и техническое оснащение железнодорожной инфраструктуры общего пользования,  $W_{\text{тс}}^0$  — то же для трамвайной сети, а  $W_{\text{ноп}}^0$  — для железнодорожных путей необщего пользования. Аналогичны значения индексов в наборах параметров (1.2) и (1.3). Переменные, составляющие вектор  $A_{\text{жд}}^0$ , описывают набор пассажирских корреспонденций пригородно-городского железнодорожного транспорта, не имеющих

пересадки между железной дорогой и трамвайной сетью,  $A_{\text{ТС}}^0$  — то же для корреспонденций трамвайной сети,  $A_{\text{пер}}^0$  — корреспонденции с пересадкой между железной дорогой и трамвайной сетью.

Результирующее состояние предусматривает внедрение на полигоне городской агломерации нового транспортного продукта, который характеризуют наборы параметров:

- совмещенной инфраструктуры  $W'$ ;
- интегрированной технологии  $X'$ ;
- парка бимодального пассажирского подвижного состава  $M'$ ;
- корреспонденций беспересадочных пассажиропотоков  $A'_{\text{бп}}$ .

Требуется обосновать эффективные параметры перехода от исходного состояния к результирующему, обеспечивающие:

- повышение качества транспортного обслуживания

$$\Delta K = f_1(W^0 \cup W'; X^0 \cup X'; M^0 \cup M'); \quad (1.5)$$

- увеличение пассажиропотоков

$$\Delta A = f_2(X^0 \cup X'; \Delta K); \quad (1.6)$$

- улучшение финансовых результатов участников перевозок

$$\Delta R = f_3(W^0 \cup W'; X^0 \cup X'; M^0 \cup M'; A_{\text{жд}}^0 \cup A_{\text{ТС}}^0 \cup A'_{\text{бп}} \cup \Delta A; \Delta K) \quad (1.7)$$

при ограничениях на доступные ресурсы по типам:

- инфраструктурные

$$W_{\text{потр}} = f_4(X^0 \cup X'; M^0 \cup M') \leq W^*; \quad (1.8)$$

- перевозочные

$$M_{\text{потр}} = f_5(W^0 \cup W'; X^0 \cup X') \leq M^*; \quad (1.9)$$

- финансовые

$$R_{\text{потр}} = f_6(W^0 \cup W'; X^0 \cup X'; M^0 \cup M'; A_{\text{жд}}^0 \cup A_{\text{ТС}}^0 \cup A'_{\text{бп}} \cup \Delta A; \Delta K) \leq R^* \quad (1.10)$$

и на необходимый уровень надежности перевозочного процесса

$$H_{\text{потр}} = f_7(W^0 \cup W'; X^0 \cup X'; M^0 \cup M') \geq H^*. \quad (1.11)$$

С учетом постановки (1.1 — 1.11) структурная схема исследования представлена на рисунке 1.3.

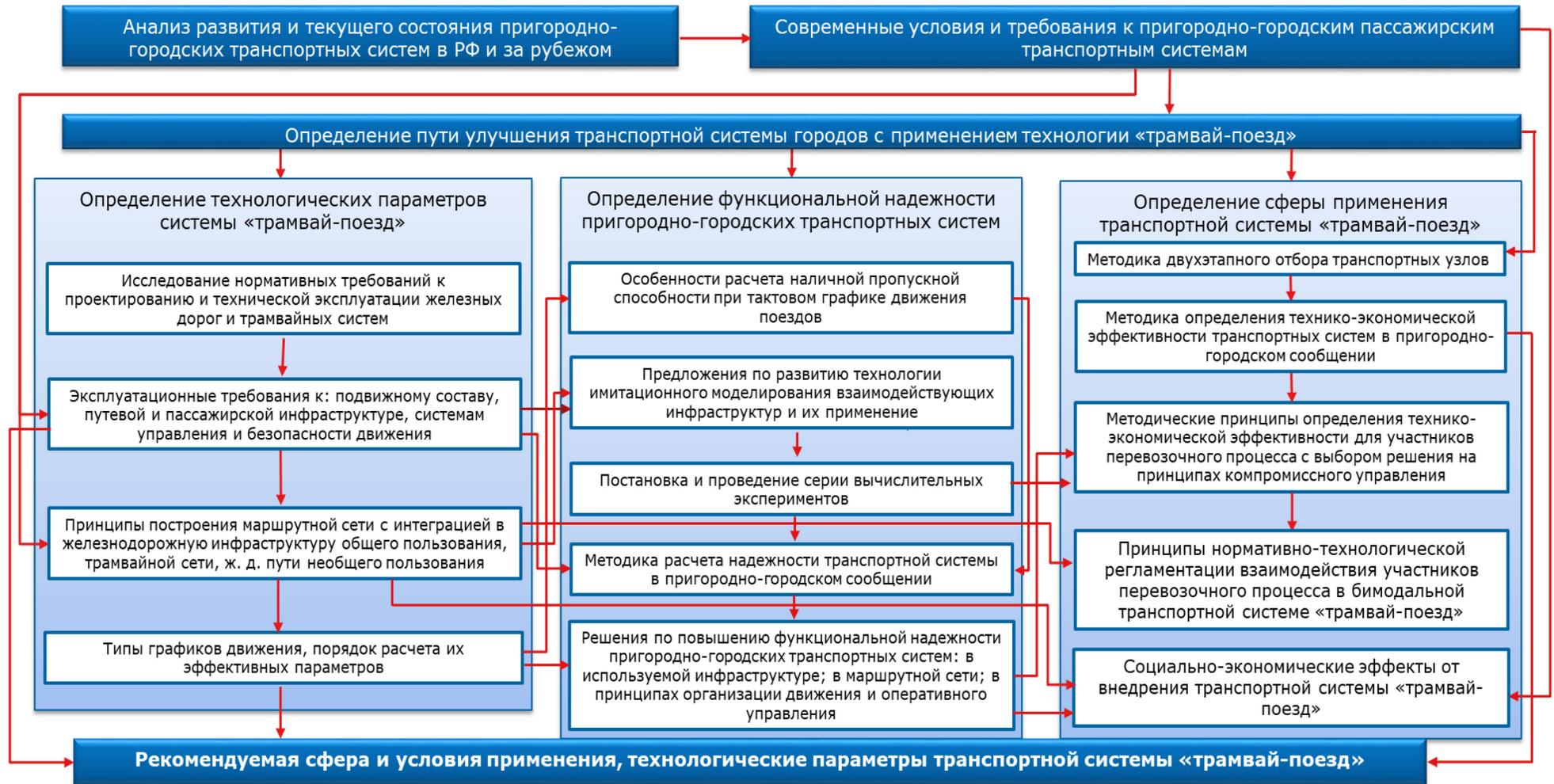


Рисунок 1.3 — Структурная схема диссертационного исследования

## Выводы по 1 главе

1. Выполнен анализ основных факторов, влияющих на эффективность перевозочного процесса и обслуживания пассажиропотоков при внедрении беспересадочных бимодальных транспортных систем. Преимуществами бимодальной пассажирской транспортной системы «трамвай-поезд» являются: экономия времени пассажиров и улучшение связанности территорий, меньшая капиталоемкость и энергоемкость подвижного состава, использование существующих рельсовых инфраструктур с уменьшением потребности в дополнительном путевом развитии и мощности транспортно-пересадочных узлов. Однако, при этом требуется разработка и строительство специального подвижного состава, устройство примыканий к железнодорожной сети, разработка технологии и организационно-правовых механизмов взаимодействия участников перевозочного процесса.

2. Формализованное описание задач диссертационного исследования включает в себя:

— исходное состояние транспортной системы узла с наборами параметров, описывающих инфраструктуру рельсового транспорта и технологию перевозочного процесса, включая графики движения, а также парк пассажирского подвижного состава и пассажиропотоки;

— результирующее состояние, которое предусматривает внедрение на полигоне городской агломерации нового транспортного продукта с наборами параметров совмещенной инфраструктуры, интегрированной технологии, парка бимодального пассажирского подвижного состава, корреспонденций беспересадочных пассажиропотоков.

3. Требуется обосновать эффективные параметры перехода от исходного состояния к результирующему, обеспечивающие повышение качества транспортного обслуживания, увеличение пассажиропотоков, улучшение финансовых результа-

тов участников перевозок при ограничениях на доступные ресурсы: инфраструктурные, перевозочные, финансовые, а также на необходимый уровень надежности перевозочного процесса.

4. Для достижения указанных результатов необходимо провести исследование технологических параметров транспортной системы «трамвай-поезд», функциональной надежности пригородно-городских транспортных систем, сфер применения транспортной системы «трамвай-поезд».

## ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ «ТРАМВАЙ-ПОЕЗД»

### 2.1 Основные положения

Анализ законодательства, нормативных актов и тематической литературы позволил сформулировать основные требования к практике эксплуатации пассажирских рельсовых транспортных систем для движения «трамваев-поездов». Данные требования включают несколько принципиальных положений:

1) безопасность для пассажиров пользования транспортным средством, достигаемая за счет обеспечения безусловной безопасности движения поездов и других участников движения;

2) обеспечение стабильного предоставления пассажирам городской агломерации транспортной услуги;

3) сохранение технологического процесса работы как железной дороги, связанной с системой «трамвай-поезд», так и предприятий — владельцев путей общего пользования, по которым организуется движение «трамваев-поездов».

Для организации сообщения в бимодальной транспортной системе «трамвай-поезд» необходимо обозначить эксплуатационные требования ко всем объектам в системе: инфраструктуре, подвижному составу, пассажирским обустройствам и системам безопасности движения. Совокупность этих параметров позволяет определить возможности транспортной системы по организации маршрутов для перевозки пассажиров. Предполагается, что «трамвай-поезд» будет одновременно эксплуатироваться на сети железных дорог и на городской рельсовой инфраструктуре. Поэтому требования к инфраструктуре и подвижному составу регулируются техническим регламентом Таможенного союза [88], Правилами технической эксплуатации железных дорог [89], трамвая [90], Строительными нормами и правилами [91, 92, 93] и другими нормативно-правовыми актами [94].

Технологический процесс работы транспортной системы «трамвай-поезд» должен регламентировать:

— разработку и согласование маршрутной сети «трамваев-поездов»;

- разработку нормативного графика движения поездов, расписаний городского трамвая, контактных графиков, графика оборота подвижного состава;
- организацию работы водителей ССПС — «трамваев-поездов»;
- оперативное управление и взаимодействие диспетчерского персонала участников перевозочного процесса при движении «трамваев-поездов» по графику и при отклонениях от нормальной работы;
- организацию технического обслуживания и ремонта подвижного состава.

При организации движения поездов по технологии «трамвай-поезд» требуется аттестация машинистов пригородного движения для работы на городской трамвайной инфраструктуре. Управление движением «трамвая-поезда» должна осуществлять локомотивная бригада, состоящая из одного человека.

Важно принимать во внимание перспективу удешевления инфраструктурных мероприятий за счет применения нормативов легкого рельсового транспорта по сравнению с нормативами устройства железных дорог (в части экологии, шумозащиты, пересечения с автодорогами и др.), а также возможность использования капиталоемкой инфраструктуры (тоннели, мосты, путепроводы) для движения как обычных поездов, так и «трамваев-поездов». Местом взаимодействия двух инфраструктур в физическом виде будут трамвайно-железнодорожные соединительные линии — «гейты».

## **2.2 Эксплуатационные требования к подвижному составу**

Для использования в бимодальной транспортной системе «трамвай-поезд» подвижной состав должен отвечать повышенному количеству требований, так как ему предстоит работать на участках инфраструктуры с различными Правилами технической эксплуатации. Для определения гармонизированного свода требований к подвижному составу системы «трамвай-поезд» рассмотрены нормативные документы взаимодействующих инфраструктур железной дороги [89], трамвая [90] и технический регламент Таможенного союза для железнодорожного подвижного

состава [88] и «Проект технического регламента Евразийского союза для легкорельсовых транспортных средств, трамваев» [95].

Сейчас в регламенте Таможенного союза [88] выделяются 5 видов железнодорожного подвижного состава: локомотивы; моторвагонный подвижной состав и его вагоны; пассажирские вагоны локомотивной тяги; грузовые вагоны; специальный железнодорожный подвижной состав. На подвижной состав типа «трамвай-поезд» накладываются требования и ограничения по регламенту [88] в качестве моторвагонного подвижного состава (МВПС) и в качестве специального самоходного подвижного состава (ССПС).

В Проекте технического регламента Евразийского экономического союза «О безопасности легкорельсовых транспортных систем / трамваев» [95] вводится определение «ЛТС» — легкорельсовое транспортное средство, трамвай. Тот же документ относит трамваи, конструкционная скорость которых составляет более 80 км/ч, к «скоростным ЛТС». Поскольку «трамвай-поезда» должны обладать скоростными характеристиками, близкими к уже обращающемуся на железной дороге моторвагонному подвижному составу с конструкционной скоростью 120 км/ч, то требования к подвижному составу типа «трамвай-поезд» следует устанавливать как для «скоростного ЛТС» [95].

Сравнение требований нормативных документов к подвижному составу и результирующий итог данного сравнения приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Перечень требований к подвижному составу транспортной системы «трамвай-поезд»

Параметр / требование		Железнодорожный подвижной состав	Трамвайный подвижной состав	Результирующий норматив
Ширина колеи (на прямом участке пути)		1520 мм [89]	1524 мм [90]	1520-1522 мм
Максимальная допустимая нагрузка на ось		25 тонн на ось (на путях общего пользования)	Не более 14 тонн на ось (п. 4 [90])	Не более 14 тонн на ось
Габарит	По ширине	3750 мм [94]	2600 мм [92]	Не более 2600 мм
	По высоте	5300 мм [94]	3300 мм [92]	Не более 3300 мм

Продолжение таблицы 2.1

Параметр / требование		Железнодорожный подвижной состав	Трамвайный подвижной состав	Результирующий норматив
Тормозные системы	Автоматические тормоза (действующие при разъединении вагонов)	Должны быть предусмотрены (п. 46 [88]; п. 15 [89])		Набор тормозных систем с результирующим и показателями для удовлетворения требований нормативных документов в части длины тормозного пути, удержания поезда на уклоне и во время стоянки
	Пневматические (механические) тормоза	Должны быть предусмотрены (п. 46 [88]; п. 15 [89])	Должен быть предусмотрен (п. 76 [90])	
	Электропневматический тормоз	Должен быть предусмотрен (п. 36 [88]; п. 15 [89])		
	Электродинамический тормоз		Должен быть предусмотрен (п. 76 [90])	
	Рельсовый тормоз		Должен быть предусмотрен (п. 76 [90])	
	Стояночный тормоз	Должен быть предусмотрен (п. 49 [88])	Должен быть предусмотрен (п. 75 [90])	
	Ручной тормоз	Должен быть предусмотрен п. 17 [89]	Наличие обязательно	
Устройство контроля плотности пневматической тормозной магистрали		Должно быть предусмотрено (п. 29 [88])		Наличие обязательно <sup>4</sup>
Стоп-краны		Должны быть предусмотрены; п. 16 [89]		Наличие обязательно <sup>5</sup>
Устройства поездной радиосвязи		Должны быть предусмотрены (п. 29, 36 [88]; п. 9 [89])		Наличие обязательно
Прибор контроля скорости движения		Должен быть предусмотрен (п. 29 [88]; п. 9 [89])		Наличие обязательно
Регистратор параметров движения		Должен быть предусмотрен (п. 29, 36 [88]; п. 9 [89])		Наличие обязательно
Устройства автоматической локомотивной сигнализации		Должны быть предусмотрены (п. 29, 36 [88]; п. 9 [89])		Наличие обязательно
Система автоведения поезда		Должна быть предусмотрена (п. 10 [89])		Наличие обязательно

<sup>4</sup> При наличии пневматической тормозной системы.

<sup>5</sup> При наличии в маршруте участков метрополитенов размещение стоп-кранов в пассажирском салоне недопустимо.

Продолжение таблицы 2.1

Параметр / требование	Железнодорожный подвижной состав	Трамвайный подвижной состав	Результирующий норматив
Устройства контроля бдительности машиниста и автоматической остановки	Должны быть предусмотрены (п. 38 [88]; п. 9, 10 [89])		Наличие обязательно
Автоматизированная система управления <sup>6</sup>	Должна быть предусмотрена (п. 36 [88]; п. 10 [89])		Наличие обязательно
Комплексное локомотивное устройство безопасности	Должно быть предусмотрено (п. 10 [89])		Наличие обязательно
Автоматическая пожарная сигнализация	Должна быть предусмотрена (п. 36 [88])		Наличие обязательно
Система пожаротушения	Должна быть предусмотрена (п. 10 [89])		Наличие обязательно
Устройства спутниковой навигации	Должны быть предусмотрены (п. 37 [88])	Должны быть предусмотрены (п. 16 [90])	Наличие обязательно
Система сигнализации и информирования об исправности подвижного состава		Должна быть предусмотрена (п. 25 [90])	Наличие обязательно
Устройства связи «пассажир-машинист»	Должны быть предусмотрены (п. 36 [88]; п. 10 [89])		Наличие обязательно
Система общего освещения салона	Должна быть предусмотрена (п. 42 [88])		Наличие обязательно
Система аварийного освещения салона	Должна быть предусмотрена (п. 42 [88])		Наличие обязательно
Аварийные выходы из подвижного состава	Должны быть предусмотрены (п. 43 [88])		Наличие обязательно
Экологически чистый туалетный комплекс в головном вагоне	Должен быть предусмотрен (п. 84, 91 [88])		Наличие желательно
Автоматические двери для входа/выхода в пассажирский салон с устройствами контроля положения дверей	Должны быть предусмотрены (п. 36, 88 [88]; п. 10 [89])		Наличие обязательно

<sup>6</sup> Автоматизированная система управления, обеспечивающая контроль скорости движения и возможность получать (передавать) речевую информацию при подъездах к входным и выходным светофорам, железнодорожным переездам и станциям.

Продолжение таблицы 2.1

Параметр / требование	Железнодорожный подвижной состав	Трамвайный подвижной состав	Результирующий норматив
Специально выделенные места в пассажирском салоне для проезда людей с инвалидностью и пассажиров с детьми. Устройства для заезда / погрузки инвалидной коляски	Должны быть предусмотрены (п. 90, 91 [88])	Должны быть предусмотрены (п.43 [90])	Наличие обязательно
Крэш-система (устройство, поглощающее кинетическую энергию при столкновении)	Должна быть предусмотрена (п. 8 [88])	Должна быть предусмотрена (п. 15 [90])	Наличие обязательно
Сцепные устройства, исключаяющего самопроизвольное разъединение	Должны быть предусмотрены (п. 55 [88]; п. 16 [89])	Должны быть предусмотрены (п. 51 [90])	Наличие обязательно
Энергопоглощающий аппарат сцепного устройства	Должен быть предусмотрен (п. 55 [88]; п. 16 [89])		Наличие обязательно
Переходные площадки между вагонами закрытого типа	Должны быть предусмотрены (п. 65 [88])		Наличие обязательно
Прожектор на головном вагоне	Должен быть предусмотрен (п. 93 [88])		Наличие обязательно
Два сигнальных буферных фонаря с правой и левой стороны	Должны быть предусмотрены (п. 93 [88])		Наличие обязательно
Устройства подачи сигнала малой и большой громкости	Должны быть предусмотрены (п. 95 [88])	Должны быть предусмотрены (п. 56 [90])	Наличие обязательно
Устройства автоматической идентификации бортового номера подвижного состава	Должны быть предусмотрены (п. 10 [89])		Наличие обязательно
Зеркала / видеокамеры заднего вида	Должны быть предусмотрены (п. 10 [88])		Наличие обязательно
Устройства подачи песка под колеса		Должны быть предусмотрены (п. 77 [90])	Наличие обязательно

На основе данных таблицы 2.1 и с учетом специфики работы подвижного состава типа «трамвай-поезд» были сформулированы обобщенные функциональные и эксплуатационные требования к подвижному составу «трамвая-поезда», предназначенному для эксплуатации на железных дорогах Российской Федерации и в трамвайных системах российских городов.

Для более полного учета условий эксплуатации на городских улицах и с целью исключения явно избыточных требований (например, туалетный комплекс, оборудованный для пассажиров с инвалидностью, размещение которого в вагоне трамвайного габарита значительно затруднено), предлагается в регламенте [88] выделить отдельный тип подвижного состава — «трамвай-поезд», который будет соответствовать указанному ниже перечню требований.

**1. По условиям инфраструктуры:** нагрузка на ось не более 14 тонн, ширина подвижного состава — не более 2600 мм, высота — 3300 мм (или меньше по местным требованиям), ширина колеи — 1520-1522 мм.

Вышеназванные ограничения на существующую трамвайную инфраструктуру установлены нормативными документами и могут быть частично сняты в рамках проектов запуска бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд» при модернизации или строительстве городской трамвайной инфраструктуры по стандартам путевого развития, применяемым на железнодорожном транспорте, или по стандартам «скоростного трамвая» [92].

Нормативная ширина колеи «скоростного трамвая» в соответствии с СП 98.13330.2012 [92] составляет 1521 мм. Разницу в нормативе ширины колеи в 1 мм, между железной дорогой (1520 мм) и «скоростным трамваем» (1521 мм) считаем незначительной. Поскольку, существует опыт эксплуатации поездов Allegro на направлении Санкт-Петербург — Хельсинки. Ширина колеи поезда Allegro составляет 1522 мм, так как ширина колеи на железных дорогах Финляндии составляет 1524 мм. При специально спроектированной экипажной части поезда Allegro, разница в 2 мм не накладывает значительных ограничений на скорость движения. На инфраструктуре ОАО «РЖД» максимально допустимая скорость поезда Allegro установлена 200 км/ч.

При проектировании экипажной части специального состава «трамвая-поезда», взаимодействующей с железнодорожными и трамвайными путями, поиск оптимальных конструктивных решений является полем для дальнейших исследований.

**2. По условиям безопасности** подвижной состав должен быть оборудован следующими устройствами: автоматической пожарной сигнализацией и системой пожаротушения, спутниковой навигацией, системой сигнализации и информирования об исправности составных частей подвижного состава, крэш-системой, поездной радиосвязью. Также необходимо комплексное локомотивное устройство безопасности, включающее в себя: прибор контроля скорости движения, регистратор параметров движения, устройства автоматической локомотивной сигнализации, систему автоведения поезда, устройства контроля бдительности машиниста и автоматической остановки, автоматизированную систему управления, обеспечивающую контроль скорости движения и возможность получать (передавать) речевую информацию при подъездах к входным и выходным светофорам, железнодорожным переездам и станциям. Должно быть предусмотрено оборудование подвижного состава устройствами тормозов следующих видов: пневматические, автоматические, электропневматические, электродинамические, рельсовые, стояночные, ручные. В том случае, если потребное по нормативам тормозное усилие достигается ограниченным набором видов тормозов, и некоторые виды тормозов могут взять на себя несколько функций, возможно уточнение (сокращение) перечня необходимых видов. Кроме того, при наличии пневматической тормозной системы, необходимо установить устройства контроля плотности тормозной магистрали, стоп-краны [88].

**3. Требования в части пассажирских устройств:** устройства связи «пассажир-машинист», автоматические двери с устройствами контроля их положения, система общего и аварийного освещения салона, наличие аварийных выходов из подвижного состава. Головные вагоны при эксплуатации на протяженных пригородных маршрутах должны быть оборудованы экологически чистыми туалетными комплексами, а также специально выделенными местами в пассажирском салоне для проезда людей с инвалидностью и пассажиров с детьми.

**4. Другие требования.** «Трамвай-поезд» должен быть оборудован: автоцепным устройством с энергопоглощающим аппаратом (уровень поглощаемой энергии — как у самоходного специального подвижного состава), буферными

устройствами, переходными площадками закрытого типа между вагонами, прожектором, двумя сигнальными буферными фонарями, устройствами подачи сигнала малой и большой громкости, устройствами автоматической идентификации бортового номера подвижного состава, зеркалами или видеокамерами заднего вида, устройствами подачи песка под колеса. Необходимо наличие двух постов управления, а также дверей на левую и правую стороны вагона для маршрутов, где нет устройств разворота подвижного состава. Тормозные характеристики транспортного средства должны обеспечить тормозное усилие, достаточное для остановки полностью нагруженного вагона на максимально допустимом уклоне, а также — при остановке на неблагоприятном профиле линии — для удерживания вагона от самопроизвольного ухода; уровни шума, вибрации в кабине и салоне транспортного средства должны соответствовать действующим на транспорте санитарным нормам.

Подвижной состав типа «трамвай-поезд» должен быть включен в общую систему нумерации подвижного состава железных дорог; иметь на борту установленные знаки и надписи для подвижного состава, предназначенного для работы на железных дорогах Российской Федерации.

Сформированный выше перечень требований к подвижному составу типа «трамвай-поезд» носит обязательный характер.

Кроме того, владельцы инфраструктур могут устанавливать дополнительные требования к этому виду подвижного состава на основе специфики местных условий, например, в зависимости от наличия ремонтной базы для подвижного состава, с учетом требований местного законодательства и/или заявок от региона (заказчика перевозок), в том числе — по уровню комфорта пассажиров. Могут варьироваться следующие характеристики: тип основной силовой установки (электротяга, дизель, природный газ, водородный двигатель [96]); мощность двигателя; аккумуляторная батарея или суперконденсатор для движения в автономном режиме (основной или аварийный запас хода); конструкционная скорость; минимальный радиус проходимой кривой; тип токоприёмника; пассажировместимость подвиж-

ного состава (должна соответствовать требуемому уровню провозной способности), количество сидячих мест, мест для людей с инвалидностью; высота уровня пола (должна обеспечивать высокую скорость пассажирообмена на остановочных пунктах); доля низкого пола от общей площади пассажирского салона; возможность работы по системе многих единиц (СМЕ); количество ступеней подрессоривания; перечень оборудования для информирования пассажиров; система контроля оплаты проезда и подсчета пассажиров; отопление/кондиционирование пассажирского салона и кабины водителя.

Итак, обязательный перечень требований к подвижному составу транспортной системы «трамвай-поезд» может быть сформулирован на основе международного, федерального законодательства и отраслевых нормативов; региональный заказчик при этом имеет возможность установить ряд дополнительных требований.

## **2.3 Эксплуатационные требования к путевой инфраструктуре и пассажирским обустройствам.**

### **2.3.1 Основные положения**

Требования к инфраструктуре в городской части транспортной системы «трамвай-поезд» описаны в «Своде правил проектирования трамвайных и троллейбусных линий» [92] и соответствуют требованиям к инфраструктуре для скоростного трамвая. Однако есть и ряд особенностей. О них — ниже.

*Путевая инфраструктура* состоит из участков путевого развития, принадлежащих к разным системам рельсового транспорта. Каждая из инфраструктур (железнодорожная и трамвайная) функционирует на основании собственных правил, но на участках совместной эксплуатации возникают дополнительные специфические требования.

Для снижения износа путевого хозяйства и экипажной части транспортных средств существует практика приведения путевой инфраструктуры трамвайных городских систем к стандартам сопредельных железных дорог: применение железнодорожных стрелок, подуклонка рельс и т.п. Особые участки верхнего строения

пути (стрелочные переводы, кривые, переезды и т.д.) проектируют так, чтобы обеспечить проход подвижного состава на установленной скорости. На городских улицах, предназначенных для проезда «трамваев-поездов», следует предоставить приоритет для проезда маршрутным транспортным средствам, а путевое хозяйство трамвая обособить от движения личного автотранспорта — это необходимо для повышения маршрутной скорости движения, надежности работы линии в целом, четкого соблюдения расписания движения и времени передачи транспортных единиц по трамвайно-железнодорожным соединениям.

*Трамвайно-железнодорожные соединительные линии* (далее — гейт, стык) — это специальные участки пути, где происходит примыкание трамвайного пути к сети железных дорог в качестве пути необщего пользования. Гейт необходимо оборудовать устройствами определения типа проходящего подвижного состава и устройствами контроля его технического состояния, чтобы не допустить выезда на сопредельную инфраструктуру транспортного средства, не приспособленного для движения по ней. На городских улицах не допускается напряжение в контактной сети трамвая свыше 1000 вольт [92], а на железных дорогах применяются стандарты питания 3000 вольт постоянного тока и 25000 вольт переменного тока [91]. Поэтому требуется установка нейтральной вставки в контактной сети, через которую происходит переход из одной системы тягового питания (железнодорожной) в другую (городскую). «Трамвай-поезд» должен проходить гейты и нейтральные вставки без остановки и без снижения скорости (за счет запаса кинетической энергии). Расположение нейтральной вставки необходимо проектировать в месте, позволяющем подвижному составу предварительно набрать достаточную скорость для преодоления участка нейтральной вставки на выбеге с учетом продольного профиля соединительного пути. При интенсивном движении поездов по соединяемой железнодорожной линии рекомендуется оборудовать гейты путепроводными развязками для уменьшения количества враждебных маршрутов (при соответствующем обосновании).

Схема путевого развития рельсовых систем является важным фактором, влияющим на надежность работы транспортной системы «трамвай-поезд» и устойчивость функционирования каждого отдельного участника перевозочного процесса (каждого владельца инфраструктуры) [6]. Основные технологические принципы построения схемы путевого развития в транспортной системе «трамвай-поезд» могут быть сформулированы в следующем виде:

- 1) обеспечение безопасности движения поездов;
- 2) обеспечение пропуска заданных размеров движения поездов;
- 3) максимальная параллельность выполняемых операций;
- 4) гибкость в организации маршрутов движения пассажирского транспорта.

### 2.3.2 Примеры существующих трамвайно-железнодорожных соединительных линий. Классификация трамвайно-железнодорожных соединительных линий

Для определения рекомендуемых параметров конструкции трамвайно-железнодорожных соединительных линий (гейтов) на основе открытых источников сети Интернет [97] проведен анализ уже существующих вариантов подобных конструкций по следующим критериям:

- по расположению — в центральном узле сети или на периферийных линиях;
- по назначению — для служебных, технических целей и грузовых перевозок или для организации движения бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд»;
- по типу конструкции примыкания — одноуровневые и разноуровневые;
- по наличию и типу устройств для оборота трамваев.

По приведенным критериям проведен анализ существующих схемных решений гейтов:

- узлы по типу размещения — центральные (на рисунках 2.1, 2.2, 2.4), по типу размещения — периферийные (на рисунках 2.3, 2.5–2.12);
- по назначению — для пассажирского движения (на рисунках 2.1–2.11), для служебных целей (на рисунках 2.12);

по наличию устройств оборота — с наличием устройств (на рисунках 2.1, 2.2, 2.4, 2.5, 2.7, 2.8, 2.11, 2.12), без устройств оборота (на рисунках 2.3, 2.6, 2.9, 2.10); тип устройства оборота — кольцевые (на рисунках 2.2, 2.5, 2.8, 2.11, 2.12), тупиковые (рисунки 2.4, 2.7, 2.10), кольцевые и тупиковые (рисунки 2.1, 2.11).

На соединительных линиях изменяется система питания тяговым током (рисунки 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.8-2.11), для чего в контактной сети предусмотрена нейтральная вставка. На рисунке 2.6 и 2.7 система питания тяговым током не изменяется, так как железнодорожная линия не электрифицирована и на участке обращения «трамваев-поездов» оборудована электрификацией городского типа.

При расчете количества стрелочных переводов учтены только те из них, которые являются непосредственной частью гейта и без которых было бы невозможно производить операции по пропуску «трамваев-поездов» из системы в систему, равно как и операции оборота городских трамваев.

На рисунке 2.1 представлено схематическое изображение путевого развития гейта, совмещенной с оборотным кольцом городского трамвая, на остановке Карлсруэ Альтбанхоф (Karlsruhe Albtalbahnhof) в г. Карлсруэ (Karlsruhe), ФРГ. В таком схемном решении используется 16 стрелочных переводов и 2 глухих пересечения. В этом месте трамвайная сеть соединяется с многопутной железнодорожной линией.

На рисунке 2.2 представлено схематическое изображение путевого развития центральной станции г. Хемниц (ФРГ) в месте примыкания трамвайно-железнодорожной соединительной линии. К преимуществам такой схемы можно отнести точность операций по проследованию «трамваев-поездов» через гейт, однако здесь возникают враждебные маршруты с городскими трамваями. Кольцевое устройство оборота — в виде двухпутной линии по городским улицам. Выделена отдельная группа платформенных путей для приема «трамваев-поездов». В таком схемном решении используется 8 стрелочных переводов и 2 глухих пересечения.

Условные обозначения на рисунке 2.1 применимы к рисункам 2.1 — 2.12 и к таблице 2.2.

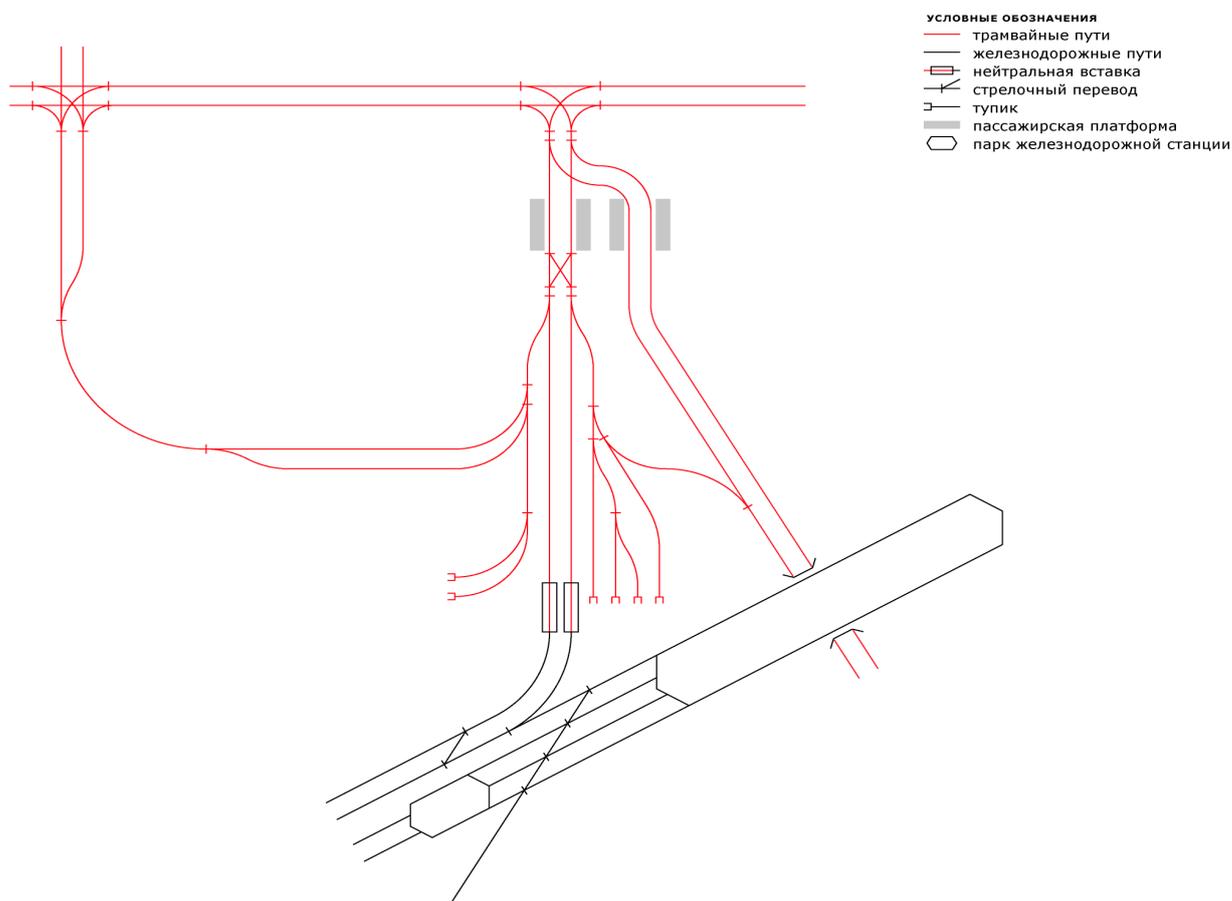


Рисунок 2.1 — Схема путевого развития гейта, расположенного в районе остановочного пункта Карлсруэ-Альтбанхоф

На рисунке 2.3 представлено схематическое изображение путевого развития трамвайно-железнодорожной соединительной линии, расположенной в районе остановочного пункта Вёрт-Альт-Банетмайстрай, (Wörth Alte Bahnmeisterei, г. Вёрт-на-Рейне, агломерация г. Карлсруэ). Здесь трамвайная линия примыкает к узловой железнодорожной станции. На станции две железнодорожные линии и одна трамвайная сходятся в единую линию (в направлении центральной станции Карлсруэ). Особенностью данного гейта является его «продольная» конструкция, т.к. выход «трамваев-поездов» на главные пути двухпутного перегона происходит в разных горловинах станции.

На рисунке 2.4 представлено схематическое изображение путевого развития центральной станции г. Кассель (ФРГ) в месте примыкания гейта.

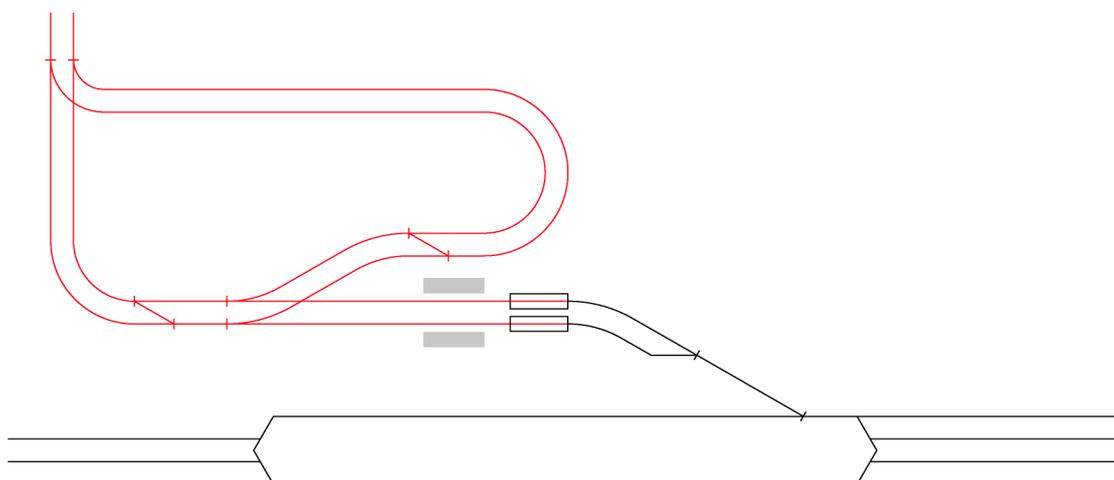


Рисунок 2.2 — Упрощенная схема путевого развития центральной станции г. Хемниц в месте примыкания гейта

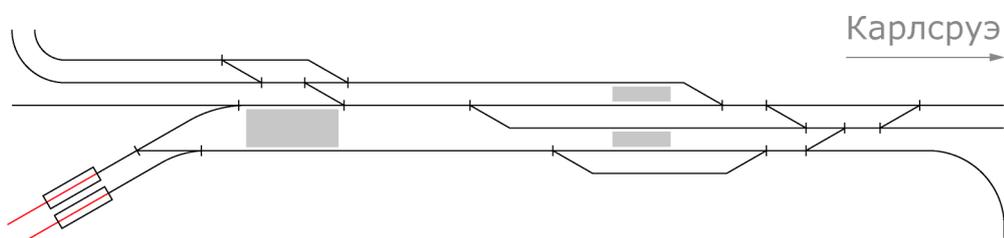


Рисунок 2.3 — Схема путевого развития гейта, расположенного в районе остановочного пункта Вёрт-Альт-Банетмайстрай, г. Вёрт-ам-Рейне

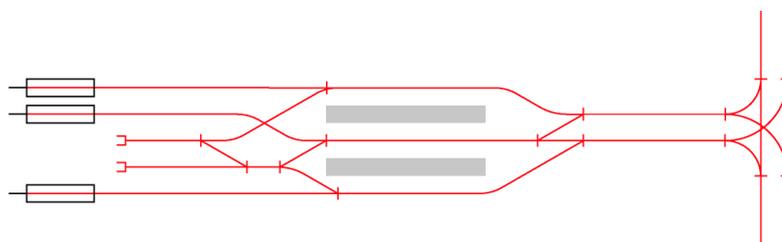


Рисунок 2.4 — Упрощенная схема путевого развития гейта на центральной станции г. Кассель.

К преимуществам данной схемы можно отнести поточность операций по движению «трамваев-поездов» через гейт. В связи с наличием двух платформенных путей существует возможность специализации путей по направлениям (группам маршрутов), а также выделения пути для высадки пассажиров из трамваев и «трамваев-поездов», прекративших перевозку пассажиров, с последующей перестановкой транспортных средств в два оборотных тупика. В таком схемном решении используется 9 стрелочных переводов и 1 глухое пересечение.

На рисунке 2.5 представлено схематическое изображение путевого развития трамвайно-железнодорожной соединительной линии, совмещенной с обратным кольцом городского трамвая, на остановке Альтхемниц (Altchemnitz) в г. Хемниц. В этом месте трамвайная сеть соединяется с однопутной железнодородной линией. В таком схемном решении используются 3 стрелочных перевода и 1 глухое пере-сечение.

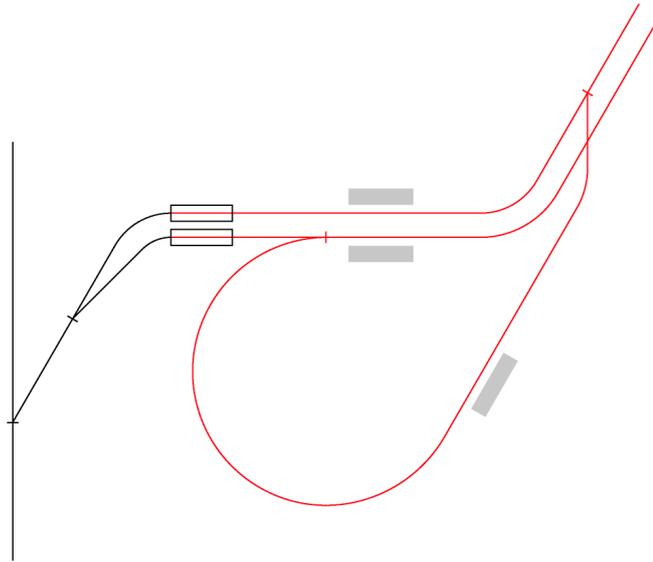


Рисунок 2.5 — Схема путевого развития гейта на остановке Альтхемниц, г. Хеймниц

На рисунке 2.6 представлено схематическое изображение путевого развития трамвайно-железнодорожной соединительной линии на остановке Дюренер-Штрассе (Dürener Straße) в г. Кёльн (ФРГ). В этом месте трамвайная сеть соединяется с однопутной железнодородной линией, после чего железнодородная линия становится двухпутной.

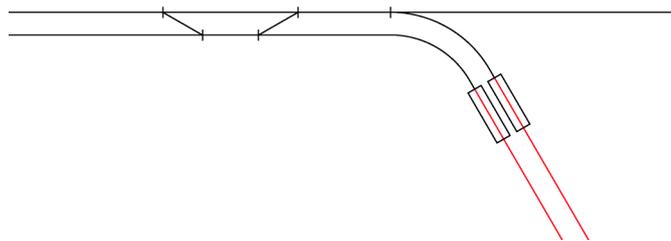


Рисунок 2.6 — Схема путевого развития гейта в районе Дюренер-Штрассе, г. Кёльн

На рисунке 2.7 представлено схематическое изображение путевого развития трамвайно-железнодорожной соединительной линии между путевыми постами Книленгер-Аллея (Knielinger Allee) и Велшнойройтер-Штрассе (Welschneureuter Strabe) в г. Карлсруэ. В таком схемном решении используется 5 стрелочных переводов.

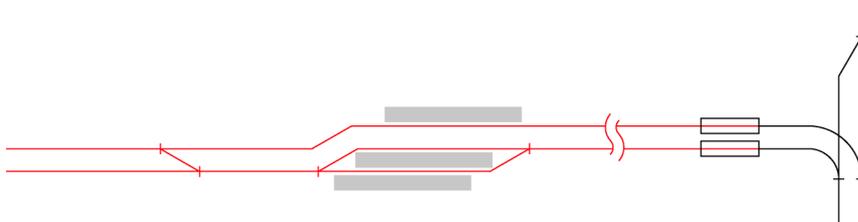


Рисунок 2.7 — Схема путевого развития гейта между путевыми постами Книленгер-Аллея и Велшнойройтер-Штрассе, г. Карлсруэ

На рисунке 2.8 представлено схематическое изображение путевого развития трамвайно-железнодорожной соединительной линии, совмещенной с оборотным кольцом городского трамвая, в районе остановки Карлсруэ-Дурлах (Karlsruhe Durlach) в г. Карлсруэ. К преимуществам такой схемы можно отнести простоту конструкции, однако возникают враждебные маршруты передвижения с городскими трамваями, у которых здесь конечная остановка. В таком схемном решении используются 4 стрелочных перевода и 1 глухое пересечение.

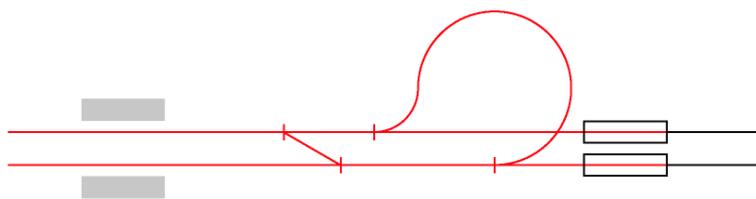


Рисунок 2.8 — Схема путевого развития гейта на остановке Карлсруэ-Дурлах, г. Карлсруэ

На рисунке 2.9 представлено схематическое изображение путевого развития трамвайно-железнодорожной соединительной линии в районе улицы Пфарер-Бунгартен-Штрассе (Pfarrer-Bungarten-Straße) в г. Саарбрюккен (ФРГ). В этом месте трамвайная сеть соединяется с многопутной железнодорожной линией. К преимуществам схемы можно отнести простоту конструкции, однако присутствует 4 точки враждебных пересечений в одном уровне. Разъезд может быть использован для

оборота подвижного состава. В таком схемном решении используется 12 стрелочных переводов.

На рисунке 2.10 представлено схематическое изображение путевого развития гейта в районе остановки Рёмеркастел (Römerkastell) в г. Саарбрюккен. Присутствуют 2 точки враждебных пересечений в одном уровне. В таком схемном решении используются 8 стрелочных переводов. В этом месте трамвайная сеть соединяется с однопутной железнодорожной линией.

На рисунке 2.11 представлено схематическое изображение путевого развития трамвайно-железнодорожной соединительной линии, совмещенной с оборотным кольцом городского трамвая в районе остановки Книленген-Райбергштрассе (Knielingen Rheinbergstraße) в г. Карлсруэ. В таком схемном решении используются 11 стрелочных переводов и 1 глухое пересечение.

Существуют также отечественные примеры трамвайно-железнодорожных соединительных линий. На рисунке 2.12 представлено схематическое изображение путевого развития гейта, совмещенной с оборотным кольцом городского трамвая, на конечной остановке Угрешская в г. Москве. Здесь трамвайно-железнодорожная соединительная линия — это путь необщего пользования для подачи железнодорожных вагонов на ранее существовавшую базу материально-технического обеспечения ГУП «Мосгортранс». В таком схемном решении используется 6 стрелочных переводов и 2 глухих пересечения. До 2018 г. на соединительном пути имелаась контактная сеть. Позже подача вагонов на путь производилась при помощи теплового вагона.

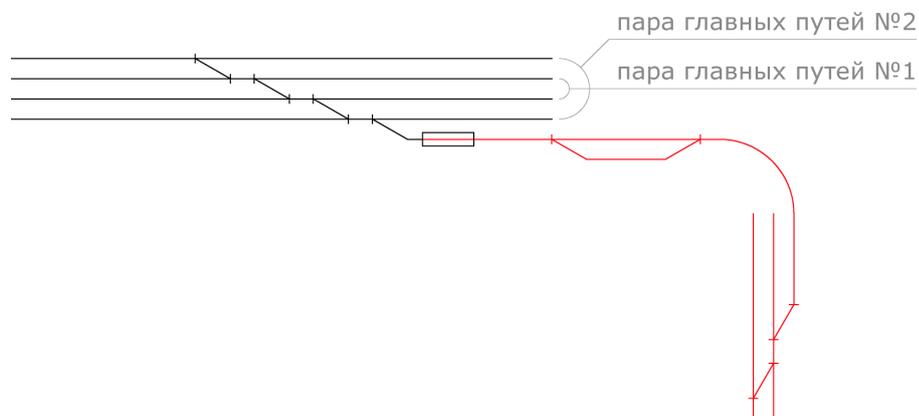


Рисунок 2.9 — Схема путевого развития гейта в районе улицы Пфарер-Бунгартен-Штрассе, г. Саарбрюккен

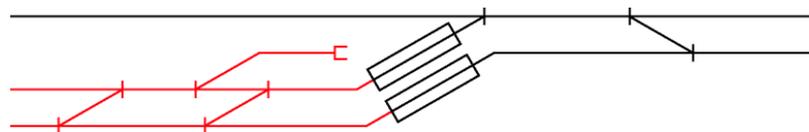


Рисунок 2.10 — Схема путевого развития гейта в районе остановки Рёмеркастел, г. Саарбрюккен

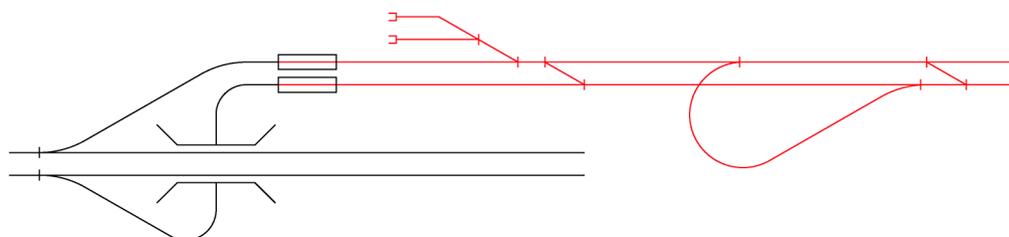


Рисунок 2.11 — Схема путевого развития гейта в районе остановки Книленген-Райбергштрассе, в г. Карлсруэ



Рисунок 2.12 — Схема путевого развития гейта на конечной станции Угрешская, г. Москва

Выкопировки существующих трамвайно-железнодорожных соединительных линий из картографического ресурса [97], схематические изображения которых представлены в данном разделе, приведены в Приложении А.

### 2.3.3 Система типизации трамвайно-железнодорожных соединительных линий

Мировая практика демонстрирует различные типы трамвайно-железнодорожных соединительных линий (гейтов), которые применяются в зависимости от конкретных городских условий и задач пассажирского (грузового) движения. На основе анализа схем путевого развития разработана система гейтов (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 — Авторская система типизации трамвайно-железнодорожных соединительных линий

Итак, гейты возможно типизировать по следующим параметрам: по расположению — в центральном узле сети или на периферийных линиях; по назначению — для служебных, технических целей и грузовых перевозок или для организации движения бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд»; по типу соединяемой инфраструктуры — соединяющие трамвайную сеть с путями общего или необщего пользования; по типу конструкции примыкания — одноуровневые и разноуровневые; по отсутствию или наличию устройств для оборота трамваев (кольцевые, тупиковые, комбинированные — тупиковые и кольцевые устройства).

### 2.3.4 Рекомендуемые схемы путевого развития трамвайно-железнодорожных соединительных линий для применения в России

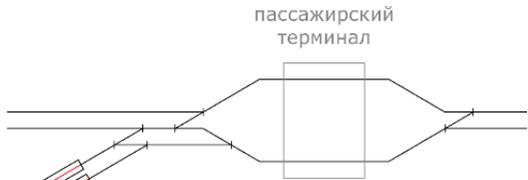
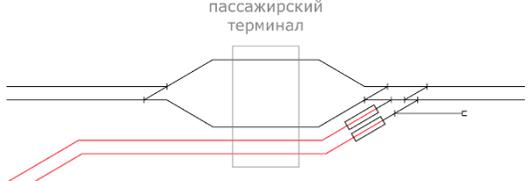
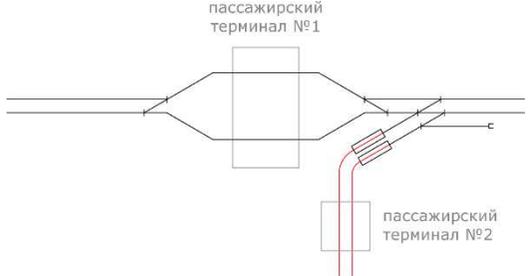
На основе существующих схем путевого развития трамвайно-железнодорожных линий (гейтов) и созданной выше схемы их типизации разработаны рекомендуемые схемы путевого развития.

В таблице 2.2 приводятся разработанные автором возможные решения по организации гейтов. Основные возможные решения разделены на три группы:

- 1) центральные узлы;
- 2) периферийные узлы — типы схем примыкания;
- 3) периферийные узлы — типы расположения и виды устройств оборота.

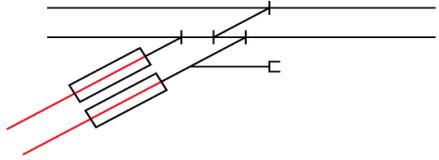
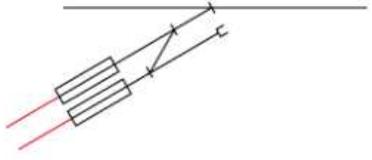
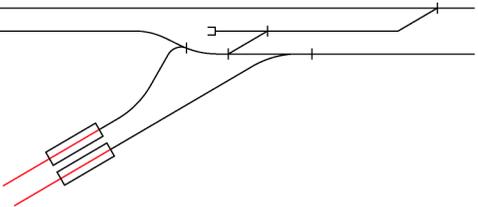
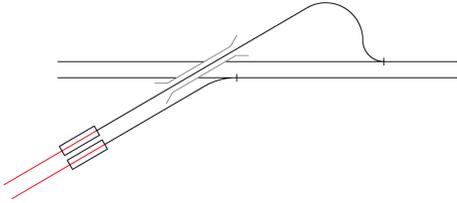
Для решения конкретной задачи по организации соединения рельсовых транспортных систем возможно применять разные варианты решений либо их комбинации.

Таблица 2.2 — Рекомендуемые схемы путевого развития трамвайно-железнодорожных соединительных линий (гейтов)

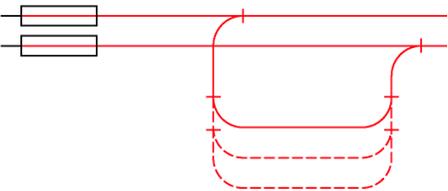
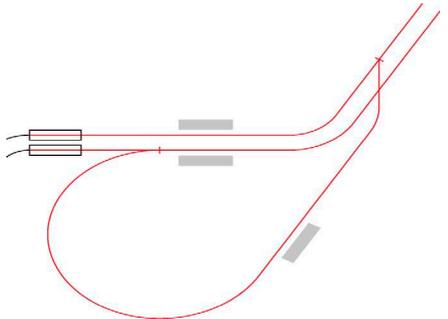
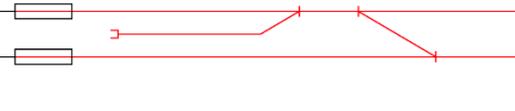
Схема <sup>7</sup>	Описание	Положительные качества	Отрицательные качества
1. Центральный узел			
<p><b>1.1</b></p> 	<p>Примыкание трамвайной линии в ближайшей горловине станции с использованием перронных путей станции для всех видов движения.</p>	<p>Возможность распределения операций по передвижениям транспортных средств (или «трамваев-поездов») между горловинами; возможность использования всех перронных путей парка для всех видов пассажирского движения. Концентрация всех маршрутов пригородного транспорта в одном терминале.</p>	<p>Повышенная зависимость графика движения «трамваев-поездов» от других операций, проводимых на станции.</p>
<p><b>1.2</b></p> 	<p>Примыкание трамвайной линии в противоположной от места подхода горловине станции с выделением группы перронных путей для работы с маршрутами «трамвая-поезда».</p>	<p>Примыкание гейта отдельно от горловины перронного парка. Постоянная специализация конкретных перронных путей для движения «трамваев-поездов» повышает удобство пассажиров.</p>	<p>При неизменном количестве путей исключаются для работы с другими видами движения перронные пути, выделенные для движения «трамваев-поездов».</p>
<p><b>1.3</b></p> 	<p>Примыкание трамвайной линии в горловине станции с отдельным расположением терминала «трамвая-поезда».</p>	<p>Примыкание гейта практически напрямую к перегону, отдельно от горловины перронного парка. Сохранение емкости перронного парка для работы с поездами железной дороги.</p>	<p>Территориальное удаление друг от друга пунктов отправления поездов и «трамваев-поездов» пригородных маршрутов, следующих по железной дороге в одном направлении.</p>

<sup>7</sup> Условные обозначения приведены на рисунке 2.1.

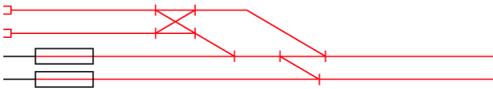
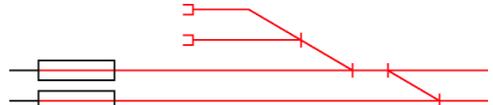
## Продолжение таблицы 2.2

Схема	Описание	Положительные качества	Отрицательные качества
2. Периферийные узлы: типы схем примыкания			
<p>2.1</p> 	<p>Примыкание двухпутной трамвайной линии к двухпутной железнодорожной линии в одном уровне без устройств оборота подвижного состава.</p>	<p>Возможность параллельного выполнения операций по проследованию «трамваев-поездов». Возможность использования съезда между главными путями для других видов движения.</p>	<p>Пересечение враждебных маршрутов в одном уровне и снижение вследствие этого пропускной способности железнодорожного и трамвайного участков.</p>
<p>2.2</p> 	<p>Примыкание двухпутной трамвайной линии к однопутной железнодорожной линии в одном уровне без устройств оборота подвижного состава.</p>	<p>Предохранительный тупик может быть использован в качестве отстойного (при достаточной его длине) для аварийного отставления неисправного транспортного средства.</p>	<p>Пересечение враждебных маршрутов в одном уровне и снижение вследствие этого пропускной способности железнодорожного и трамвайного участков. Предохранительный тупик не может использоваться в нормальной эксплуатации.</p>
<p>2.3</p> 	<p>Примыкание двухпутной трамвайной линии к двухпутной железнодорожной линии в одном уровне со шлюзовым путем без устройств оборота подвижного состава.</p>	<p>Повышенная пропускная способность и надежность соединительной линии относительно вариантов № 2.1 и № 2.2.</p>	<p>Увеличенное количество стрелочных переводов. Требуется расширение междупутья (и земляного полотна) для сооружения шлюзового пути.</p>
<p>2.4</p> 	<p>Примыкание двухпутной трамвайной линии к двухпутной железнодорожной линии в разных уровнях без устройств оборота подвижного состава.</p>	<p>Расположение путей в разных уровнях позволяет избежать враждебных маршрутов при пересечении встречного главного пути. Как следствие — больше пропускная способность, выше надежность и скорость движения по соединению.</p>	<p>Более высокая стоимость строительства относительно вариантов № 2.3 и № 2.4.</p>

## Продолжение таблицы 2.2

Схема	Описание	Положительные качества	Отрицательные качества
<b>3. Периферийные узлы: расположение и виды устройств оборота</b>			
<b>3.1</b> 	Двухпутное соединение трамвайной сети и железнодорожной линии с разворотным кольцом для трамвая (вариант 1).	Простота конструкции.	Пересечение враждебных маршрутов в одном уровне и снижение вследствие этого пропускной способности трамвайного участка.
<b>3.2</b> 	Двухпутное соединение трамвайной сети и железнодорожной линии с разворотным кольцом для трамвая (вариант 2).	Простота конструкции.	Пересечение враждебных маршрутов в одном уровне и снижение вследствие этого пропускной способности железнодорожного и трамвайного участков.
<b>3.3</b> 	Переход двухпутной трамвайной линии в двухпутную железнодорожную с устройством оборота тупикового типа между главными путями (вариант 1).	Схема оборота поездов без враждебных маршрутов. Занимает меньшую площадь по сравнению с кольцевыми схемами.	Обязательное использование подвижного состава с двумя постами управления и пассажирскими дверьми на левую и правую сторону.
<b>3.4</b> 	Переход двухпутной трамвайной линии в двухпутную железнодорожную с устройством оборота тупикового типа между главными путями (вариант 2).	Возможность использования диспетчерского съезда для других операций. Занимает меньшую площадь по сравнению с кольцевыми схемами.	Выезд с путей оборота через встречный главный путь. Обязательное использование подвижного состава с двумя постами управления и пассажирскими дверьми на левую и правую сторону.

## Продолжение таблицы 2.2

Схема	Описание	Положительные качества	Отрицательные качества
<p><b>3.5</b></p> 	<p>Переход двухпутной трамвайной линии в двухпутную железнодорожную с устройством оборота тупикового типа сбоку от главных путей (вариант 1).</p>	<p>Возможность проведения параллельных операций по въезду и выезду поездов из тупиковых путей. Занимает меньшую площадь по сравнению с кольцевыми схемами.</p>	<p>Выезд с путей оборота через встречный главный путь. Обязательное использование подвижного состава с двумя постами управления и пассажирскими дверьми на левую и правую сторону.</p>
<p><b>3.6</b></p> 	<p>Переход двухпутной трамвайной линии в двухпутную железнодорожную с устройством оборота тупикового типа сбоку от главных путей (вариант 2).</p>	<p>Возможность использования боковых свободных земельных площадок. Занимает меньшую площадь по сравнению с кольцевыми схемами.</p>	<p>Выезд с путей оборота через встречный главный путь. Обязательное использование подвижного состава с двумя постами управления и пассажирскими дверьми на левую и правую сторону.</p>

### 2.3.5 Пассажирская инфраструктура

При разработке пассажирской инфраструктуры для бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд» следует учитывать зарубежный опыт. Инфраструктура должна включать в себя посадочные платформы, пешеходные настилы, навигационные схемы, устройства информирования пассажиров о расписании движения и оперативных изменениях в нем, устройства оплаты и валидации билетов. Назначение пассажирской инфраструктуры — обеспечивать удобную посадку/высадку пассажиров. При проектировании пассажирских обустройств на железнодорожных путях для движения всех видов поездов следует использовать габарит приближения строений «С» [94]. В местах, где обращается только бимодальный подвижной состав, пассажирские платформы следует проектировать с использованием специального габарита приближения строений, который предусматривает минимальный перепад по высоте и зазор между полом «трамвай-поезда» и платформой.

Пешеходные переходы через рельсовые пути должны быть оборудованы по строительным нормам соответствующей инфраструктуры (в зависимости от количества главных путей, интенсивности движения поездов). Если в рамках проекта потребуется построить в разных уровнях пешеходный переход, его необходимо будет оборудовать устройствами, создающими благоприятную среду для людей с инвалидностью (лифтами, подъёмниками инвалидных колясок и т.п.). Посадочные платформы в городе и на пригородных линиях должны иметь длину, позволяющую полностью вместить обращающийся подвижной состав. Платформы следует размещать в местах, удобных для пассажиров, с учетом перспективной возможности удлинения платформ при необходимости кратного увеличения провозной способности линии (сцеп трамваев по Системе Многих Единиц — СМЕ).

При этом нужно принять во внимание, что при запуске транспортной системы «трамвай-поезд» снижается потребная мощность транспортно-пересадочных узлов и оборудования для выполнения пересадок пассажиров [98] в связке «же-

лезная дорога — городской транспорт». И, наконец, транспортная система «трамвай-поезд» должна при эксплуатации должна удовлетворять нормативным требованиям к пассажирской инфраструктуре по принадлежности участка пути (городской трамвай или железная дорога).

## **2.4 Эксплуатационные требования к системам безопасности и управления движением**

### **2.4.1 Основные положения**

Эксплуатация транспортной системы «трамвай-поезд» предъявляет повышенные требования к системам безопасности и управления движением. Так, бортовое и напольное оборудование должно обеспечивать возможность следования поездным порядком по перегонам, которые оборудованы различными системами СЦБ (полуавтоблокировка, автоблокировка, автоблокировка с подвижными блоками участками, с управлением движением поездов по радиоканалу, спутниковые системы мониторинга положения и др.), или при их отсутствии на перегонах (например, на путях необщего пользования). Устройства безопасности на железных дорогах обеспечивают интервальное регулирование движения поездов с необходимой пропускной способностью участка.

На однопутных участках и во внутриузловых соединениях, не оборудованных путевой блокировкой, необходимо обеспечение безопасности движения поездов путем исключения возможности выхода на маршруты движения «трамваев-поездов» другого подвижного состава. Для этого необходимо предусмотреть электрическую централизацию с зависимостью стрелок и сигналов, предохранительные тупики, сбрасывающие острия и другие устройства.

Стрелочные переводы по маршруту на малодеятельных линиях и на городской трамвайной сети должны управляться из кабины приближающегося транспортного средства (если не предусмотрена внешняя диспетчеризация) и во время

движения по нему блокироваться от перевода. Необходимо предусмотреть оборудование стрелочных переводов автоматическими системами очистки от снега и наледи, а также антивандальными устройствами.

Передвижение «трамвая-поезда» по железнодорожной инфраструктуре общего и необщего пользования возможно как поездным, так и маневровым порядком. Условия, при которых допускается следование маневровым порядком транспортного средства (или «трамвай-поезда») с пассажирами, должны быть однозначно определены в нормативных документах.

Немаловажным фактором в обеспечении безопасности пассажирского и грузового движения на железной дороге является соблюдение нормативного графика движения поездов. При разработке его элементов — станционных и межпоездных интервалов, перегонных времен хода и др. — необходимо учитывать все вышеперечисленные факторы, касающиеся используемых технических средств по организации движения поездов.

#### 2.4.2 Структура диспетчерского управления транспортной системы «трамвай-поезд»

Структура диспетчерского управления транспортной системы «трамвай-поезд» различается в зависимости от участвующих в организации такого вида сообщения участков инфраструктуры и их принадлежности.

Верхний уровень диспетчерского управления в городской трамвайной системе должен занимать Центр организации дорожного движения (ЦОДД) — орган, отвечающий за общее управление движением транспорта на городской территории, обеспечивающий приоритет проследования городского общественного транспорта (в том числе рельсового), сбор информации о движении пассажирских транспортных средств, передачу этих данных в сервисы информирования пассажиров. Организацией движения городского трамвая занимается диспетчер городской трамвайной сети. Он контролирует выполнение графика движения трамвая, осуществляет

оперативное управление в случае сбоя в движении и взаимодействует с диспетчерским персоналом железной дороги (общего и необщего пользования).

Диспетчерский аппарат железной дороги планирует работу на каждый временной период и контролирует исполнение плана работы. Общее оперативное руководство подразделением железной дороги общего пользования осуществляет диспетчер по управлению перевозками (района управления) диспетчерского центра управления перевозками Дирекции управления движением (ДРУ) [99].

Схема диспетчерского управления на железнодорожных путях необщего пользования (ПНП) зависит от топологии и объёмов работы на ПНП. Общее руководство движением поездов на ПНП проводит Начальник дежурной смены (начальник смены). ДРУ и Начальник смены на ПНП руководят поездными диспетчерами (при наличии), которые в свою очередь, руководят дежурными по железнодорожным станциям (ДСП).

При помощи устройств спутникового позиционирования, обязательного к установке на всем рельсовом подвижном составе [88], поездной диспетчер (ДНЦ) железной дороги получает информацию о положении трамвайных транспортных средств на подходе к гейту. Основываясь на этой информации (о следовании транспортного средства к стыку систем по графику, либо с опозданием или с опережением графика), а также на основе поездного положения на участке железной дороги, поездной диспетчер принимает решение о приеме или неприеме «трамвая-поезда» по гейту на железную дорогу. Если нет возможности принять «трамвай-поезд» на железную дорогу, об этом сообщается диспетчеру городской трамвайной сети / поездному диспетчеру, представителю перевозчика и водителю «трамвая-поезда» для оперативного уведомления пассажиров об изменении маршрута. Одновременно информируются и другие причастные службы. При этом неприём «трамвая-поезда» по стыку систем будет рассматриваться как нарушение в работе железнодорожного транспорта, равно как и невыдача «трамвая-поезда» на стык с городской сетью в установленное контактным графиком время [18].

Базовая схема диспетчерского управления системой «трамвай-поезд» при участии владельца инфраструктуры общего пользования, владельца инфраструктуры необщего пользования и городской трамвайной сети представлена на рисунке 2.14.

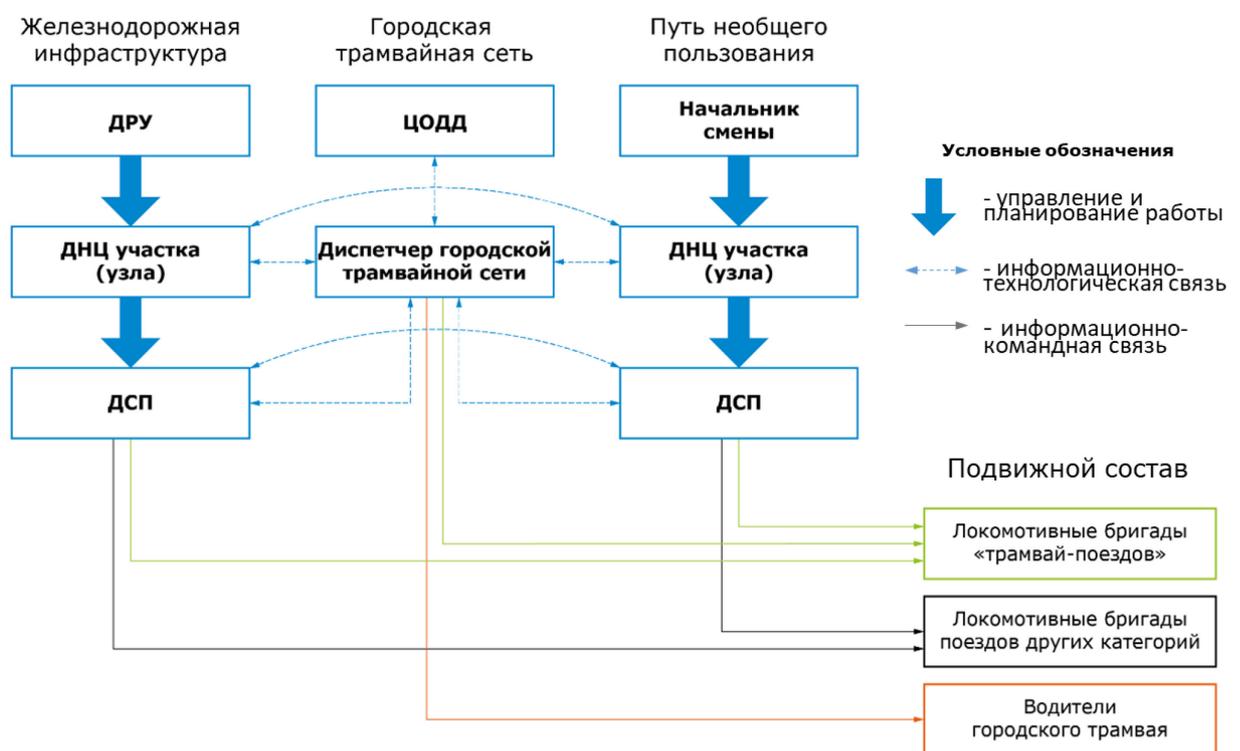


Рисунок 2.14 — Базовая схема диспетчерского управления транспортной системы «трамвай-поезд»

Примером реорганизации системы диспетчерского управления может служить московский опыт. С вводом маршрутов «Московских центральных диаметров» [100] в Московской дирекции управления движением (подразделение ОАО «РЖД») изменена структура районов управления и диспетчерских участков. Это привело к улучшению координации работы поездных диспетчеров, перераспределению полномочий по управлению движением поездов на участках ввода новых маршрутов. Решение аналогичной задачи может потребоваться и для повышения управляемости в условиях внедрения в эксплуатацию бимодальной транспортной системы. В рамках конкретной территориальной единицы реорганизация работы диспетчерского аппарата будет зависеть от применяемых средств автоматизации планирования и управления, а также от загрузки поездных диспетчеров [101],

которая, в свою очередь, определяется маршрутной сетью и графиком движения поездов.

### 2.4.3 Требования к системам диспетчерского управления

Для повышения надежности взаимодействия железной дороги и городского трамвая при передаче подвижного состава из одной системы в другую предлагается установить особые требования к системам диспетчерского управления.

Для реализации такой системы необходима разработка и утверждение между перевозчиками единого технологического процесса, в число составляющих которого должны войти единые нормы, обозначающие понятия выполнения графика и отклонения от него.

Поскольку система «железная дорога» по умолчанию считается более надежной (за счет полностью выделенной инфраструктуры) и характеризуется более высоким уровнем ответственности (сбой в работе одной местной структурной единицы железной дороги может дезорганизовать движение в другой части страны), следует нормативно закрепить обязанность диспетчерского персонала железной дороги планировать подвод «трамваев-поездов» к гейтам при взаимодействии с дежурно-диспетчерским персоналом городской трамвайной сети. Для этого они должны видеть на рабочем месте схему путевого развития сети городского трамвая вместе с участком железной дороги и фактическое расположение (в каждый момент времени) на ней подвижного состава всех видов («трамваи-поезда», городские трамваи, поезда и группы вагонов на путях общего и необщего пользования). Рабочее место диспетчера каждой сети следует оснастить программным обеспечением автоматического ведения графика исполненного движения поездов на железной дороге и «трамваев-поездов» на городской трамвайной сети, а также программным обеспечением автоматического ведения исполненного (фактического) графика оборота моторвагонного подвижного состава, в том числе — «трамваев-поездов» [18]. Схема взаимодействующих систем представлена на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 — Используемые информационные системы и устройства для управления работой транспортной системы «трамвай-поезд»

Для согласования действий и передачи распоряжений у диспетчера железной дороги должен быть канал оперативной связи с диспетчером городской трамвайной системы и канал поездной радиосвязи с водителями «трамваев-поездов».

Диспетчерская система городского трамвая должна обеспечивать:

- контроль фактического положения подвижного состава всех типов на сети городского трамвая;
- возможность оперативного переключения подвижного состава с маршрута на маршрут;
- удаленное управление (из кабины водителя или диспетчерского центра) положением стрелочных переводов на городских улицах и в депо;
- двустороннюю голосовую связь между водителем трамвая и диспетчером городской трамвайной системы.

При сбое в движении и в случае возникновения нестандартной ситуации автоматизированная система управления производит сбор и анализ данных, предлагает варианты расписания [11] и показывает их диспетчеру для дальнейшего использования. Выходные параметры предлагаемых вариантов:

- маршрут и порядок пропуска опаздывающего транспортного средства;

- организация подсылки и отправки резервного подвижного состава для минимизации последствий сбоя графика движения поездов;
- перечень отменяемых рейсов (при наличии);
- ожидаемое время опоздания каждого транспортного средства, управляемого системой;
- прогнозируемое время восстановления нормальной работы бимодальной системы.

Совокупность представленных параметров позволит организовать движение поездов и «трамваев-поездов» с достаточным уровнем безопасности.

## 2.5 Принципы построения маршрутной сети

Одним из главных принципов построения маршрутной сети системы «трамвай-поезд» является создание комбинированных маршрутов по пригородным железнодорожным участкам и городской трамвайной сети. Тем самым обеспечивается беспересадочная доставка пассажиров из мест рассредоточенного проживания людей в пригороде в центры городской активности (деловой и социальной). Прокладку линий «трамвая-поезда» желательно производить по центральным улицам городов, где будет возможно обеспечить короткую и удобную пересадку на другие виды транспорта.

Для реализации преимуществ бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд», описанных в разделе 1.4, при разработке маршрутной сети рекомендуется следовать следующим общим правилам:

- соединять маршрутами пригородные зоны железнодорожного транспорта и центры городов;
- связывать городские или пригородные районы и крупные промышленные предприятия — места приложения труда;
- прокладывать маршрут «трамвая-поезда» через максимально возможное количество районов города (при соответствующем обосновании прогнозируемого пассажиропотока);

- использовать существующую в агломерации инфраструктуру путей общего и необщего пользования, мосты, тоннели, путепроводы, трамвайные пути;
- прокладывать маршруты по улицам города с максимально возможной обособленностью трамвайной инфраструктуры от других видов транспорта, в особенности — от личного автотранспорта;
- не дублировать пригородные маршруты рельсового транспорта с высокой интенсивностью пассажиропотока.

Использование железнодорожных путей необщего пользования (ПНП) для организации движения по технологии «трамвай-поезд» возможно рассматривать, если:

- крупное промышленное предприятие города находится на удалении от городской жилищной застройки — основного места жительства его работников. С использованием запаса автономного хода «трамвай-поезд» сможет сразу доставлять персонал внутрь территорий предприятий, ближе к рабочим местам.
- ПНП имеет разветвлённую и/или протяжённую сеть на заселённой территории, но при этом отсутствует возможность передачи инфраструктуры под организацию только трамвайного движения.
- зона крупного предприятия находится в центре города, и возможна организация линии пассажирского движения через его территорию, т.к. по ней будет проходить наиболее короткий маршрут между различными отдалёнными точками города.

**Рассмотрим пример.** Через город, являющийся центром городской агломерации, проложена железная дорога общего пользования, по которой проходят маршруты пригородных поездов с примыкающими путями необщего пользования. В городской агломерации существуют центральные районы города и тяготеющие к нему пригороды. Центральный район города состоит из нескольких центров городской активности, в которые жители пригородных и окраинных районов стремятся приехать и затем уехать с целью заработка, обучения, получения услуг и приобретения товаров. Задача транспортной системы агломерации — дать жителям

возможность совершить поездку из пригорода в центр в нужный промежуток времени, с желательным для них (или хотя бы приемлемым) уровнем скорости, комфорта и стоимости.

Основной вокзал на станции «А» располагается на удалении от центров городской активности. Недалеко от города находится крупное промышленное предприятие с собственной сетью путей необщего пользования, примыкающих к станции «В». Внутри центра агломерации существует разветвлённая трамвайная сеть под управлением городского оператора.

Типовая текущая ситуация представлена на рисунке 2.16: маршруты пригородных поездов обозначены зелеными линиями, а городские трамвайные маршруты — штриховыми линиями. Совершить пересадку между видами транспорта возможно на вокзале (станция «А»).

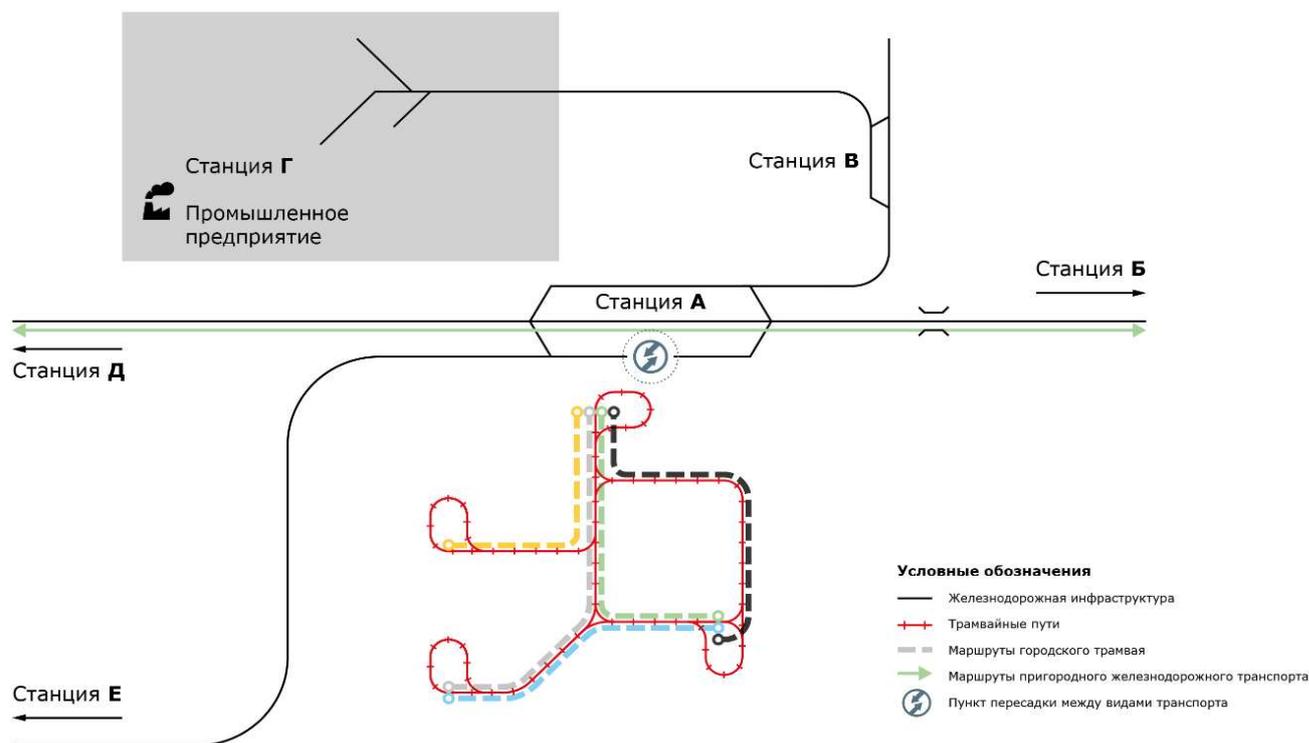


Рисунок 2.16 — Схема маршрутов пригородного и городского транспорта при независимой работе (исходное состояние)

При этом остаются неохваченными рельсовым транспортом крупные пассажиронапряженные корреспонденции: центр города — промышленное предприятие, пригородное направление «Е» — центр города. Создание транспортной системы «трамвай-поезд» будет разделено на 2 этапа.

При организации движения поездов по технологии «трамвай-поезд» на **I этапе** создается трамвайно-железнодорожная соединительная линия № 1, что позволяет усовершенствовать маршрутную сеть внутриагломерационного пассажирского транспорта. Таким образом, сети городского трамвая и железнодорожного транспорта связываются общими маршрутами в дополнение к уже существующим (рисунок 2.17):

1. «**Синий S1**» — маршрут, связывающий пригородную зону «А — Б» с городским центром. Он позволяет организовать прямое пассажирское сообщение пригородной зоны «Б» с центром города, а также сократить потребное количество подвижного состава на железнодорожном пригородном маршруте «Станция А — пригородная зона станции Б»;

2. «**Фиолетовый S2**» — маршрут, связывающий городской центр и промышленное предприятие в районе станции «Г». Организация перевозок к промышленному предприятию в районе станции «Г» позволит привлечь на рельсовый транспорт не осваиваемый ранее пассажиропоток, кроме того — резервировать маршрут городского трамвая.

На **II этапе** добавляются гейты № 2 и № 3, что позволяет запустить новые маршруты по технологии «трамвай-поезд» (рисунок 2.18):

3. «**Розовый S3**» — маршрут, связывающий город и пригородную зону в направлении станции «Е». До запуска «трамвая-поезда» по железнодорожному пути необщего пользования «А-Е» Пассажирского движения не было, поскольку линия обходила центр города стороной. Для наиболее быстрого вывоза пассажиров этого направления использовались автомобили либо автобусы. Ввод в эксплуатацию маршрута **S3** позволит снизить нагрузку на автомобильные дороги, улучшить экологическую обстановку, предоставить пассажирам возможность проследовать в центр города и в обратном направлении при помощи комфортного транспортного средства и без пересадок.

4. «**Оранжевый S4**» — маршрут, связывающий центр города и отдаленный городской район, отделенный природным препятствием — рекой. Создание гейта

№ 3 позволит организовать надежное пассажирское сообщение между частями города с использованием железнодорожной инфраструктуры (моста) и специально построенной городской трамвайной линии.

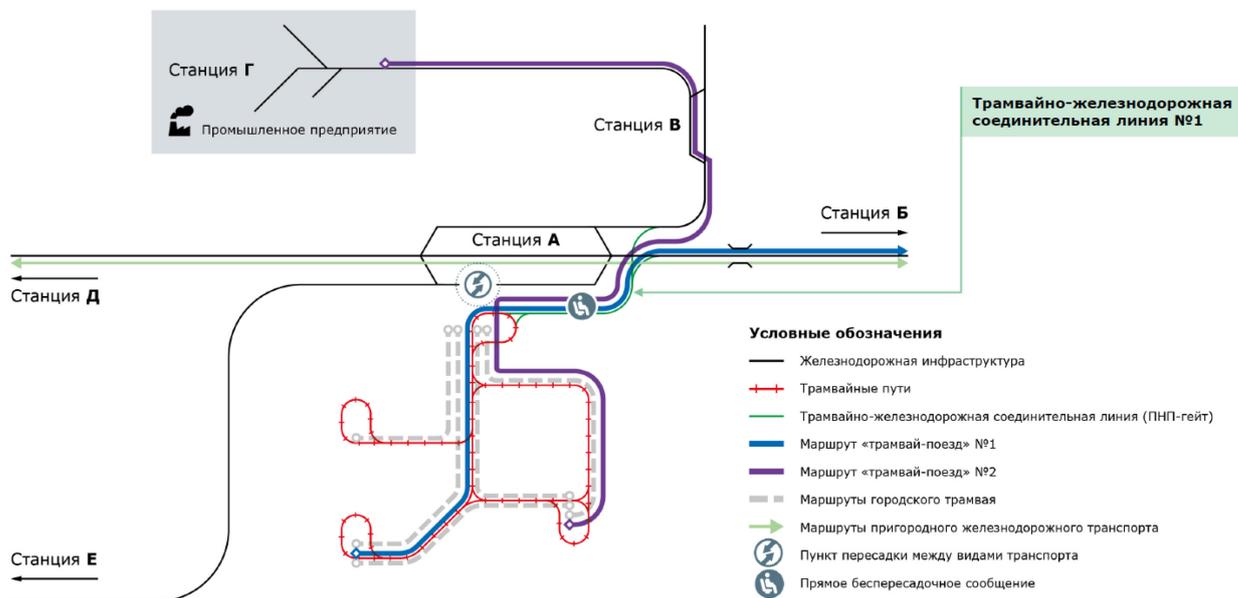


Рисунок 2.17 — Схема маршрутов пригородно-городского транспорта при запуске маршрутов «трамвая-поезда» (I этап)

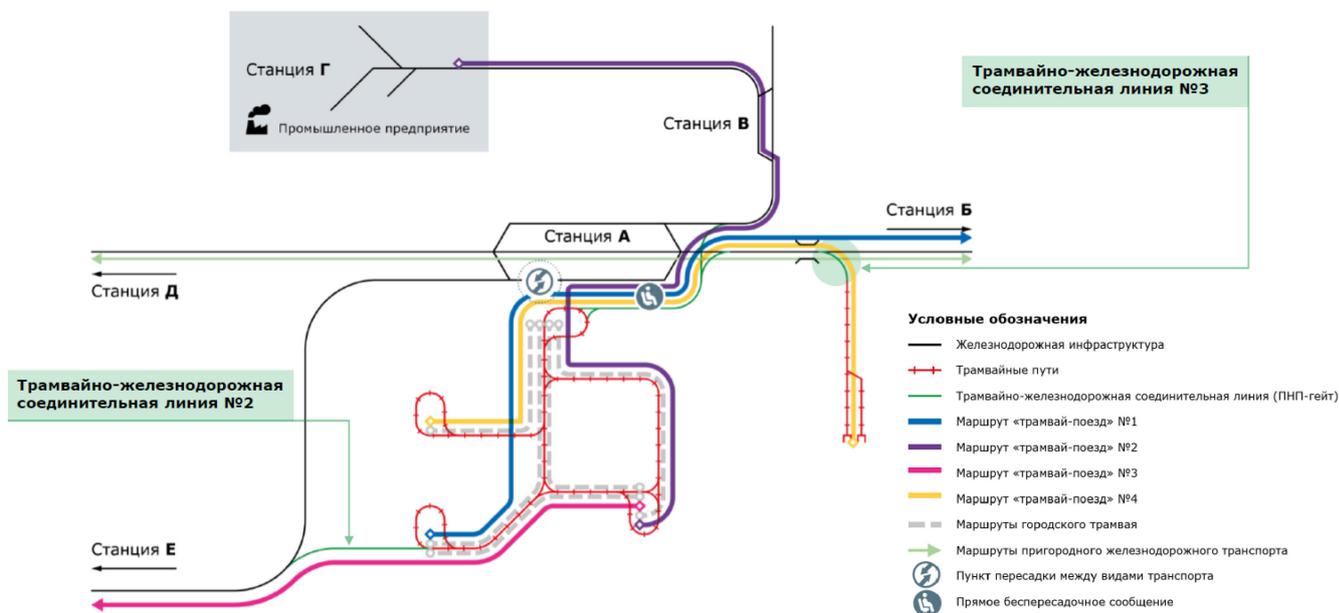


Рисунок 2.18 — Схема маршрутов пригородно-городского транспорта, при запуске маршрутов «трамвая-поезда» (II этап)

Подробнее о принадлежности железнодорожных путей, используемых при движении «трамваев-поездов», и схеме взаимодействия транспортных предприятий (владельцев инфраструктуры, перевозчиков) между собой — см. раздел 4.1.

Таким образом, совокупность маршрутов городской, пригородной и бимодальной транспортной системы обеспечит освоение существенно большего по объему пассажиропотока и позволит полнее удовлетворить потребности населения агломерации в получении транспортных услуг.

## **2.6 Основные требования к нормативным графикам движения и порядок расчета их эффективных параметров**

### **2.6.1 Основные положения**

Основные требования к нормативным графикам движения поездов на участках, включаемых в бимодальную транспортную систему «трамвай-поезд», обуславливаются следующими факторами:

- обеспечение пропуска заявленных перевозчиками размеров движения пассажирских, пригородных поездов и поездов других категорий;
- соблюдение условий безопасного пропуска поездов;
- волнообразная величина спроса на пригородные пассажирские перевозки (утренние и вечерние часы «пик», почти полное отсутствие пассажиропотока ночью).

Для повышения потребительских качеств пригородно-городской бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд» (уменьшение времени в пути пассажиров) при разработке нормативного графика движения поездов по участкам железной дороги рекомендуется использовать перегонные времена хода, расчет которых производится исходя из условия наилучшего, наиболее полного использования тягового вооружения и тормозных систем легкого подвижного состава типа «трамвай-поезд».

Выделение и специализация ниток пригородных поездов (в том числе ниток «трамваев-поездов») для различных перевозчиков устанавливается с учетом Правил оказания услуг по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования [102] и Правил недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования [103].

В большинстве случаев нормативный график движения «трамваев-поездов» будет представлять собой зонный график движения, увязанный с графиком оборота подвижного состава [48].

На участках городской трамвайной сети «трамвай-поезда» будут следовать параллельным графиком с городскими трамваями из-за одинакового режима остановок на городской части маршрута. На участке маршрута, проходящем по железной дороге, конструкция графика движения поездов (параллельный или непараллельный) определяется исходя из уровня заполнения пропускной способности рассматриваемого участка. В зависимости от того, как будут скомбинированы маршруты пригородных поездов на одной линии, возможно выделение некоторого количества поездов для режима движения с пропуском остановок.

При размерах движения «трамваев-поездов» по конкретному маршруту свыше 12 пар поездов в сутки [17] рекомендуется применение тактового графика движения поездов. При наложении нескольких маршрутов с тактовым графиком друг на друга рекомендуется их прокладка с учетом следующих факторов: сокращение времени ожидания транспорта на остановке в попутном направлении [104]; наименьшее возможное снятие пропускной способности участка железной дороги из-за некратности периода такта и межпоездного интервала (подробнее – см. раздел 3.1).

### 2.6.2 Резервы в нормативном графике движения «трамваев-поездов»

Нормативный график движения поездов должен предусматривать резервы времени в перегонных временах хода, станционных и межпоездных интервалах

[105] для обеспечения восстановления графика в случае сбоя в движении. График движения и время передачи подвижного состава по гейтам между рельсовыми системами (контактный график) следует согласовать с графиком движения поездов на прилегающем участке железной дороги и расписанием движения городского трамвая [9]. На последнем перегоне участка городской сети перед трамвайно-железнодорожным соединением для «трамваев-поездов» рекомендуется закладывать особые добавки к перегонным временам хода в 2-4 минуты для устойчивого выполнения контактного графика по стыку систем [105].

Вопрос надежности бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд» рассматривается подробнее в разделе 3.2.

### 2.6.3 Увязка графика движения «трамваев-поездов» с графиком движения городского трамвая

Пример фрагмента графика движения поездов в районе трамвайно-железнодорожной соединительной линии представлен на рисунке 2.19.

На фрагменте «Г — А» рисунка 2.19 отражено движение двух «трамваев-поездов» (№ т1 и № т3) по участку трамвайной сети с интервалом  $I_B$  исходя из прямой видимости и тормозного пути трамвая. Далее эти поезда следуют на участок А — Б, который по принадлежности относится к путям общего пользования и оборудован автоблокировкой с расчетным межпоездным интервалом  $I_p$ . С целью соблюдения этого интервала поезду № 2 требуется заложить стоянку  $t_{пр}$  на отдельном пункте Б для возможности дальнейшего следования на участок «Б — А». Длительность вынужденной стоянки  $t_{пр}$  вычисляется по формуле (2.1):

$$t_{пр} = I_{МП} - I_B \quad (2.1)$$

Для уменьшения непроизводительного простоя  $t_{пр}$  рекомендуется прокладывать нитки «трамвая-поезда» по городской трамвайной сети с интервалом не меньше  $I_{МП}$  для конкретного участка железнодорожной инфраструктуры, на который далее следует маршрут «трамвая-поезда». Если выполняется условие (2.2), то

между двумя нитками «трамвая-поезда» на участке «Б — Г» возможно проложить нитку городского трамвая при условии наличия на раздельном пункте «Б» устройств оборота для городского трамвая:

$$2 I_B < I_{МП} \cdot \quad (2.2)$$

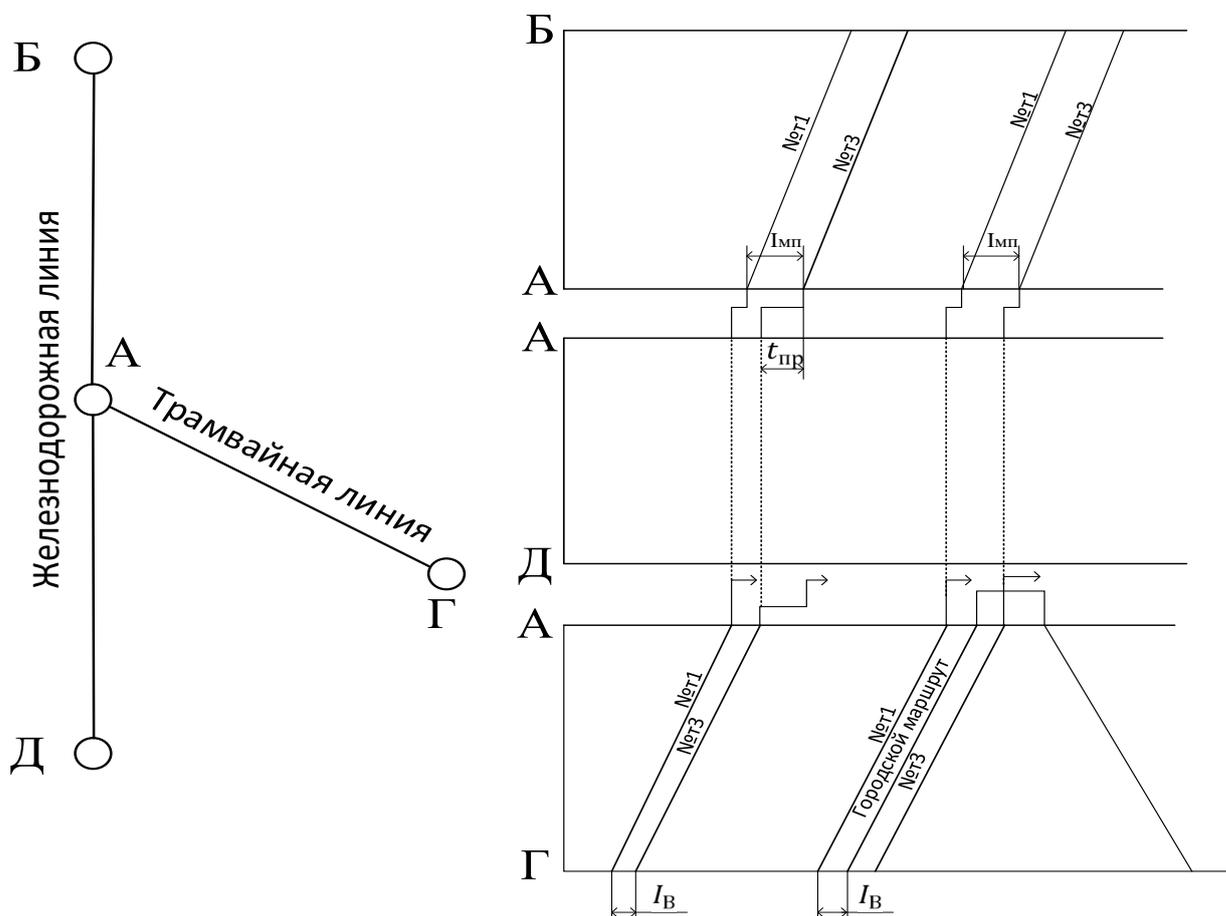


Рисунок 2.19 — Пример фрагмента графика движения поездов в районе трамвайно-железнодорожной соединительной линии

Движение поездов с интервалом  $I_B$ , возможно на железнодорожной инфраструктуре общего пользования только маневровым порядком, а на железнодорожной инфраструктуре необщего пользования (путях станций и перегонах, не оборудованных путевой блокировкой) — только после утверждения соответствующей местной инструкции о порядке движения поездов и маневровой работе на конкретном пути необщего пользования.

При разработке нормативного графика движения поездов на сетку осей станций и времени, помимо железнодорожного участка, включаются фрагменты трамвайной инфраструктуры от гейта до пункта оборота «трамвая-поезда» на трамвайной городской сети (с отображением занятия путей).

#### 2.6.4 Выбор схемы прокладки ниток «трамваев-поездов» по участкам железной дороги

Критерии прокладки ниток «трамваев-поездов» и поездов других категорий по участкам железной дороги обуславливаются, помимо прочего, соотношением величины поездопотоков различных категорий, проходящих по конкретному участку, и уровнем заполнения пропускной способности. В зависимости от преобладания той или иной категории поездов на участке будут определяться основные требования к нормативному ГДП и его параметрам.

Выделяются следующие основные категории поездов:

1. «трамваи-поезда»;
2. моторвагонный пригородный подвижной состав;
3. пассажирские поезда локомотивной тяги;
4. легковесные грузовые поезда массой брутто не более 3000 т;
5. грузовые поезда массой брутто более 3000 т.

Разделение всех грузовых поездов на легковесные и обычные поезда нужно для определения возможного тягово-скоростного режима движения таких поездов и совместимости с ним графика движения «трамваев-поездов» при полном использовании тяговых ресурсов подвижного состава.

Определить соотношение поездопотоков на конкретном участке возможно из распределения суточного бюджета времени на движение поездов соответствующей категории с учетом периода их курсирования (часы «пик», ночь и т.д.).

Если выполняется условие (2.3) по преобладанию размеров движения «трамваев-поездов» над суммарными размерами движения других категорий поездов в

анализируемый промежуток времени, то участок признается *линией с преобладающими размерами движения «трамваев-поездов»*:

$$K_{\text{ТП}} \geq 0,5 \div 0,6, \quad (2.3)$$

$$K_{\text{ТП}} = \frac{n_{\text{ТП}}}{n_{\text{общ}}}, \quad (2.4)$$

$$n_{\text{общ}} = n_{\text{ТП}} + n_{\text{МВПС}} + n_{\text{П}} + n_{\text{ГР-Л}} + n_{\text{ГР-Т}}, \quad (2.5)$$

Где  $K_{\text{ТП}}$  — доля размеров движения «трамваев-поездов» относительно других категорий поездов, %;

$n_{\text{общ}}$  — суммарные размеры движения всех категорий поездов, пар поездов в час;

$n_{\text{ТП}}$  — размеры движения «трамваев-поездов», пар поездов в час;

$n_{\text{приг}}$  — размеры движения пригородных поездов, пар поездов в час;

$n_{\text{П}}$  — размеры движения пассажирских поездов дальнего следования, пар поездов в час;

$n_{\text{ГР-Л}}$  — размеры движения легковесных грузовых поездов массой брутто не более 3000 т, пар поездов в час;

$n_{\text{ГР-Т}}$  — размеры движения грузовых поездов массой брутто более 3000 т, пар поездов в час.

На направлениях с заполнением пропускной способности до 75-80% ( $\gamma_{\text{П}} < 0,75 \div 0,8$ ) и любой доле размеров движения «трамваев-поездов» относительно других категорий поездов  $K_{\text{ТП}} \in (0 - 1)$  (зеленая зона области координат на рисунке 2.20) необходимо стремиться к такой прокладке поездов на графике, при которой «трамваи-поезда» будут следовать, соблюдая тактовый график (при достаточных для этого размерах движения поездов на маршруте).

Приоритетность прокладки «трамваев-поездов» в графике движения на железнодорожной инфраструктуре общего пользования определяется требованиями ПТЭ [89], правилами недискриминационного доступа к инфраструктуре [103], при этом, «трамваи-поезда» следует относить к категории пассажирских поездов пригородно-городского и городского сообщения.

На направлениях с заполнением пропускной способности более 75-80% ( $\gamma_{\text{п}} > 0,75 \div 0,8$ ) и при большей доле размеров движения «трамваев-поездов» относительно других категорий поездов  $K_{\text{ТП}} \in (0,5 \div 1)$  (желтая зона области координат на рисунке 2.20) необходимо стремиться к такой прокладке поездов на графике, при которой пропускная способность участка используется наилучшим образом, что означает применение параллельного графика с приоритетной прокладкой ниток «трамваев-поездов».

На направлениях с заполнением пропускной способности более 75-80% ( $\gamma_{\text{п}} > 0,75 \div 0,8$ ) и при меньшей доле размеров движения «трамваев-поездов» относительно других категорий поездов  $K_{\text{ТП}} \in (0 \div 0,5)$  (оранжевая зона области координат на рисунке 2.20) необходимо стремиться к такой прокладке поездов на графике, при которой пропускная способность участка используется наилучшим образом: с применением параллельного графика. Применение тактового графика на таких участках возможно, если это не вызывает серьезных потерь при организации движения других категорий поездов.

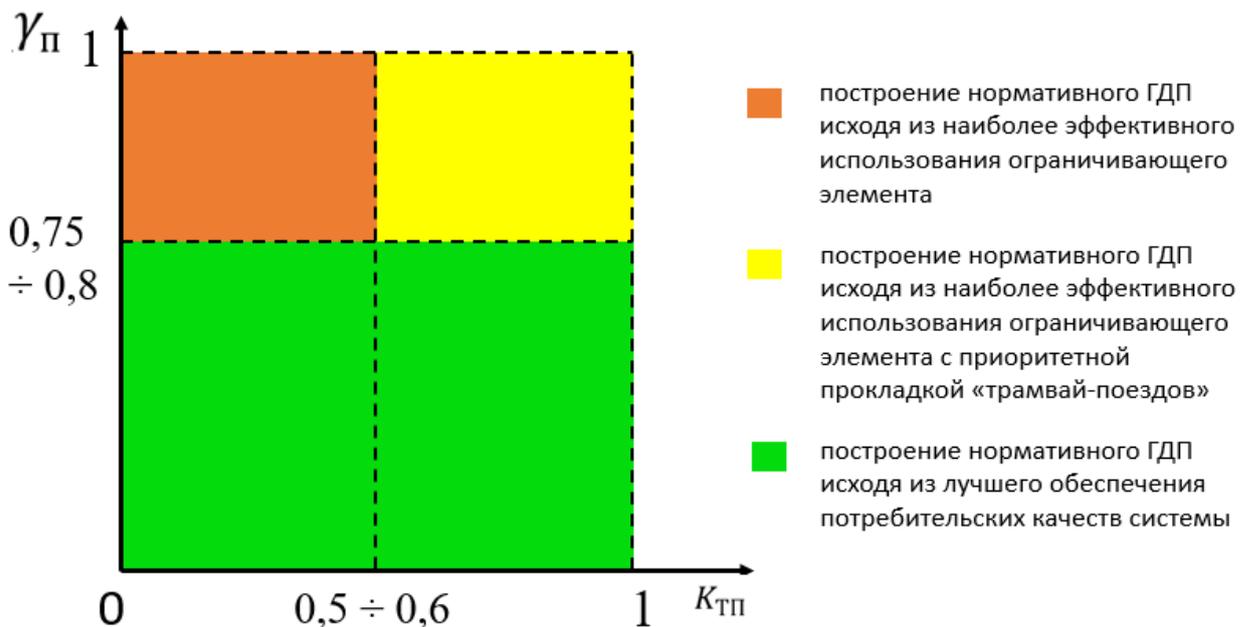


Рисунок 2.20 — Критерии прокладки ниток «трамвай-поезда» по железнодорожным участкам совмещенного движения

На железнодорожных путях общего пользования, где движение поездов и маневровых составов осуществляется по графику, приоритетность следования

«трамваев-поездов» на элементах путевого развития с совмещением разных видов движения устанавливается:

- одинаковой — с поездами и маневровыми передачами контактного графика межцеховых перевозок;
- более высокой — относительно остальных ниток графика поездной работы и прочих передвижений.

На участках железных дорог, где применяется система интервального регулирования с подвижными блок-участками, бортовые системы безопасности поезда определяют величину тормозного пути, основываясь на информации о собственных характеристиках поезда: скорости, массе и др., а также на полученной от напольных систем информации о местоположении идущего впереди поезда.

Величина межпоездного интервала зависит от размера тормозного пути [106], следовательно, она будет разной для поездов с различным весом. Этой разницей можно оперировать для уменьшения межпоездного интервала, используемого при расчётах пропускной способности в частных случаях.

В ситуации, когда легкий и быстрый поезд нагоняет тяжёлый поезд, тормозной путь для идущего следом поезда (более лёгкого) рассчитывается исходя из его массы. Следовательно, межпоездной интервал будет меньше. Также нет необходимости закладывать время на проследование всего занятого неподвижного блок-участка, поскольку местоположение расчетной точки торможения производится исходя из положения хвостового вагона поезда, идущего впереди.

## Выводы по 2 главе

1. Эксплуатационные требования к компонентам бимодальных пассажирских рельсовых транспортных систем для движения «трамваев-поездов» должны обеспечивать: 1) безопасность пассажиров за счет обеспечения безусловной безопасности движения поездов и других участников движения; 2) стабильное предоставление транспортной услуги пассажирам городской агломерации; 3) сохранение технологического процесса работы транспортных инфраструктур, по которым организуется движение «трамваев-поездов».

2. Технологический процесс работы транспортной системы «трамвай-поезд» должен регламентировать разработку и согласование маршрутной сети «трамваев-поездов»; разработку нормативного графика движения поездов, расписаний городского трамвая, контактных графиков, графика оборота подвижного состава; организацию работы водителей ССПС — «трамваев-поездов»; оперативное управление и взаимодействие диспетчерского персонала участников перевозочного процесса при движении «трамваев-поездов» по графику и при отклонениях от нормальной работы; организацию технического обслуживания и ремонта подвижного состава.

3. Сформулирован основной (обязательный) перечень требований к бимодальному подвижному составу системы «трамвай-поезд» на основе анализа законодательства и нормативных документов, включая правила технической эксплуатации видов транспорта и технические регламенты Таможенного союза, а также дополнительный перечень характеристик и опций, пункты которого могут быть заявлены при составлении конкретного технического задания на производство подвижного состава.

4. Трамвайно-железнодорожные соединительные линии (гейты) типизированы: по расположению — в центральном узле сети или на периферийных линиях; по назначению — для служебных, технических целей и грузовых перевозок или для организации движения бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд»; по типу соединяемой инфраструктуры — соединяющие трамвайную сеть с путями об-

щего или необщего пользования; по типу конструкции примыкания — одноуровневые и разноуровневые; по наличию устройств для оборота трамваев — отсутствию таких устройств или по наличию разных типов устройств для оборота (кольцевые, тупиковые, комбинированные).

5. На основе существующих схем путевого развития трамвайно-железнодорожных соединительных линий и их типизации разработаны рекомендуемые схемы путевого развития для применения в России: центральные узлы, периферийные узлы (типы схем примыкания, типы расположения и виды устройств оборота).

6. Структура диспетчерского управления транспортной системы «трамвай-поезд» различается в зависимости от участвующих в организации такого вида сообщения участков инфраструктуры и их принадлежности. В главе разработаны:

— базовая схема диспетчерского управления системой «трамвай-поезд» при участии владельца инфраструктуры общего пользования, владельца инфраструктуры необщего пользования и городской трамвайной сети;

— эксплуатационные требования к системам безопасности и управления движением, обеспечивающие надежность взаимодействия железной дороги и городского трамвая при передаче подвижного состава из одной системы в другую;

— принципиальная структура комплекса технических и программных средств (центральный пост — напольное оборудование — борт подвижного состава).

7. Сформулированы принципы построения маршрутной сети «трамвая-поезда», обеспечивающие беспересадочную доставку пассажиров из мест рассредоточенного проживания людей в пригороде в центры городской активности (деловой и социальной) путём создания комбинированных маршрутов по пригородным железнодорожным участкам и городской трамвайной сети за счёт следующих общих правил:

— связывать пригородные зоны железнодорожного транспорта и центры городов;

— связывать городские, пригородные районы и крупные промышленные предприятия — места приложения труда;

— прокладывать маршрут «трамвая-поезда» через максимально возможное количество районов города (при соответствующем обосновании прогнозируемого пассажиропотока);

— использовать существующую в агломерации инфраструктуру путей общего и необщего пользования, мосты, тоннели, путепроводы, трамвайные пути;

— прокладывать маршруты по улицам города с максимальной возможной обособленностью трамвайной инфраструктуры от других видов транспорта, в особенности — от личного автотранспорта;

— не дублировать пригородные маршруты рельсового транспорта с высокой интенсивностью пассажиропотока.

8. Требования к нормативным графикам движения поездов на участках, включаемых в бимодальную транспортную систему «трамвай-поезд», включают в себя резервы во временах хода и межпоездных интервалах, увязку графика движения «трамваев-поездов» с графиком движения городского трамвая, критерии прокладки ниток «трамвай-поезда» по железнодорожным участкам совмещенного движения. На направлениях с заполнением пропускной способности более 75-80% построение графика производится исходя из наилучшего использования мощности ограничивающего элемента, до 75-80 % — из лучшего обеспечения потребительских качеств транспортной системы.

## ГЛАВА 3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

### 3.1 Влияние тактового графика движения поездов в различных видах пассажирского движения на съём наличной пропускной способности

#### 3.1.1 Расчет наличной пропускной способности при тактовом графике движения поездов

Тактовый график движения поездов — это организованное движение попутно следующих поездов, которые следуют по участку через одинаковые специально установленные интервалы времени (тактовый интервал).

При этом размер тактового интервала (или такта) на рассматриваемом участке может не совпадать с величиной межпоездного интервала, однако не может быть меньше его.

Применение тактового графика движения поездов обусловлено потребностью в повышении качества обслуживания пассажиров. Тактовый график движения поездов (ГДП) широко применяется на железных дорогах мира в различных вариациях:

- тактовые поезда и поезда других категорий следуют параллельным графиком;
- поезда, идущие в тактовом режиме, следуют с большей скоростью относительно поездов других категорий;
- поезда, идущие в тактовом режиме, следуют с меньшей скоростью относительно поездов других категорий.

На сегодняшний день существующие в Российской Федерации нормативные документы [107, 108, 109] не в полной мере раскрывают особенности расчёта пропускной способности участков в условиях применения тактового графика движения поездов.

С целью оптимизации параметров графика тактового движения требуется определить степень влияния следующих факторов на параметры тактового движения:

- средства СЦБ (постоянные/подвижные блок-участки) — накладываемые ограничения и положительные эффекты;
- расположение остановочных пунктов (по расстоянию между ними);
- организация оборота на зонных станциях в условиях тактового движения (методы распределённого оборота — на одной станции).

Основным отличием расчета коэффициента съёма в тактовом движении относительно действующей методики [107] является природа возникновения дополнительного съёма, который возникает вследствие некратности установленного межпоездного интервала  $I_{мп}$  (мин) и величины такта  $S$  (мин).

Величина  $I_{мп}$  обычно задается действующей на перегоне системой СЦБ. При этом применение инновационных систем интервального регулирования позволяет индивидуально для каждого поезда рассчитать  $I_{мп}$  в зависимости от размера его тормозного пути [106].

На рисунке 3.1 представлен фрагмент тактового параллельного ГДП. Двойной линией обозначены тактовые поезда, следующие через равные промежутки времени  $S$ . Время внутри промежутка  $S$ , которое невозможно использовать для движения поездов  $\tau_{доп}^{пг}$ , обозначено штриховкой.

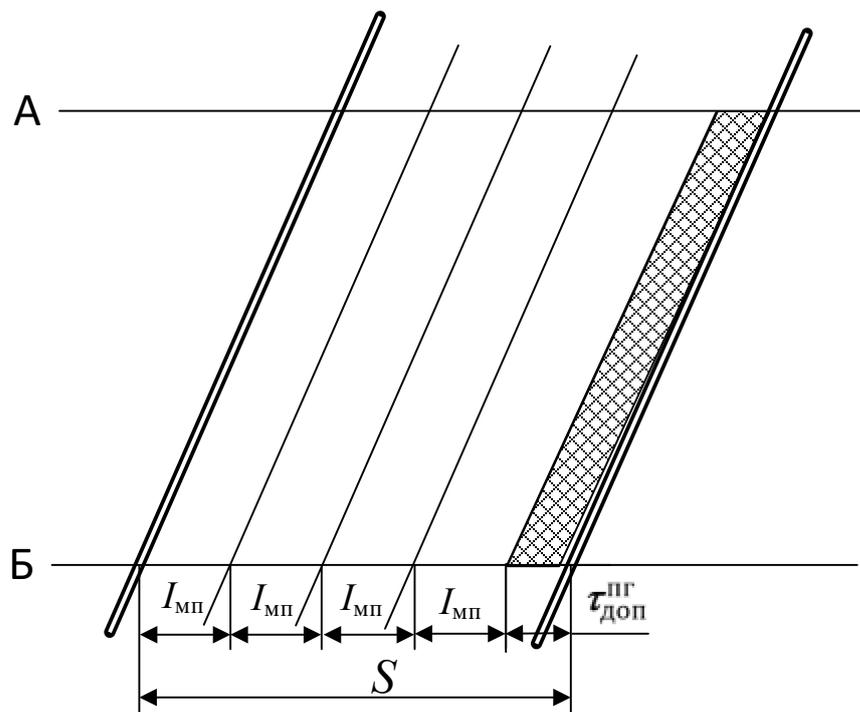


Рисунок 3.1 — Фрагмент тактового параллельного ГДП

Величина неиспользуемого (потерянного на некрatности) времени  $\tau_{\text{доп}}^{\text{пг}}$ , приходящаяся на каждый период времени  $S$ , вычисляется по формуле (3.1)<sup>8</sup>:

$$\tau_{\text{доп}}^{\text{пг}} = S - I_{\text{МП}} \left\lfloor \frac{S}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor, \text{ мин} \quad (3.1)$$

Для вычисления общего количества времени, потерянного из-за некрatности величины такта и межпоездного интервала, нужно определить количество циклов тактового движения  $P$ . Рассчитать  $P$  можно исходя из величины периода времени обращения тактовых поездов на участке или размеров их движения  $n_{\text{такт}}$  (пар поездов):

$$P = [B / S] = n_{\text{такт}} - 1, \text{ цикл} \quad (3.2)$$

где  $n_{\text{такт}}$  — число пропускаемых по пригодной зоне тактовых поездов, пар поездов;

$B$  — длительность периода обращения на участке тактовых поездов в течение суток, минут.

Общее время, потерянное из-за некрatности величины такта и межпоездного интервала за период  $B$ , вычисляется по формуле:

$$\tau_{\text{доп.общ}}^{\text{пг}} = \left( S - I_{\text{МП}} \left\lfloor \frac{S}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor \right) P, \text{ мин} \quad (3.3)$$

Величина коэффициента дополнительного съема при параллельном тактовом ГДП:

$$\varepsilon_{\text{доп}}^{\text{пг}} = \frac{\tau_{\text{доп}}^{\text{пг}}}{I_{\text{МП}}}, \quad (3.4)$$

На основе зависимостей, определенных выше, проведен расчёт коэффициента дополнительного съёма для параллельного ГДП при различных значениях  $I_{\text{МП}}$  и  $S$ . На рисунке 3.2 представлен график значений коэффициента дополнительного съёма при параллельном тактовом ГДП для диапазона значений  $S$  от 20 до 30 мин и  $I_{\text{МП}}$  — от 5 до 10 мин.

<sup>8</sup> Целая часть числа  $x$  обозначается символом  $[x]$  — округление  $x$  до ближайшего целого в меньшую сторону.

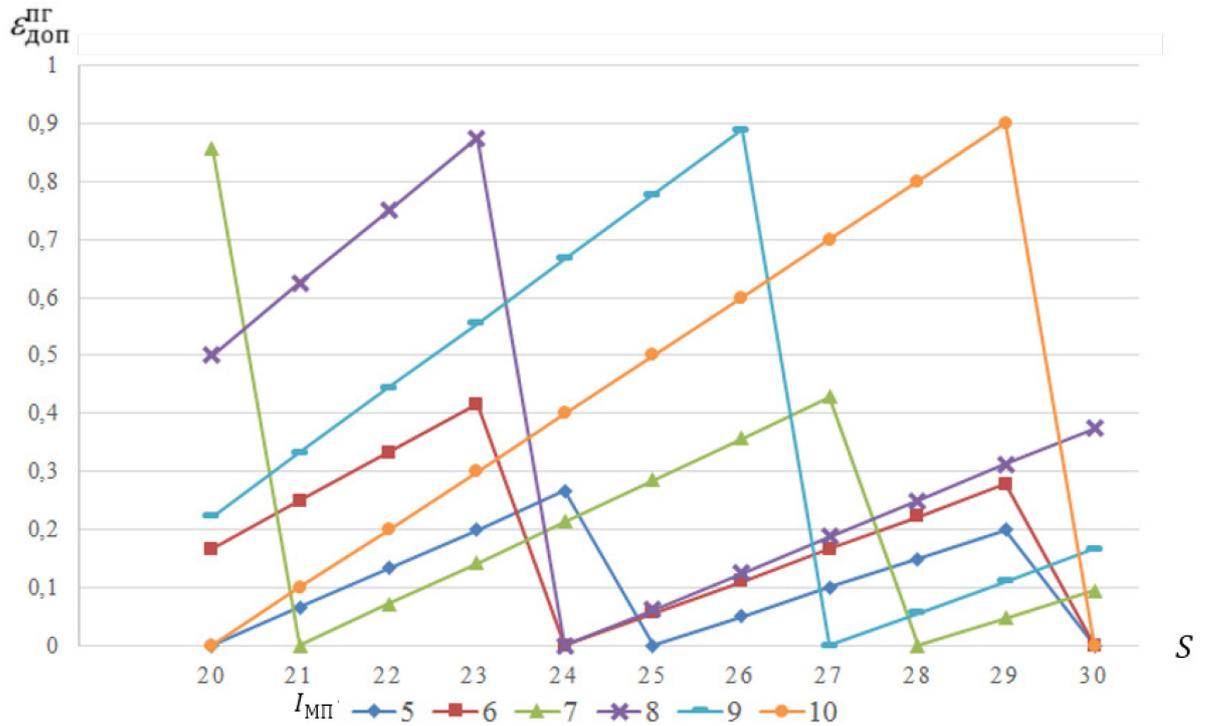


Рисунок 3.2 — График значений коэффициента дополнительного съёма при параллельном тактовом ГДП в зависимости от величины такта и межпоездного интервала

Из анализа графика на рисунке 3.2 можно сделать вывод, что чем меньше межпоездной интервал, тем меньших пиковых значений достигает коэффициент дополнительного съёма при тактовом параллельном ГДП.

Произведем также расчет коэффициента съёма для тактового непараллельного ГДП (рисунок 3.3). Двойной линией обозначены тактовые поезда, следующие через равные промежутки времени  $S$ . Время внутри промежутка  $S$ , которое отводится на интервал отправления  $\tau_{от}$  с раздельного пункта «Б» и интервал прибытия  $\tau_{пр}$  на раздельный пункт «А», обозначены на рисунке левой и правой косой штриховкой. Промежуток времени, который невозможно использовать для движения поездов  $\tau_{доп}^{нп}$ , отмечен двойной штриховкой.

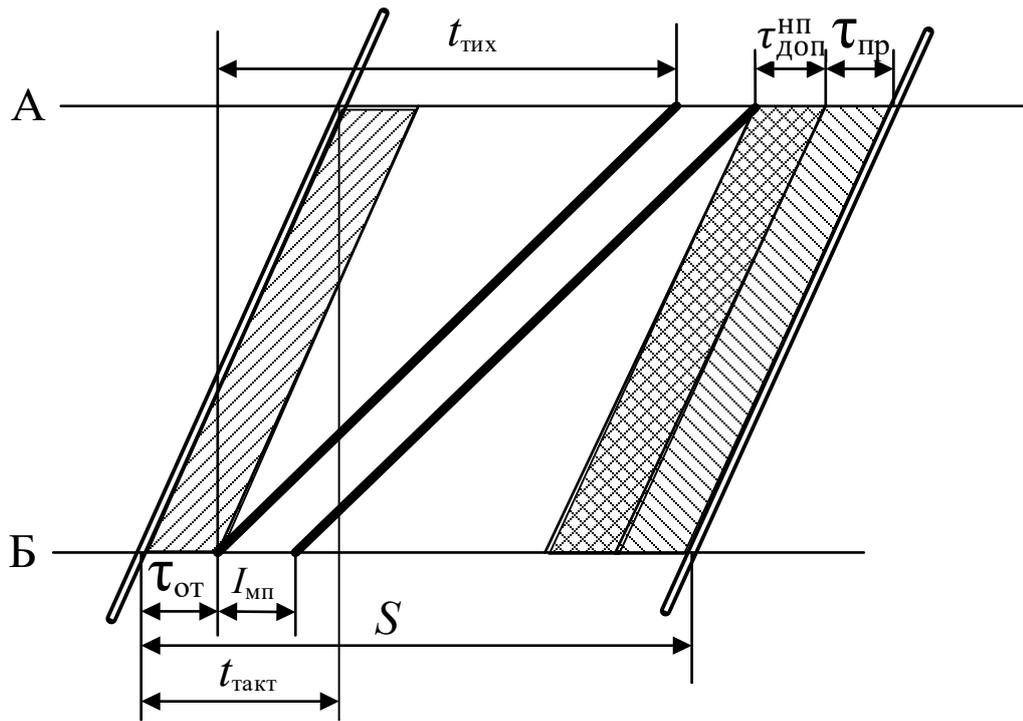


Рисунок 3.3 — Фрагмент ГДП при тактовом непараллельном графике

Величина коэффициента основного съёма для тихоходных поездов определяется отношением суммы времени хода тихоходного поезда  $t_{\text{тих}}$ ,  $\tau_{\text{от}}$  (станционный интервал отправления) и  $\tau_{\text{пр}}$  (станционный интервал прибытия) [108] к сумме  $t_{\text{такт}}$  и двух межпоездных интервалов, прилегающих к нитке тактового поезда:

$$\varepsilon_{\text{осн}}^{\text{нп}} = \frac{\tau_{\text{от}} + t_{\text{тих}} + \tau_{\text{пр}}}{I_{\text{МП}} + t_{\text{такт}} + I_{\text{МП}}} \quad (3.5)$$

Величина коэффициента дополнительного съёма для тактового поезда:

$$\varepsilon_{\text{доп}}^{\text{нп}} = \frac{\tau_{\text{доп}}^{\text{нп}}}{I_{\text{МП}}} \quad (3.6)$$

Значение полного коэффициента съёма [110]:

$$\varepsilon^{\text{нп}} = \varepsilon_{\text{осн}}^{\text{нп}} + \varepsilon_{\text{доп}}^{\text{нп}} \quad (3.7)$$

Величину неиспользуемого времени внутри цикла при непараллельном ГДП (на рисунке 3.3 обозначен двойной штриховкой) можно определить как:

$$\tau_{\text{доп}}^{\text{нп}} = S - \tau_{\text{от}} - \tau_{\text{пр}} - (t_{\text{тих}} - t_{\text{такт}}) - xI_{\text{МП}}, \text{ мин.}, \quad (3.8)$$

где  $x$  — это количество межпоездных интервалов между пропускаемыми тихоходными поездами внутри отрезка времени  $S$ . Поэтому количество тихоходных

поездов  $n$  в течение такта  $S$ :

$$n = x + 1, \text{ пар поездов (при } x > 0) \quad (3.9)$$

$$x = \left\lfloor \frac{S - \tau_{от} - \tau_{пр} - (t_{тих} - t_{такт})}{I_{МП}} \right\rfloor \quad (3.10)$$

Формулы (3.8 и 3.10) справедливы, если:

$$t_{такт} < t_{тих}. \quad (3.11)$$

Если же внутри такта следуют поезда со скоростями выше, чем у поездов, следующих в такте:

$$t_{такт} > t_{скрх}, \quad (3.12)$$

то в формулы (3.8, 3.10) вместо значения

$$(t_{тих} - t_{такт}) \quad (3.13)$$

подставляется значение

$$(t_{такт} - t_{скрх}). \quad (3.14)$$

Общая (суточная) наличная пропускная способность для участка с тактовым движением определяется, пар поездов:

$$n_H = \frac{Da - \tau_{доп.общ}^{ПГ} - \tau_{доп.общ}^{НП}}{I_{МП}} + \frac{D b}{I_{МП}}; \quad (3.15)$$

$$\tau_{доп.общ}^{НП} = \tau_{доп}^{НП} P. \quad (3.16)$$

Произвести расчет количества времени занятия участка тактовым движением  $B$  можно исходя из заданных параметров движения тактовых поездов, определенных на основе потребностей в перевозках (размеров движения тактовых поездов и тактового интервала), минуты:

$$B = S * n_{такт} = D * a; \quad (3.17)$$

$$a + b = 1, \quad (3.18)$$

где  $D$  — суточный бюджет времени на движение всех типов поездов, с учетом коэффициента надежности, мин. Определяется по формуле (3.21);

$a$  — доля времени занятия участка тактовым движением;

$b$  — доля времени занятия участка остальными видами движения.

Наличная пропускная способность для участка с тактовым движением в

интенсивный час определяется в пригородных поездах. Наибольшее число пригородных поездов за этот час, с учетом съема тактовыми поездами, рассчитывается по формуле:

$$n_{\text{н}}^{\text{ч}} = \frac{60 \cdot \alpha_{\text{н}}}{I_{\text{МП}}} - (\varepsilon_{\text{осн}}^{\text{нп}} + \varepsilon_{\text{доп}}^{\text{нп}}) n_{\text{такт}}, \quad (3.19)$$

Таким образом, разработанные формулы позволяют провести точный расчет пропускной способности железнодорожных линий в условиях интенсивного тактового движения пассажирских поездов. Расчет коэффициента дополнительного съема для поездов тактового графика показал колебания его значений в зависимости от величины такта и межпоездного интервала в диапазоне от 0 до 0,9.

### 3.1.2 Расчет наличной пропускной способности при наложении нескольких маршрутов тактового движения на одном участке

При наложении нескольких участков тактового движения друг на друга, *общая пропускная способность участка* (за сутки) с тактовым движением поездов при параллельном графике определяется по формуле:

$$n_{\text{нал}}^{\text{общ}} = n_{\text{нал}}^{\text{такт}} + \frac{D - l_{\text{такт}}}{I_{\text{МП}}}, \quad (3.20)$$

где  $n_{\text{нал}}^{\text{такт}}$  — пропускная способность линии *во время движения тактовых поездов* (для поездов всех категорий);

$l_{\text{такт}}$  — время работы участка, занятое под организацию тактового движения, минуты;

$D$  — суточный бюджет времени на организацию движения поездов;

$$D = (1440 - t_{\text{тех}}) \alpha_{\text{н}}. \quad (3.21)$$

Необходимо выполнение условия (3.21), что говорит о возможности пропуска заданных размеров движения тактовых поездов по рассматриваемому участку:

$$D \geq l_{\text{такт}}, \quad (3.21)$$

$$l_{\text{такт}} = \sum_j Q_j T_j, \quad (3.22)$$

где  $Q_j$  — количество периода графика  $j$ -го вида.

$T_j$  — длительность периода графика  $j$ -го вида, мин.

Для определения количества и продолжительности периодов графика, внутри которых возможно пропустить поезда других категорий, осуществляется эскизное построение фрагментов графика движения.

Эскизное построение ГДП — процесс заполнения листа графика движения поездов нитками тактовых поездов в соответствии с требуемыми параметрами движения на маршруте (количество пар поездов, интервал между этими поездами, изменение интервала по временам суток). Последовательное наложение ниток нескольких маршрутов на лист ГДП позволит установить количество и размер периодов графика, внутри которых возможно пропустить поезда других категорий.

На рисунке 3.4 представлен фрагмент тактового параллельного графика движения поездов. Соответствующими линиями хода обозначены тактовые поезда, следующие через равные промежутки времени  $S_n$ , где индекс  $n$  обозначает один из видов периода графика между тактовыми поездами одного тактового маршрута. Взаимное расположение тактовых поездов в одном периоде графика  $T_j$  позволяет определить графически значения  $y_m^j$ , где верхний индекс  $j$  — обозначает принадлежность отрезка времени  $y_m^j$  к периоду графика  $T_j$ ; нижний индекс  $m$  обозначает порядковый номер отрезка времени  $y_m^j$  внутри периода графика  $T_j$ .

Пропускную способность линии (для поездов всех категорий) во время движения тактовых поездов возможно определить по формуле:

$$n_{\text{нал}}^{\text{такт}} = \sum_j \frac{Q_j * T_j - \tau_{\text{доп.общ}(j)}}{I_{\text{МП}}} . \quad (3.23)$$

Число значений  $\tau_{\text{доп.общ}(j)}$  соответствует количеству вариантов периода графика  $T_j$ .

Проверка корректности записи:

$$\begin{aligned} \frac{Q_j * T_j - \tau_{\text{доп.общ}(j)}}{I_{\text{МП}}} &= \frac{Q_j * T_j - \tau_{\text{доп}(j)} * Q_j}{I_{\text{МП}}} = \frac{Q_j (T_j - \tau_{\text{доп}(j)})}{I_{\text{МП}}} = \frac{Q_j \left( T_j - \sum_m \left( y_m^j - I_{\text{МП}} \left\lfloor \frac{y_m^j}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor \right) \right)}{I_{\text{МП}}} = \\ &= \frac{Q_j \left( T_j - \sum_m y_m^j + \sum_m I_{\text{МП}} \left\lfloor \frac{y_m^j}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor \right)}{I_{\text{МП}}} = \frac{Q_j * \sum_m I_{\text{МП}} \left\lfloor \frac{y_m^j}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor}{I_{\text{МП}}} = \frac{Q_j * I_{\text{МП}} * \sum_m \left\lfloor \frac{y_m^j}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor}{I_{\text{МП}}} = Q_j * \sum_m \left\lfloor \frac{y_m^j}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor . \quad (3.24) \end{aligned}$$

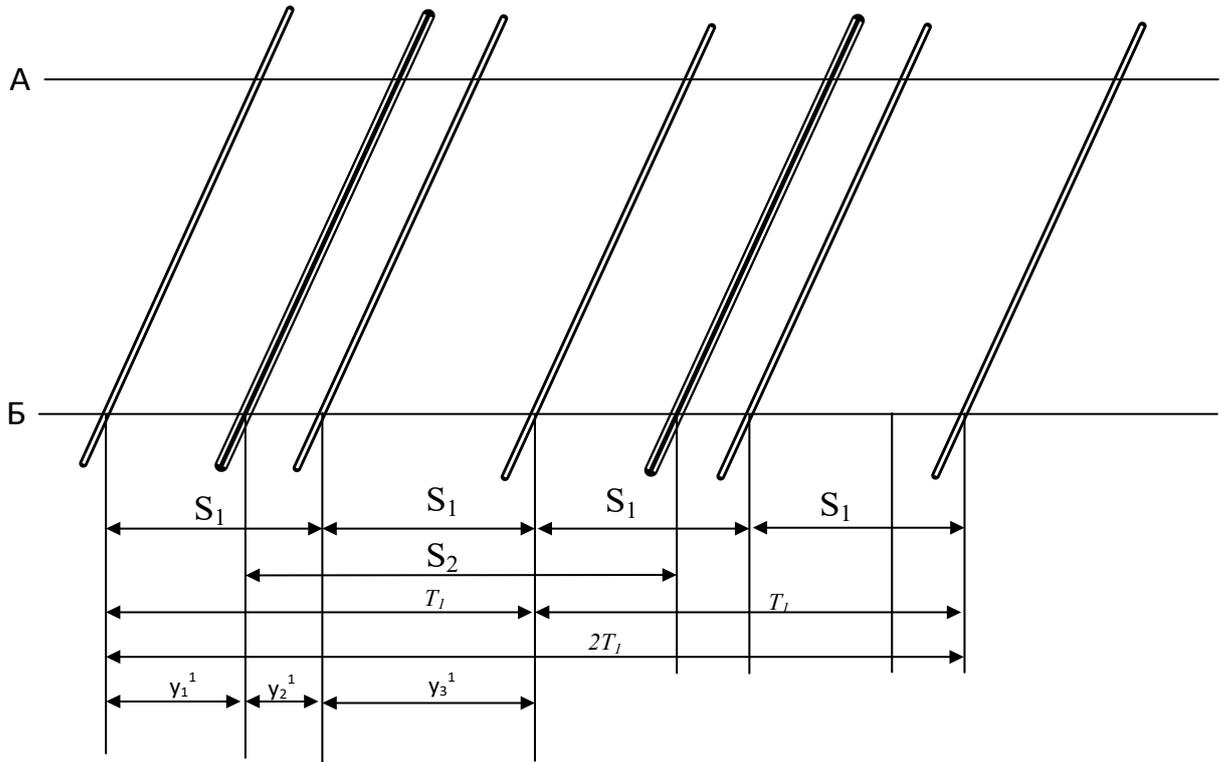


Рисунок 3.4 — Фрагмент тактового параллельного графика движения поездов с наложением двух тактовых маршрутов

Общее неиспользуемое время внутри нескольких ( $Q_j$ ) периодов графика  $T_j$ :

$$\tau_{\text{доп.общ}}(j) = \tau_{\text{доп}}(j) * Q_j. \quad (3.25)$$

Время, которое невозможно использовать для движения поездов из-за не кратности периода такта (см. рисунок 3.1), межпоездного интервала и взаимного расположения поездов в графике (см. рисунок 3.4), определяется для каждого участка  $y_m^j$  внутри периода графика  $T_j$ :

$$\tau_{\text{доп}}(j) = \sum_m (y_m^j - I_{\text{МП}} \left\lfloor \frac{y_m^j}{I_{\text{МП}}} \right\rfloor), \quad (3.26)$$

где  $y_m^j$  — отрезок времени внутри периода графика  $T_j$ .

В частном случае, когда обращается только один тактовый маршрут параллельным графиком, период такта  $S$  равен отрезку времени  $y_m^j$  и периоду графика  $T_j$ :

$$S = T_j = y_m^j. \quad (3.27)$$

Возможность по пропуску поездов других категорий во время обращения тактовых поездов в условиях параллельного ГДП:

$$n^{\text{др.}} = n_{\text{нал}}^{\text{такт}} - \sum_r n_r, \quad (3.28)$$

где  $n_r$  — количество тактовых поездов по маршруту  $r$ , поездов/сутки.

Для определения технически достижимого уровня заполнения пропускной способности необходимо учитывать несинхронность подвода поездов со смежных расчетных участков [10].

Таким образом, рассмотрены особые условия, влияющие на величину дополнительного съёма пропускной способности, не отраженные в нормативно-методических документах и научно-технической литературе.

При расчете пропускной способности непараллельного ГДП и участков с интенсивным пригородным движением следует учитывать необходимость обеспечения непрерывности следования поездов разных категорий между станциями технологических стоянок (в т.ч. и станций оборота пригородных поездов), а также некратность периода ГДП и тактового интервала.

### 3.1.3 Расчет потерь в пропускной способности горловин станций от организации движения поездов по тактовому графику

В практике работы железной дороги тактовый ГДП вызывает потери пропускной способности и станционных элементов. Определить пропускную способность горловины станции в этом случае возможно с использованием сводной таблицы передвижений по горловине [109]. Время занятия элемента одной операцией определяется с точностью до 0,1 мин.

Общее время занятия элемента всеми предусмотренными операциями, зависящими от размеров движения поездов, за расчётные сутки:

$$T^{\Gamma} = \sum \tau_i n'_i (1 + \rho_{\Gamma}) + \tau_{\text{такт}}^{\text{общ}} = \sum t_{\text{зан}}^{\Gamma} (1 + \rho_{\Gamma}), \quad (3.29)$$

где  $\tau_i$  — продолжительность занятия маршрута одной  $i$ -ой операцией, мин;

$n'_i$  — число операций по соответствующему маршруту (прием — отправление поездов, подача — уборка поездных локомотивов, различного рода маневровые передвижения), увеличивающееся пропорционально росту размеров движения (число  $i$ -х операций);

$\rho_\Gamma$  — коэффициент, учитывающий отказы устройств электрической централизации ( $\rho_\Gamma = 0,01$ );

$\tau_{\text{такт}}^{\text{общ}}$  — суммарная за сутки продолжительность потерь времени из-за движения поездов по тактовому графику, мин.

Суммарная за сутки продолжительность потерь времени из-за движения поездов по тактовому графику с различными значениями периода тактового графика  $T_j$  (см. раздел 3.1.2) в течение суток вычисляется по формуле:

$$\tau_{\text{такт}}^{\text{общ}} = \sum P_j \tau_{\text{пот } j}, \quad (3.30)$$

Где  $P_j$  — число циклов в сутки с величиной периода тактового графика  $T_j$ ;

$\tau_{\text{пот } j}$  — потери времени использования элемента горловины в одном периоде длительностью  $T_j$ , мин. Определяется из выражений (3.32-3.35).

Особенности расчета общего времени занятия элемента  $T^\Gamma$  при тактовом графике движения поездов состоят в необходимости учитывать возможность проведения операций, затрагивающих маршрут следования тактовых поездов, в горловине в период между проследованиями тактовых поездов (рисунок 3.5).

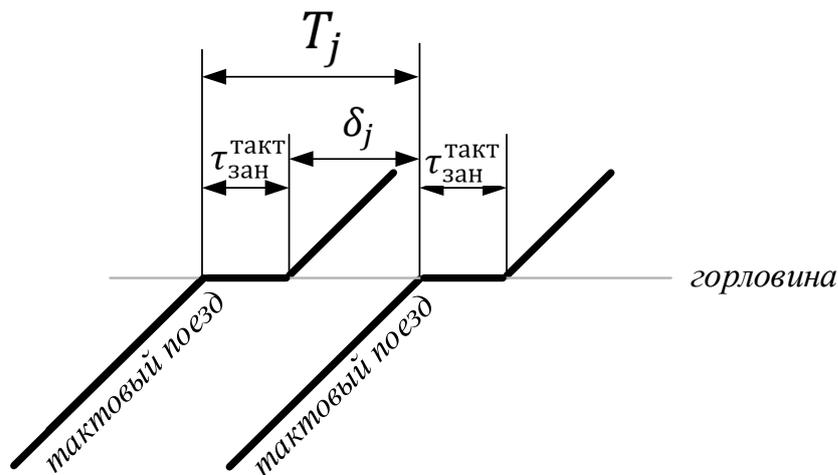


Рисунок 3.5 — Занятие горловины тактовыми поездами

Из рисунка 3.5 видно, что промежуток времени между проследованием двух тактовых поездов, когда элемент горловины свободен, выражается так:

$$\delta_j = T_j - \tau_{\text{зан}}^{\text{такт}}(r), \quad (3.31)$$

где  $\tau_{\text{зан}}^{\text{такт}}(r)$  — длительность занятия элемента горловины операцией по проследованию тактового поезда маршрута  $r$ , мин. Является частным случаем  $\tau_i$ .

Если  $\delta_j \leq \tau_{\text{зан}}^{\text{min}}$ , то при расчете занятия горловины следует учесть значение потерь времени использования элемента горловины, приходящееся на один период тактового графика:

$$\tau_{\text{пот } j} = \delta_j. \quad (3.32)$$

Если  $\tau_{\text{зан}}^{\text{min}} < \delta_j \leq \tau_{\text{зан}}^{\text{ср.взв}}$ , то

$$\tau_{\text{пот } j} = \delta_j - \tau_{\text{зан}}^{\text{min}} \left\lfloor \frac{\delta_j}{\tau_{\text{зан}}^{\text{min}}} \right\rfloor. \quad (3.33)$$

Если  $\tau_{\text{зан}}^{\text{ср.взв}} < \delta_j \leq \tau_{\text{зан}}^{\text{max}}$ , то

$$\tau_{\text{пот } j} = \delta_j - \tau_{\text{зан}}^{\text{ср.взв}} \left\lfloor \frac{\delta_j}{\tau_{\text{зан}}^{\text{ср.взв}}} \right\rfloor. \quad (3.34)$$

Если  $\delta_j > \tau_{\text{зан}}^{\text{max}}$ , то

$$\tau_{\text{пот } j} = 0. \quad (3.35)$$

Переменные в формулах (3.32-3.35) определяются согласно ведомости передвижений по горловине [109], проходящих через рассчитываемый элемент горловины:

$\tau_{\text{зан}}^{\text{min}}$  — минимальное значение продолжительности занятия расчетного элемента одной операцией, мин;

$\tau_{\text{зан}}^{\text{max}}$  — максимальное значение продолжительности занятия расчетного элемента одной операцией, мин.

$\tau_{\text{зан}}^{\text{ср.взв}}$  — средневзвешенная продолжительность всех операций, кроме операций по проследованию тактовых поездов, занимающих расчетный элемент, мин.

$$\tau_{\text{зан}}^{\text{ср.взв}} = \frac{\sum n'_i \tau_i - \sum_r n_r \tau_{\text{зан}}^{\text{такт}}(r)}{\sum n'_i - \sum_r n_r}. \quad (3.36)$$

Таким образом, в параграфе определяются потери пропускной способности перегонов и станционных элементов, возникающие из-за организации тактового движения поездов.

### **3.2 Гибридная технология имитационного моделирования работы узла**

#### **3.2.1 Принципы гибридной технологии имитационного моделирования**

Решения по изменению технологии работы железнодорожных узлов и направлений, а также обоснование инфраструктурного развития, направленного на обеспечение большей манёвренности и надежности их работы, могут разрабатываться на основе вариантных расчетов и моделирования. Комплексная имитационная модель участка железнодорожной сети вместе со смежными видами транспортной инфраструктуры (при необходимости), построенная в соответствии с методикой [111] в системе моделирования [112], обеспечивает решение следующих задач [15]:

- оценка показателей и надежности эксплуатационной работы узла для различных вариантов эксплуатационных условий и потоковой нагрузки;
- определение лимитирующих элементов в инфраструктуре и технологических процессах;
- оценка рационального распределения транспортных потоков;
- оценка показателей и надежности тягового обслуживания во всех видах движения.

Для построения имитационной модели такого масштаба и уровня сложности потребовалось разработать специальную технологию расчетов, которая предусматривает:

- 1) предварительную аналитическую оценку реализуемости инфраструктурных и технологических решений посредством сетевой потоковой модели с получением на выходе наборов исходных данных для имитационного моделирования;

2) построение в интерактивном режиме нормативного (вариантного) графика движения поездов с обеспечением заданных размеров движения и суточного замыкания;

3) проведение имитационных расчетов с определением показателей;

4) корректировку (перестроение) графика движения поездов в случае выхода контрольных показателей за пределы области допустимых значений;

5) повторение шагов (№3) — (№4) до принятия технологом решения о приемлемости значений контрольных показателей.

Описанная технология имитационного моделирования работы узла в виде блок-схемы приведена на рисунке 3.6.

В качестве контрольных показателей выступают суммы организованных и проследовавших единиц транспортного потока, допустимое число задерживаемых единиц потока и допустимое время задержек как в целом, так и на заданных технологических элементах и операциях.

Включение в технологию моделирования этапа построения нормативного графика движения поездов позволяет обеспечить предварительную приоритизацию и взаимоувязку всех видов пассажирского движения, занимающих общие элементы инфраструктуры. При этом имитационный расчёт:

— использует рациональные схемы пропуска поездов, предусмотренные разработанным графиком движения;

— проверяет реализуемость графика в различных эксплуатационных условиях и возможности его восстановления при сбоях;

— определяет динамические приоритеты в управляющих операциях в зависимости от величины неграфиковых задержек поездов;

— выявляет элементы путевого развития, вызывающие наибольшие задержки в продвижении поездопотоков и при выполнении операций с ними;

— позволяет определить уровень влияния на контрольные показатели количества поездных локомотивов, приёмно-отправочных путей, обслуживающих бригад в приёмно-отправочных парках, наличия маневровых средств и др;

— определяет влияние степени неравномерности входящего потока на контрольные показатели.

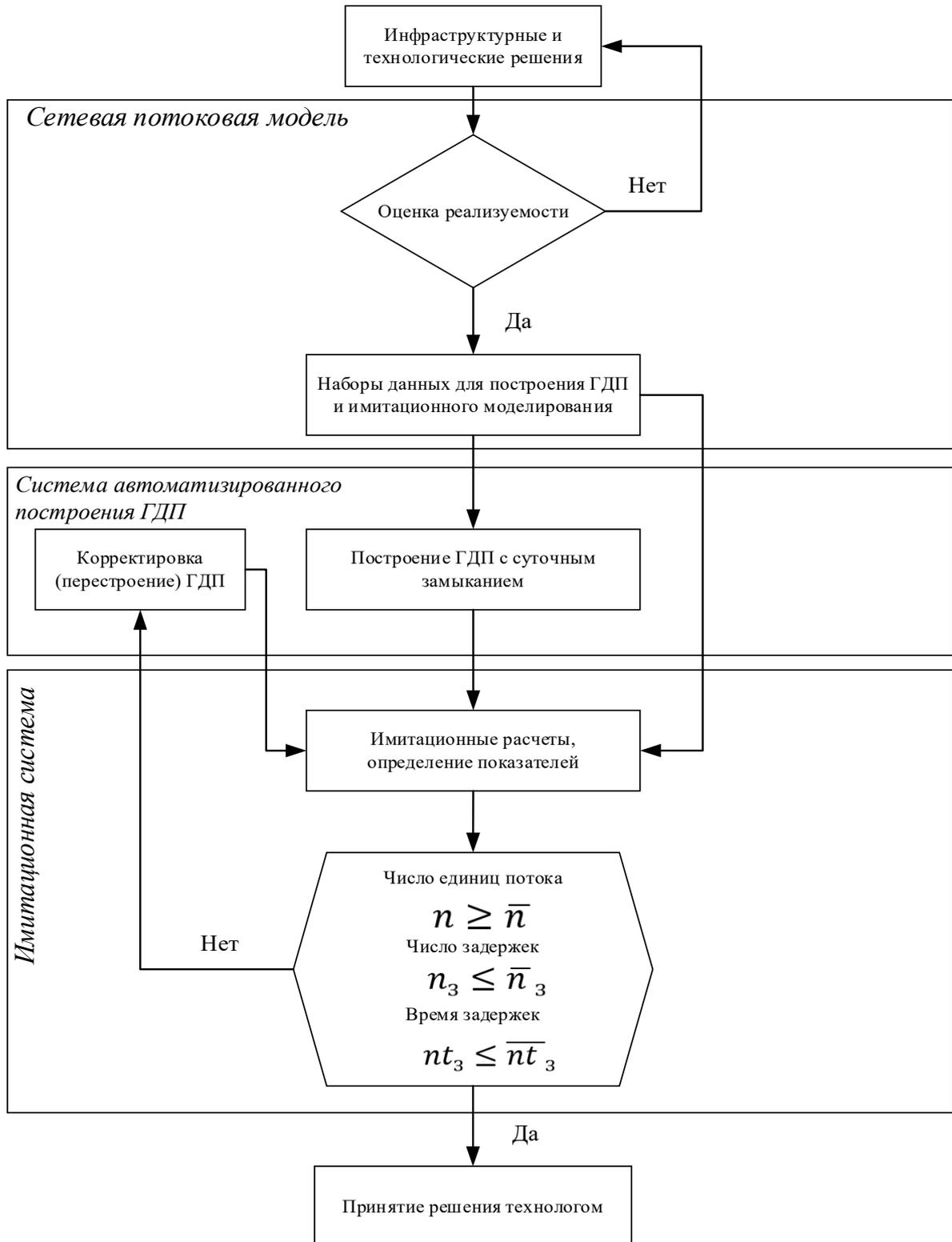


Рисунок 3.6 — Гибридная технология имитационного моделирования работы узла

Технология применялась при моделировании перспективной организации эксплуатационной работы Санкт-Петербургского железнодорожного узла [15, 16].

### 3.2.2 Сетевая потоковая модель транспортно-технологической системы

В сетевой потоковой модели транспортно-технологической системы каждое ребро графа в общем случае представляет элемент транспортной инфраструктуры и/или технологическую операцию (набор операций) [11]. При заданном техническом оснащении, технологии работы и методах оперативного управления на ребре графа задаются зависимости суммарных задержек  $\sum t_3$  и надежности  $H$  от величины потоковой нагрузки  $N$  (рисунок 3.7). При этом функции  $\sum t_3(N)$  и  $H(N)$  зависят не только от внутренней структуры потоковой нагрузки рассматриваемого звена транспортно-технологической системы, но и от показателей других (в общем случае — не обязательно соседних) звеньев, которые могут блокировать возможность движения по данному звену. Поэтому значения функций  $\sum t_3(N)$  и  $H(N)$  должны пересчитываться после каждого шага распределения потоков в рамках сетевой модели в целом [11].

Меры по обеспечению надежности следует определять, сопоставляя финансовые потери от снижения надежности  $R(N)$  с затратами на обеспечение надежности, в том числе на резервирование, включая альтернативные пути следования транспортных потоков (рисунок 3.8). Указанные затраты для разных классов мероприятий имеют различный характер зависимости от потоковой нагрузки: линейный  $E_1(N)$ , нелинейный  $E_2(N)$ , кусочно-непрерывный  $E_3(N)$ .

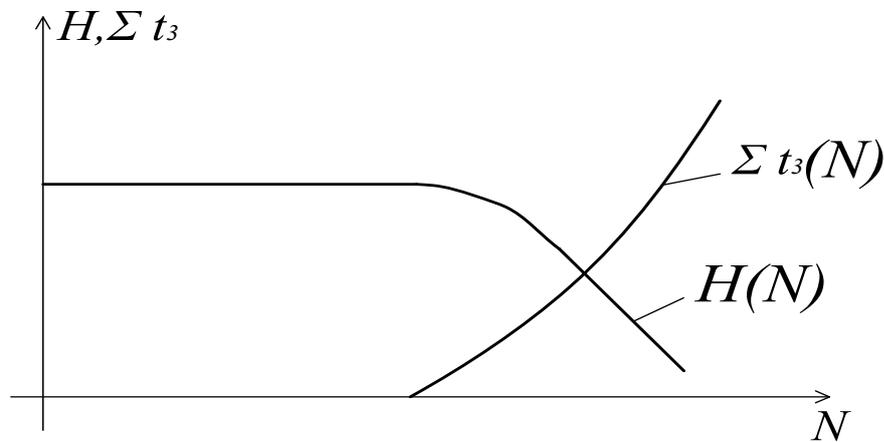


Рисунок 3.7 — Зависимость суммарных задержек и надежности звена транспортно-технологической системы от потоковой нагрузки

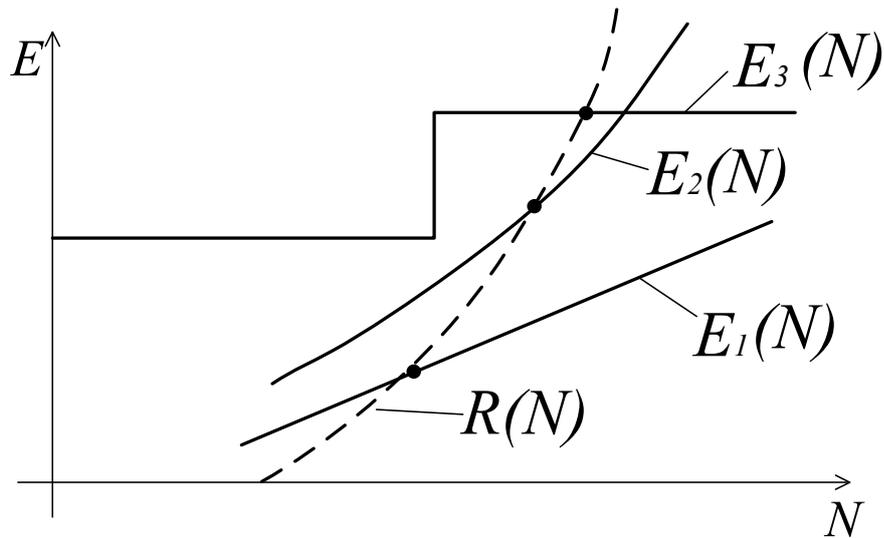


Рисунок 3.8 — Зависимости финансовых потерь и затрат на обеспечение надежности звена транспортно-технологической системы от потоковой нагрузки

Зависимости, представленные на рисунках 3.7 и 3.8, должны быть рассчитаны на имитационных моделях.

### 3.2.3 Типовой имитационный модуль пассажирской (пассажирской технической) станции

Для проведения имитационных экспериментов по определению зависимости финансовых потерь и затрат на обеспечение надежности звена транспортно-технологической системы от потоковой нагрузки разработан типовой имитационный модуль пассажирской станции [14] в среде имитационного моделирования [112].

Типовая пассажирская станция представляется в виде системы комплексов по обработке разнотипного входящего транспортного потока. При этом, каждая подсистема будет обозначаться отдельным бункером или группой бункеров. Для пассажирской станции будут характерны следующие бункерные элементы  $R_{\text{бунк}}(n)$ :  $R_{\text{бунк}}(1)$  — пассажирский парк с перронными путями для поездов дальнего следования (ППД) и  $R_{\text{бунк}}(2)$  — технический парк для обслуживания и отстоя составов ПДС — являются комплексом обслуживания поездов дальнего следования.  $R_{\text{бунк}}(3)$  — пригородный парк и  $R_{\text{бунк}}(4)$  — парк отстоя для пригородных поездов — являются

комплексом обслуживания пригородных поездов. Если станция обслуживает и грузовое движение, то возможно добавление транзитного парка для грузовых поездов —  $R_{бунк}(5)$ .

В общем случае схема пассажирской станции с техническим парком с указанием параметров, характеризующих бункеры в модели, представлена на рисунке 3.9.

Пассажирский парк  $R_{бунк}(1)$  включает следующие параметры:  $(np_1 \dots np_x)$  — типы всех пассажирских поездов, обслуживаемых в  $R_{бунк}(1)$  где  $e$  — ёмкость, соответствующая числу перронных путей,  $lok$  — число маневровых локомотивов,  $br_n$  — число бригад операций обслуживания пассажирского поезда (осмотр, заправка водой и тд.), где  $n$  — вид операции обслуживания. Горловины парка характеризуются параметрами, где  $cp$  — число одновременно возможных параллельных операций. В техническом парке пассажирской станции  $R_{бунк}(2)$  обслуживаются составы, относящиеся к диапазону  $(np_{n+1} \dots np_x)$ . Здесь  $e$  — ёмкость, соответствующая числу путей для отстоя,  $r$  — ёмкость, соответствующая числу путей для экипировки составов.  $br_a$  — соответствует числу бригад обслуживания, где параметр  $a$  — вид операции обслуживания в техническом парке.

Пригородный парк  $R_{бунк}(3)$  характеризуется параметрами  $(np_1 \dots np_n)$ , обозначающими множество категорий пригородных поездов, за исключением поездов дальнего следования, т.к. они не обслуживаются в  $R_{бунк}(3)$  и  $R_{бунк}(4)$ . Парк отстоя пригородных поездов  $R_{бунк}(4)$  имеет схожую характеристику, но параметр  $s$  в этом случае обозначает количество путей для межрейсового отстоя пригородных поездов. Характеристики парка  $R_{бунк}(5)$  задана как парка по обслуживанию транзитных грузовых поездов.

Операции технологической цепочки перемещения типового технологического процесса работы пассажирской (пассажирской технической) станции после формализации  $R_{пер}(t)$  имеют  $t = 1-10$ : 1 — приём пассажирского поезда, 2 — заезд маневрового локомотива, 3 — отцепка беспересадочных, почтовых вагонов, 4 — уборка поездного локомотива, 5 — перестановка состава на пути отстоя/экипи-

ровки в технический парк, 6 — перестановка экипированного состава в пассажирский парк, 7 — подача поездного локомотива, 8 — уборка маневрового локомотива, 9 — прицепка беспересадочных, почтовых вагонов, 10 — отправление поезда. Операции без перемещения  $R_{\text{бнep}}(t)$  имеют  $t = 1-4$  и могут быть следующими: 1 — техническое обслуживание состава в парках станции, 2 — смена локомотивной бригады, 3 — пассажирские операции, 4 — экипировка составов.

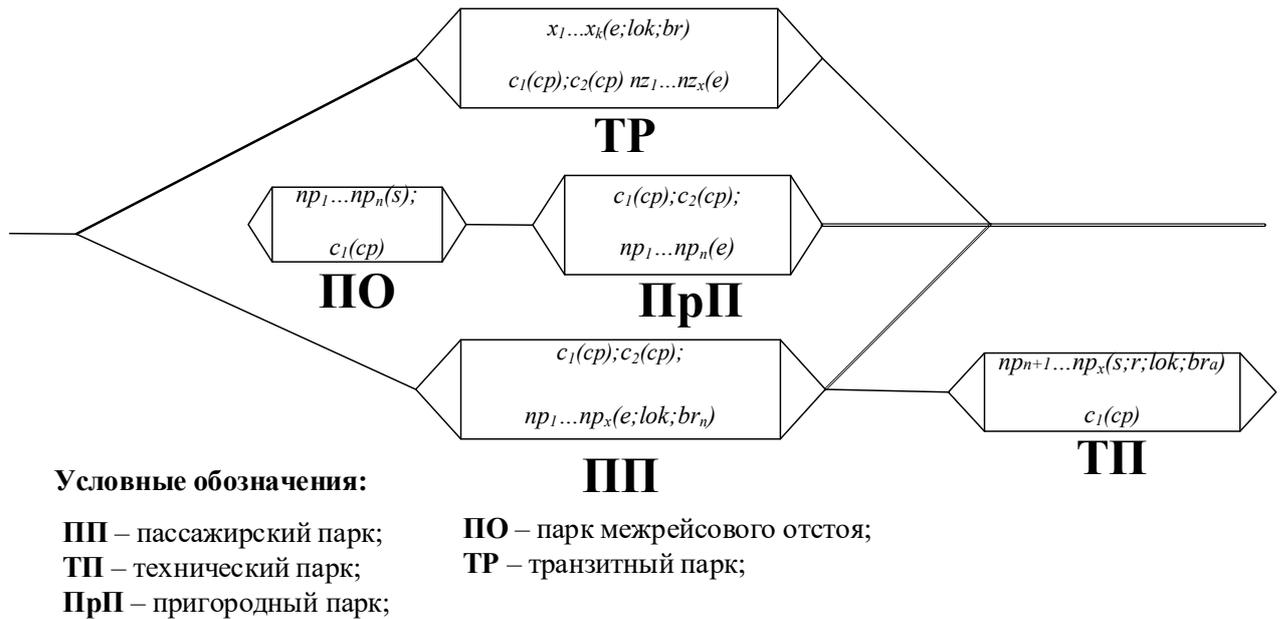


Рисунок 3.9 — Типовая схема модели пассажирской станции с техническим и транзитным парками

Итак, типовой имитационный модуль пассажирской станции применяется для определения зависимости технологических потерь, мероприятий и затрат на обеспечение надежности транспортно-технологической системы от потоковой нагрузки.

### **3.3 Методика расчета показателей надежности транспортных систем в пригородно-городском сообщении**

#### **3.3.1 Основные положения**

Особенности взаимодействия двух рельсовых транспортных систем и показатели пропускной способности существенно влияют на резервирование и надежность эксплуатируемых систем. Уровень выполнения и коэффициент технологического использования графика движения, вероятность непревышения заданной длительности следования транспортных единиц, вероятности непревышения допустимых отклонений времени проследования и прибытия, — всё это зависит от значения коэффициента резерва, вероятности безотказной работы, продолжительности задержек транспортных потоков и времени восстановления после отказов [11].

Надежность бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд» предопределяется надежностью транспортной системы «железная дорога», надежностью транспортной системы «трамвайная сеть» и надежностью стыка между системами. Поэтому требуется определить принципы расчёта показателей надежности с учетом новых факторов, влияющих на порядок расчёта пропускной способности станций и перегонов [11]. Эти величины зависят не только от пропускной способности и графика движения, но и от того, как организована маршрутная сеть и оперативное управление перевозочным процессом, а также от других факторов, приведенных ниже.

В таблице 3.1 произведено распределение факторов, влияющих на надежность бимодальной транспортной системы, по типу их влияния на работу системы.

Представленный набор факторов имеет значение для анализа вероятности возникновения опозданий (задержек транспортного потока), длительности этих задержек, в также оценки длительности восстановления системы до нормального состояния — отсутствия задержек.

Таблица 3.1 – Распределение факторов, влияющих на надежность транспортной системы

<b>Факторы, влияющие на вероятность безотказной работы системы</b>	<b>Факторы, влияющие на тяжесть последствий сбоя в работе системы</b>
тип обособленности инфраструктуры (полная, частичная, без обособления); тип применяемого подвижного состава; тип применяемой конструкции пути; тип применяемых устройств СЦБ и связи; внешние факторы (заторы на улично-дорожной сети, погода); кол-во категорий поездов (различных по массе, скорости, режиму остановок); качество содержания путевого хозяйства (наличие предупреждений о снижении скорости).	тип применяемого графика движения поездов; количество стыковых пунктов между системами; количество и схема размещения резервного подвижного состава; коэффициент использования пропускной способности; коэффициент использования провозной способности; протяженность маршрутов; пропускная способность стыка между системами; тип обособленности инфраструктуры; неравномерность пассажиропотока по времени суток; кол-во управляющих (диспетчерских) центров.

С учётом этих факторов устанавливаются требования к методике моделирования работы станций и перегонов на полигоне обращения бимодальных транспортных единиц («трамваев-поездов»). Одним из основных факторов, влияющих на возможность и время восстановления движения по графику (возвращение системы в нормальное состояние) являются резервы времени в перегонных временах хода и в станционных и межпоездных интервалах. Резервы позволяют производить управляющие действия, направленные на восстановление графика движения поездов [11] (подробнее в разделе 3.5.3).

### 3.3.2 Показатели надежности графика движения поездов

Под технологической надежностью нормативного графика движения поездов следует понимать его способность выполнять технологическую функцию основы перевозочного процесса в течение всего периода его действия [113], за исключением дат действия вариантного графика при проведении технологических окон для реконструкции и ремонта железнодорожной инфраструктуры [114].

Соответственно, технологическая надежность вариантного графика движения поездов означает его способность выполнять технологическую функцию основы перевозочного процесса в течение дат его действия [114].

В работе [115] введены показатели технологического использования графика движения грузовых поездов, которые характеризуют пунктуальность соблюдения нормативных ниток поездов в графике с учетом резервирования.

Коэффициент технологического использования графика определяется по формуле [115] и показывает долю времени в течение суток, за которое не происходит отклонений поездов от графика:

$$k_t = \frac{24n}{24n + n \sum nt_3 + n_0 T_{ок}}; \quad (3.37)$$

где  $n$  — общее число поездов, проследовавших по участку;

$n_0$  — число поездов, проследовавших не по графику;

$\sum nt_3$  — суммарные поездо-часы опоздания поездов, поездо-часы;

$T_{ок}$  — продолжительность нормативных технологических окон, ч.

При этом согласно [115] среднее время работы до отказа (при  $n_0 > 0$ ), ч.:

$$T_0 = \frac{24}{n_0}; \quad (3.38)$$

средняя продолжительность задержки одного опоздавшего поезда в пределах участка, ч:

$$t_{сб} = \frac{\sum nt_3}{n_0}; \quad (3.39)$$

уровень выполнения графика движения как вероятность безотказной работы системы за период:

$$P_{(t)} = \frac{(n - n_0)}{n}; \quad (3.40)$$

Обобщенный коэффициент технологического использования графика движения поездов — произведение коэффициента технологического использования графика и вероятности безотказной работы системы за период действия графика. Обобщенный коэффициент технологического использования графика движения

поездов определяется по формуле [115] и учитывает как число опоздавших поездов, так и общее время их опоздания:

$$k_{to} = k_t P_{(t)} = \frac{24(n-n_0)}{24n+t_{сб}n_0n+n_0T_{ок}}. \quad (3.41)$$

Когда часть расписаний (доля от общего числа —  $W_p$ ) имеет резерв времени (в среднем  $t_p$  на одно такое расписание), в формуле (3.41) величина  $t_p n_0$  заменяется на  $t_{сб}n_0 - n_0 t_p W_p$ .

Вероятность безотказной работы системы с резервированием:

$$P'_{(t)} = (1 - \frac{n_0}{n})(1 + (\frac{n_0}{n}) W_p). \quad (3.42)$$

$$W_p = \frac{n_p}{n}, \quad (3.43)$$

где  $n_p$  — число ниток поездов с резервированием;

Применение представленных зависимостей в комбинации с имитационным моделированием позволит качественно оценить предлагаемые реконструктивные и технологические решения.

### 3.3.3 Имитационное исследование показателей надежности графика движения поездов

Вопросам надежности перевозочного процесса посвящен ряд исследований, наиболее полными из которых являются [116, 70]. В диссертации Е.Н.Тимухиной [70] исследована природа функциональной надежности железнодорожных станций и характер влияния на нее технологических сбоев, разработана методология оценки уровня функциональной надежности методом имитационного моделирования с оптимизирующими процедурами, предложена методика определения функциональной уязвимости транспортных систем при нарушении работоспособности того или иного ее элемента, разработаны способы повышения функциональной надежности за счет повышения адаптивности транспортной системы и специальных режимов управления.

Согласно [70], функциональная надежность характеризуется вероятностью выполнения некоторой функции  $f$  —  $P(f)$  при обеспечении заданных технологических параметров  $\gamma_k$  и  $\gamma_l$ .

$$\gamma_k \leq \bar{\gamma}_k, \quad \gamma_l \geq \bar{\gamma}_l, \quad (3.44)$$

где  $\gamma_k, \gamma_l$  — технологические параметры выполнения функции;

$\bar{\gamma}_k, \bar{\gamma}_l$  — предельные значения технологических параметров;

$K$  — множество параметров, по которым задается верхняя граница;

$L$  — множество параметров, по которым задается нижняя граница.

Выбор элементов, вызывающих наибольшую функциональную уязвимость системы, в работе [70] производится путем структурно-функционального анализа «узких мест» структуры (т. е. элементов, вызывающих наибольшие задержки транспортных потоков) или «узких мест» технологии (т.е. операций, вызывающих наибольшие задержки транспортных потоков) (рисунок 3.10).

При этом анализ «узких мест» структуры по операциям имеет целью снижение задержек путем изменения набора операций на элементе, а анализ «узких мест» технологии по элементам имеет целью снижение задержек путем изменения набора элементов в операциях. Показатели, перечисленные в п. 3.3.2, не могут быть рассчитаны на основе графиковых поездопотоков и модели данных нормативного графика движения поездов, содержащей информацию в объеме листа графика.

Цель расчета надежности транспортных систем в пригородно-городском сообщении — оценить их работоспособность на всем периоде действия нормативного графика движения поездов в условиях изменяющихся транспортных потоков и эксплуатационной обстановки.

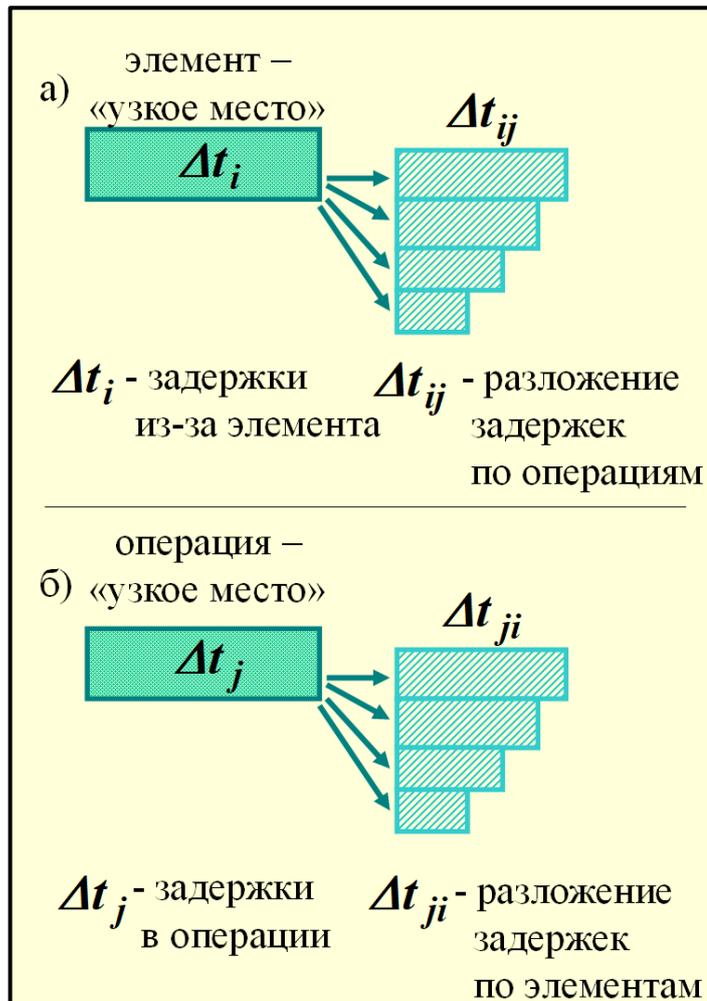


Рисунок 3.10 — Два способа выбора элементов с наибольшими функциональными потерями [70]

Для достижения указанной цели расчет надежности транспортной системы предусматривает решение следующих задач (рисунок 3.11).

1. Загрузка данных нормативного графика движения поездов в имитационную модель системы.
2. Генерирование вариантов отклонения следования поездов от нормативного графика.
3. Оценка продвижения по нормативному графику расчетных транспортных потоков с учетом их отклонений от нормативного графика и регулировочных решений путем расчетов на имитационной модели системы.
4. Определение показателей технологической надежности.

5. Если значения показателей технологической надежности выходят за диапазон допустимых значений, то необходимо определить варианты мер по повышению надежности в соответствии с разделом 3.5. С учетом намеченных мер изменяют параметры имитационной модели системы и повторяют расчеты (см. пп. 1-4).

6. Если значения показателей технологической надежности соответствуют диапазону допустимых значений, то необходимо из числа рассчитанных альтернатив выбрать вариант мер по повышению надежности, требующий наименьших дополнительных затрат.

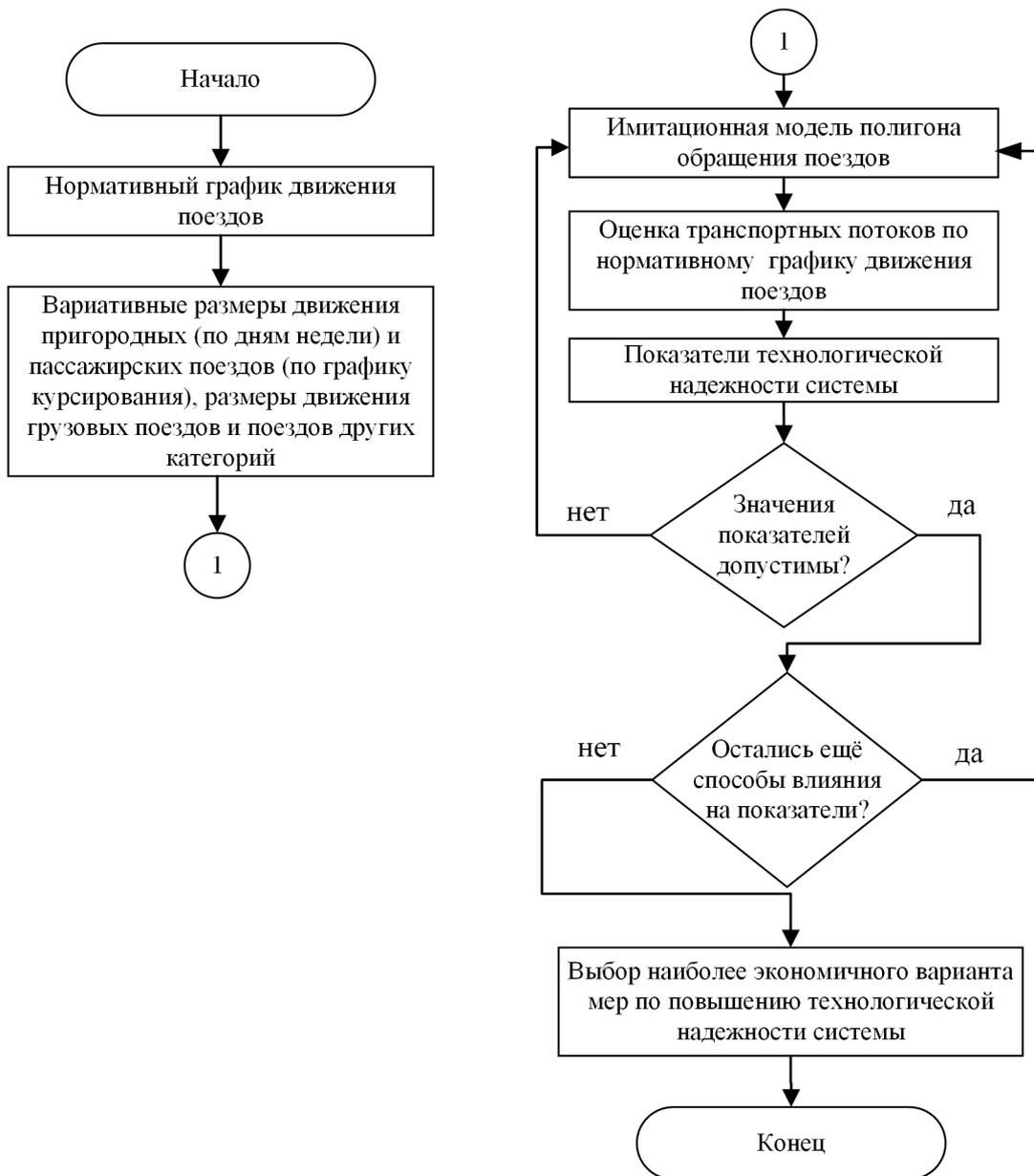


Рисунок 3.11 — Алгоритм расчета технологической надежности бимодальной транспортной системы с оценкой мер по ее повышению

### 3.4 Надежность работы трамвайно-железнодорожной соединительной линии (гейта)

В данном диссертационном исследовании производится сравнение вариантов путевого развития трамвайно-железнодорожных соединительных линий (гейтов) при их примыкании к пассажирским станциям с учетом особенностей взаимодействия двух рельсовых транспортных систем.

С использованием описанного в п. 3.2.3 типового имитационного модуля пассажирской станции и после дополнения модели полигона прилегающими промежуточными станциями участка (рисунок 3.12) проведен ряд экспериментов для расчета зависимостей надежности работы железнодорожной станции от места примыкания гейта. За прообраз моделируемого участка приняты схемы полигона из раздела 2.5. Сравнимые в данном разделе схемы примыкания гейтов к станциям подобраны после анализа и типизации гейтов в разделе 2.3 и представлены на рисунках 3.13 – 3.15.

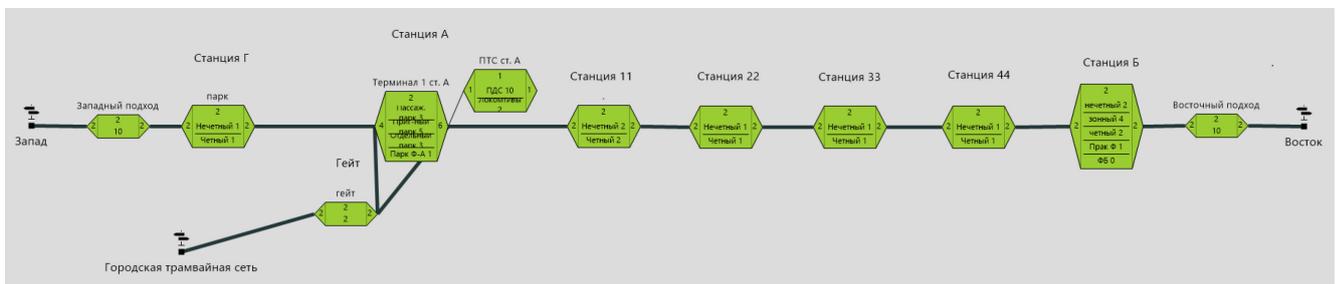


Рисунок 3.12 — Схема полигона моделирования в системе ИМЕТРа

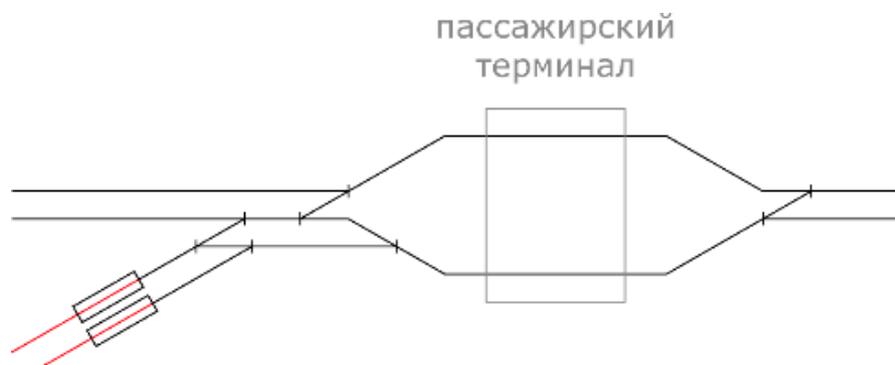


Рисунок 3.13 — Схема путевого развития станции с использованием для посадки-высадки пассажиров из «трамвая-поезда» перронных путей железной дороги (вариант 1)

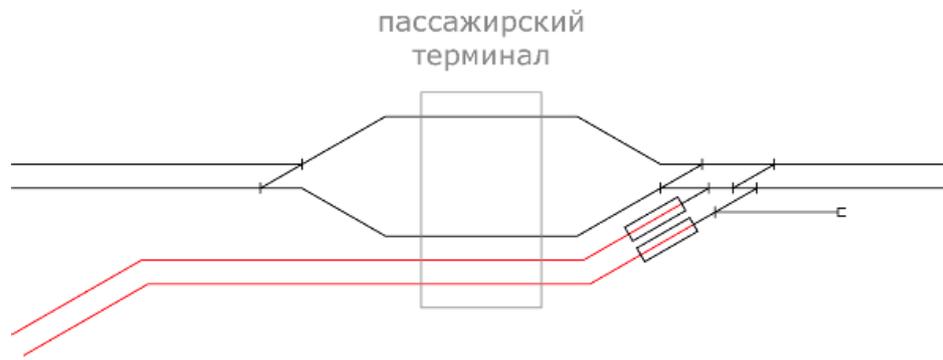


Рисунок 3.14 — Схема путевого развития станции с размещением посадочных платформ «трамвая-поезда» рядом с группой перронных путей железной дороги (вариант 2)

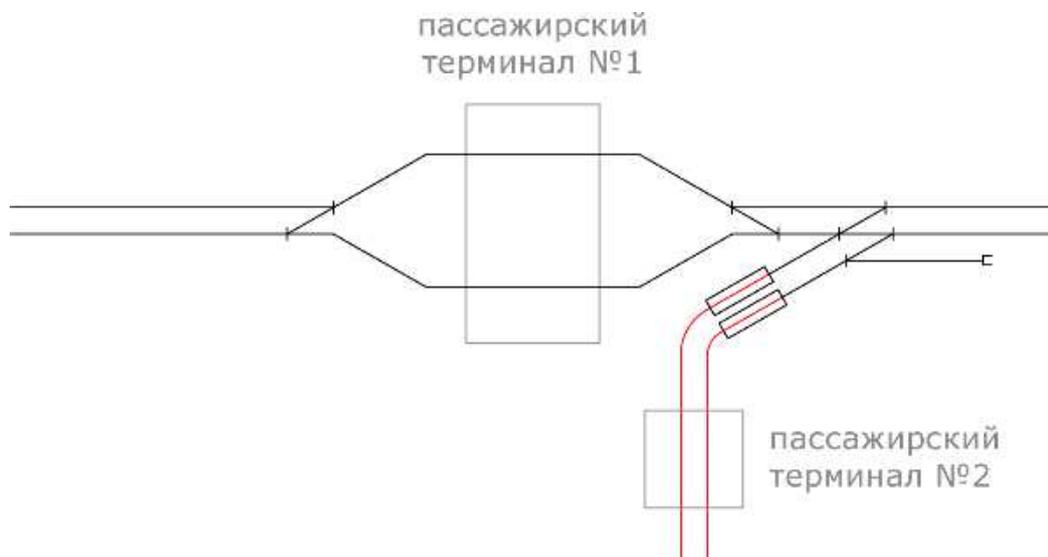


Рисунок 3.15 — Схема путевого развития станции с примыканием гейта и с расположением посадочных платформ для маршрутов «трамвая-поезда» в отдельном терминале (вариант 3)

По каждому варианту примыкания трамвайно-железнодорожной соединительной линии проведена серия имитационных экспериментов для определения задержек в движении поездов.

Для проведения имитационных экспериментов сформирован полигон, включающий:

— двухпутный железнодорожный электрифицированный участок «Г — Б», оборудованный односторонней автоблокировкой;

— 7 станций: 1 пассажирская (станция «А»), 6 промежуточных (станции «Б», «Г», «11», «22», «33», «44», «55»);

— трамвайно-железнодорожную соединительную линию, примыкающую к станции «А» (см. рисунки 3.13-3.15).

Станция «А» представляет собой пассажирскую станцию с тремя парками: пассажирский (для приема, отправления, транзита поездов дальнего следования); технический парк — для межрейсового обслуживания составов поездов дальнего следования; пригородный парк — для работы с пригородными электропоездами. Станция «Б» оборудована зонными путями для оборота чётных электропоездов. На промежуточных станциях («Б», «Г», «11», «22», «33», «44», «55») возможно производить операции по обгону поездов более низкого приоритета, например, грузовых.

На участке «Г — А — Б» организуется тактовое движение пригородно-городского маршрута «трамваев-поездов». Пригородные и пассажирские поезда дальнего следования должны следовать по железнодорожному участку «А — Б» без постановки под обгон для сохранения времени в пути на уровне, позволяющем сохранить привлекательность железнодорожного транспорта (см. раздел 4.3).

На рассматриваемом полигоне обращаются поезда 4-х категорий:

1. пассажирские поезда дальнего следования (ПДС);
2. пригородные поезда (ПС);
3. «трамваи-поезда» (ТП);
4. грузовые поезда (ГР).

Размеры движения поездов всех категорий, являющихся потоковой нагрузкой на инфраструктуру при проведении имитационных экспериментов, представлены на рисунке 3.16.

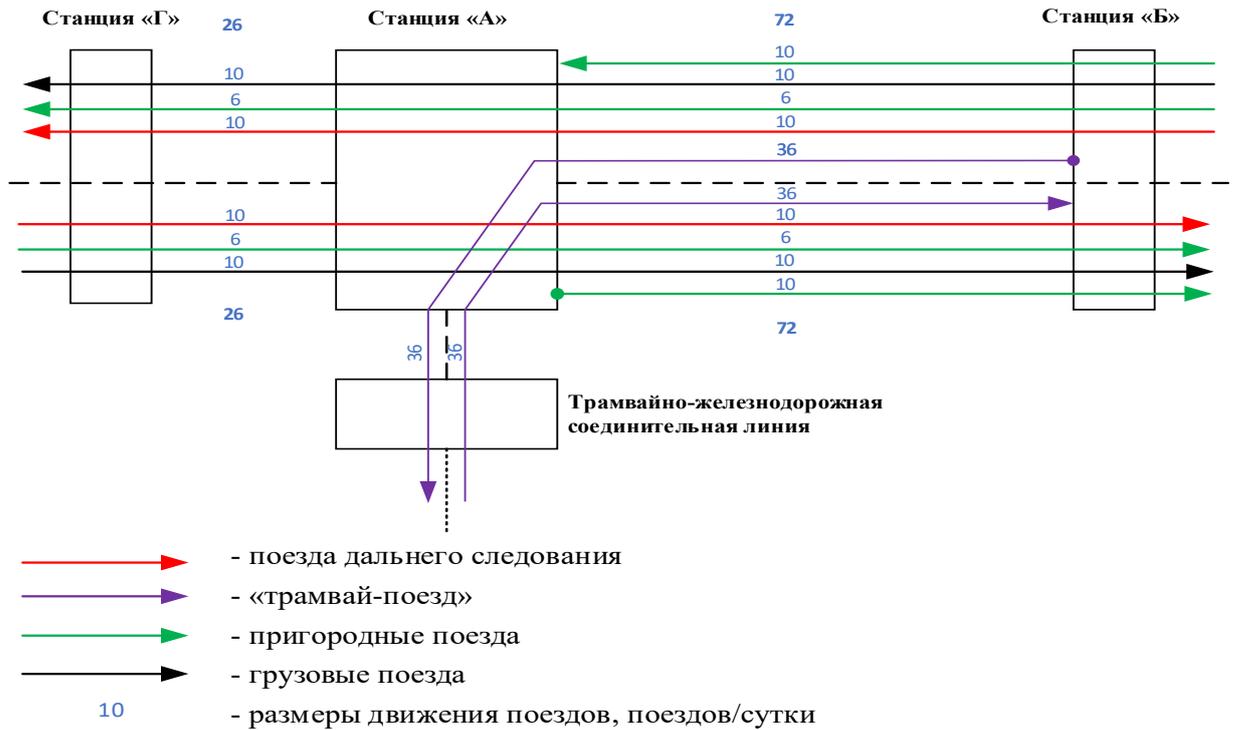


Рисунок 3.16 — Диаграмма размеров движения поездов (поточковой нагрузки) на рассматриваемом полигоне

В этом и следующем разделах оценивается надежность работы бимодальной транспортной системы в части устойчивости работы схемных решений вариантов примыкания гейтов в условиях нормальной работы связки «трамвайная сеть — железная дорога» (по нормативному графику) и в условиях несвоевременного выхода «трамвая-поезда» на гейт (нарушение контактного графика). Исходные данные также включают:

—  $\mu^k$  — доля поездов  $k$ -ой категории, поступающих на рассматриваемый полигон с отклонением от нормативного графика движения поездов;

—  $\rho^k \in [d; h]$  — величина отклонения от графика поступающего поезда  $k$ -ой категории. Может принимать значение от  $d$  до  $h$  (минуты).

Нижняя граница  $d$  допустимых значений отклонения от графика составляет 2 минуты. Верхняя граница  $h$  допустимого значения отклонения от графика не должна превышать значения, по достижении которого поездной диспетчер не примет на свой диспетчерский участок «трамвай-поезд» и отправит его под оборот. Это значение зависит от поездной обстановки и может быть разным в течение суток.

В таблице 3.2 приведены усредненные показатели задержек в движении по категориям поездопотоков (количество расчетов на каждый вариант путевого развития — 5, количество суток расчета — 10).

В соответствии с разработанным алгоритмом расчета (см. рисунок 3.11 и 3.17) производятся следующие действия:

1) снятие показателей задержек движения всех категорий поездов при  $\mu^k = 0$ ; полученные результаты заносятся в графу «базовый» (таблица 3.2);

2) снятие показателей задержек движения всех категорий поездов при  $\mu^{\text{П}} = 0,15$ ,  $d = 2$  мин.,  $h = 8$  мин.; полученные результаты заносятся в графу «сбойный».

«Сбойный» вариант приводится при опоздании 10% входящего через гейт потока «трамваев-поездов» на 2-8 минут от нормативного расписания.

На основе анализа результатов по графам «нормальный» и «сбойный» сделан вывод о том, что варианты 2 и 3 путевого развития в случае сбоя в движении позволяют более оперативно вводить поезда в график. Разница задержек движения для всех категорий поездов в «сбойном» режиме работы составила 0,47 часа.

Таблица 3.2 – Средние значения задержек в продвижении по категориям поездопотоков (в часах и минутах)

Задержки по категориям	Вариант 1 (см. рисунок 3.13)			Вариант 2 (см. рисунок 3.14)			Вариант 3 (см. рисунок 3.15)		
	базовый	сбойный	с нагоном	базовый	сбойный	с нагоном	базовый	сбойный	с нагоном
Пригородные поезда	3:25	3:16	3:08	3:18	3:11	3:19	3:18	3:11	3:19
Грузовые поезда	2:23	2:49	2:57	2:49	2:35	2:25	2:49	2:35	2:25
«Трамвай-поезда»	1:10	1:18	0:47	0:35	1:00	0:48	0:35	1:00	0:48
Пассажирские поезда	1:20	1:39	1:30	1:36	1:48	1:36	1:36	1:48	1:36
<b>Сумма</b>	<b>8:18</b>	<b>9:02</b>	<b>8:22</b>	<b>8:18</b>	<b>8:34</b>	<b>8:08</b>	<b>8:18</b>	<b>8:34</b>	<b>8:08</b>

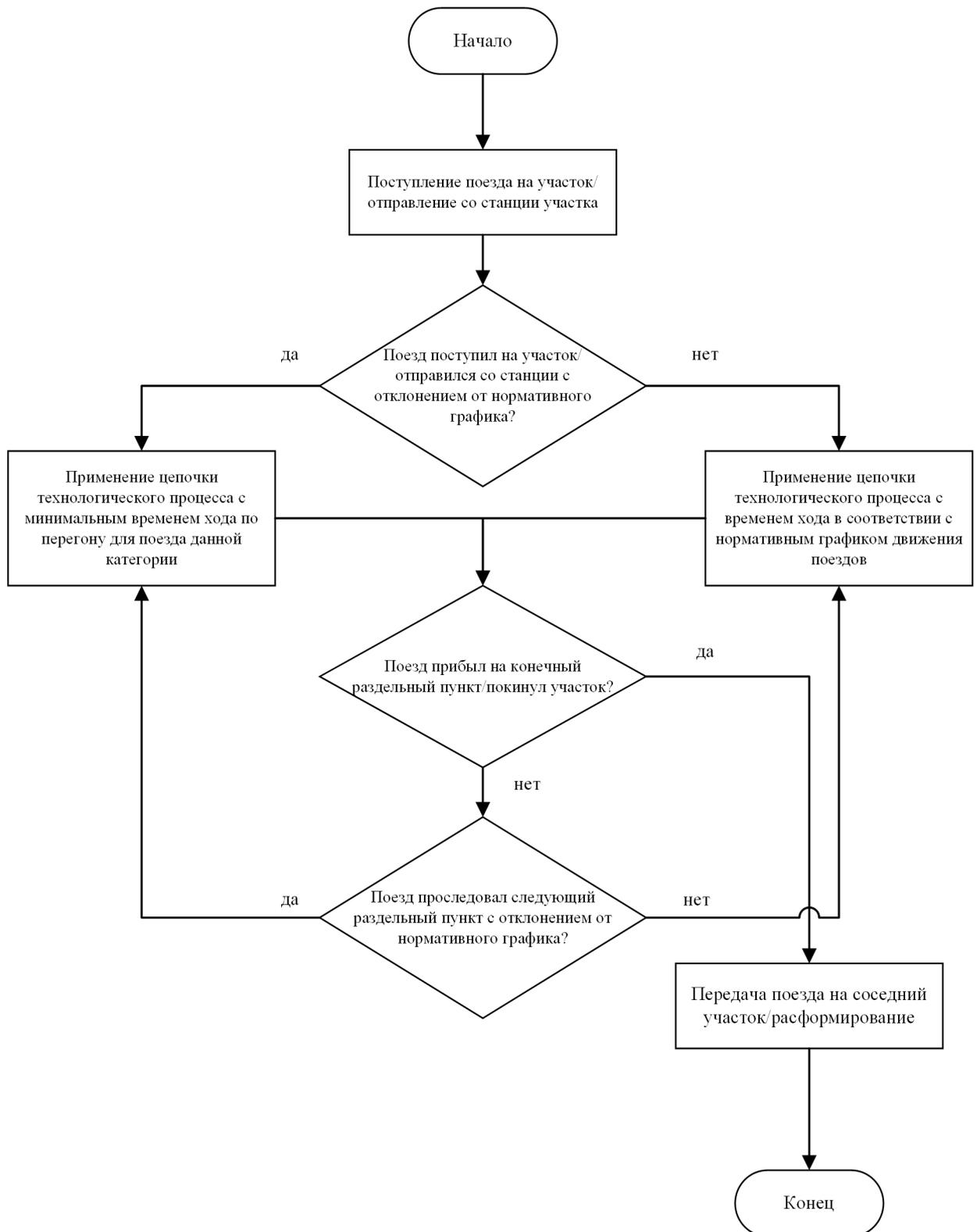


Рисунок 3.17 — Алгоритм моделирования в режиме работы «с нагоном»

На основе полученных задержек в движении поездов (таблица 3.2), параметров рассматриваемого графика движения поездов (таблица 3.3) и формул (3.37-3.41) рассчитаны показатели надежности графика. Результаты расчета представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.3 – Параметры графика движения поездов

Параметр	Значение
1. Общие размеры движения поездов на участке	72 пары поездов/сутки
2. Общее число поездов, проследовавших по участку – $n$	144 поездов/сутки
3. Доля поездов, имеющих резерв во времени хода – $W_p$	0,5
4. Продолжительность технологического окна – $T_{ок}$	120 минут

Таблица 3.4 – Показатели надежности графика движения поездов по вариантам работы «базовый» и «сбойный» и вариантам путевого развития

Показатель \ вариант путевого развития станции примыкания	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
	базовый	сбойный	базовый	сбойный	базовый	сбойный
Суммарное время опоздания поездов, поездо-часы	0	0,73	0	0,26	0	0,26
Коэффициент технологического использования графика, $k_t$	1	0,968	1	0,987	1	0,987
Время работы до отказа, час — $T_0$	-	6	-	6	-	6
Средняя продолжительность задержки одного опоздавшего поезда, час — $t_{сб}$	-	0,182	-	0,065	-	0,065
Вероятность безотказной работы системы $P_{(t)}$ .	1	0,97	1	0,97	1	0,97
Обобщенный коэффициент технологического использования графика движения поездов $K_{t0}$	-	0,94	-	0,96	-	0,96

Полученные результаты демонстрируют, что при прочих равных условиях путевое развитие трамвайно-железнодорожных соединительных линий по вариантам №2 и 3 приводит к меньшим задержкам в движении поездов и к более высоким показателям соблюдения нормативного графика движения поездов.

### 3.5 Разработка решений по повышению функциональной надежности транспортных систем

Если полученные в пункте 3.4 показатели надежности работы системы в «базовом» (нормальном) или «сбойном» режимах говорят о недостаточном уровне надежности, целесообразно рассмотреть технологию поиска уязвимостей в работе системы и подбора методов по устранению или снижению влияния этих факторов на надежность работы и длительность восстановления нормальной работы системы после сбоя в работе.

Для проектируемой или действующей бимодальной транспортной системы порядком, изложенным в п. 3.3.3, диагностируются точки её функциональной уязвимости (элементы, операции, процессы), для которых определяются продукционные правила выбора наборов возможных мероприятий в используемой инфраструктуре, в маршрутной сети и в принципах организации движения и оперативного управления.

В используемой инфраструктуре:

- применение схем станций и соединительных линий с минимальным количеством враждебных маршрутов;
- рациональный выбор места и способа примыкания гейта к железнодорожной инфраструктуре (см. раздел 3.4);
- организация движения маршрута «трамвая-поезда» по улицам с выделенной полосой для рельсового общественного транспорта, с приоритетом следования маршрутных транспортных средств, с обеспечением первоочередного проезда городских перекрестков, оборудованных светофорным регулированием;
- строительство полностью обособленных линий от городского автомобильного движения (подземные или надземные участки).

В маршрутной сети:

- организация параллельных маршрутов с обходом элементов, вызывающих наибольшие задержки;
- уменьшение или увеличение дальности следования маршрутов;

— организация укороченных рейсов по маршруту.

В принципах организации движения и оперативного управления:

- выбор метода оперативного регулирования движения поездов при несвоевременном поступлении «трамвая-поезда» на инфраструктуру железной дороги;
- организация резерва составов «трамваев-поездов» для обеспечения оперативной подмены неисправного подвижного состава;
- передача в управление поезвному диспетчеру части трамвайной сети (например, гейта и устройств оборота на нем), прилегающей к железнодорожному участку.

Рассмотрим порядок оперативного регулирования движения поездов при несвоевременном поступлении «трамвая-поезда» на инфраструктуру железной дороги [11]. На рисунках 3.18 и 3.19 представлены фрагменты графика движения поездов и «трамваев-поездов» в районе стыкового пункта между системами. Раздельные пункты «А» и «Б» являются станциями железной дороги. На станции «А» расположен физический пункт перехода «трамваев-поездов» из системы в систему (гейт) и пути оборота пригородных поездов. Раздельный пункт «Д» является контрольной точкой в трамвайной системе (контроль соблюдения расписания). Нитки обычных (пригородных) поездов обозначены толстыми линиями, нитки «трамвая-поезда» — тонкими линиями. Отклонение от графика обозначено штриховыми линиями.

В ситуации, представленной на рисунке 3.18, при следовании по участку «Д» — «А» произошла задержка  $t_{зт1}$  в движении «трамвая-поезда», которая не позволила ему прибыть на стык систем вовремя. Поскольку в момент прибытия «трамвая-поезда» на гейт до времени отправления по расписанию пригородного поезда оставалось времени меньше, чем величина межпоездного интервала  $I_{МП}$ , то отправление «трамвая-поезда» далее в сторону станции «Б» будет возможно только через  $I_{МП}$  после отправления пригородного поезда. Тогда общая задержка «трамвая-поезда» составит  $t_{зт2}$ , а задержек в движении поездов других категорий на участке «А — Б» не произойдёт.

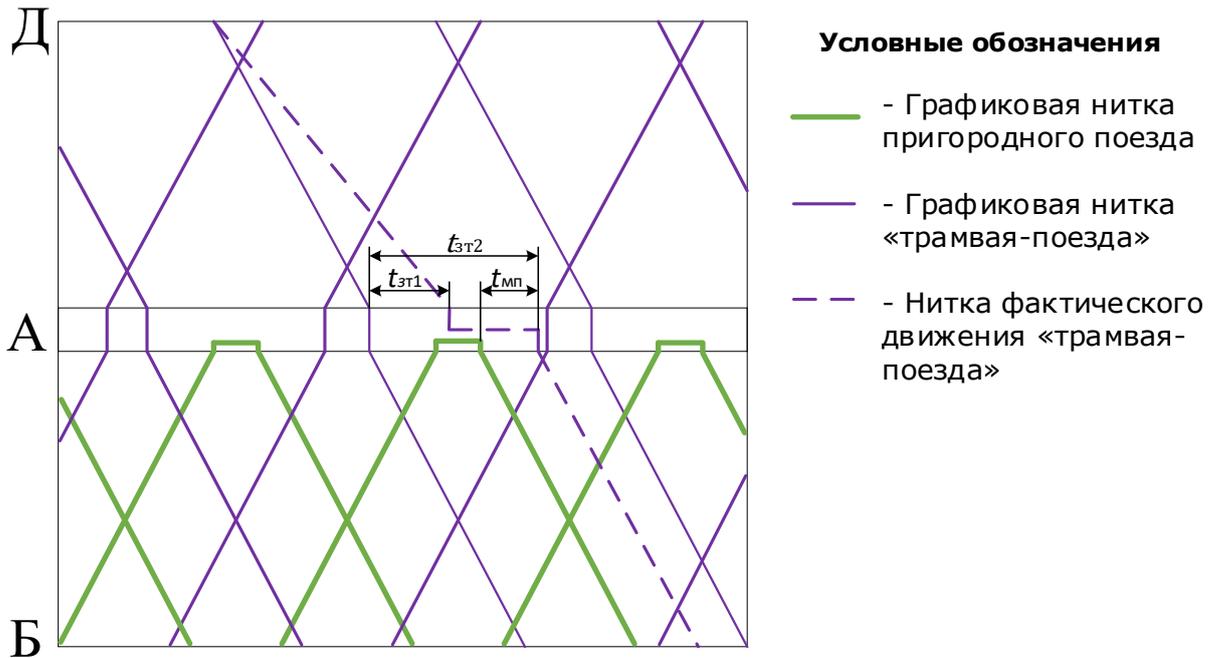


Рисунок 3.18 — Пример №1 последствий задержек и отклонения от графика движения поездов

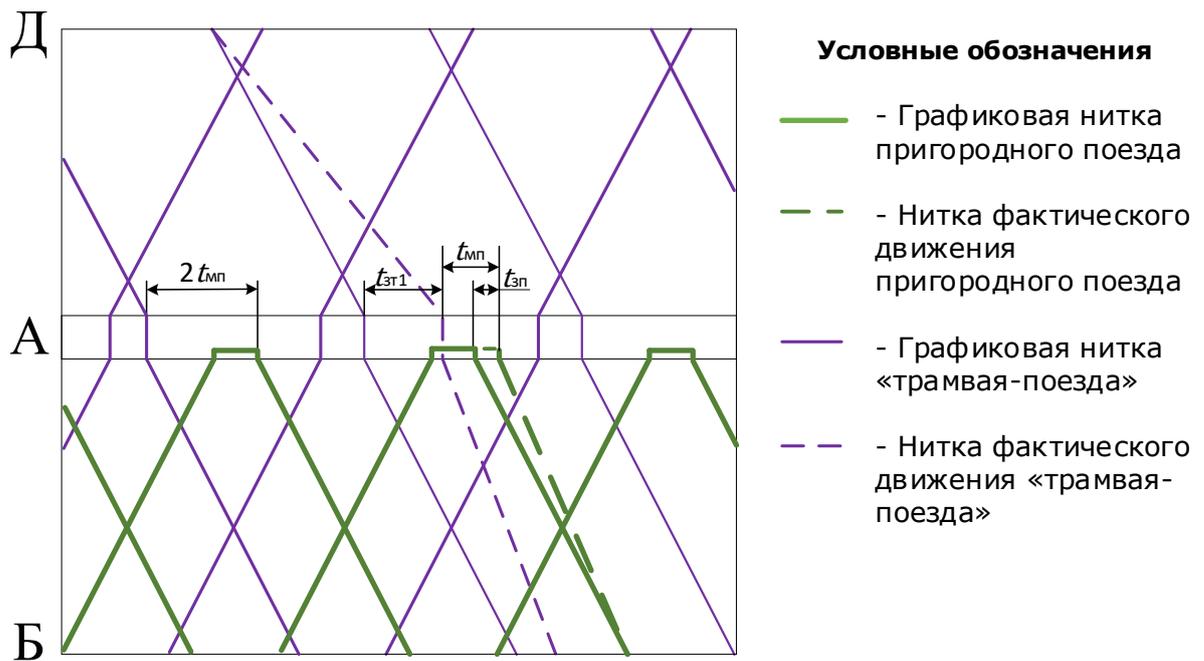


Рисунок 3.19 — Пример №2 последствий задержек и отклонения от графика движения поездов

Другой вариант развития ситуации представлен на рисунке 3.19. При следовании «трамвая-поезда» по участку «Д — А» произошла задержка  $t_{зт1}$ . Основываясь на способах использования резервов в графике движения поездов, представленных в [117], предлагается задержать отправление пригородного поезда со станции «А» и пропустить «трамвай-поезд» на сеть без задержек на стыковом пункте. Используя

свободное поле графика, задержанный поезд отправится вслед нагоняющему своё расписание «трамваю-поезду» через межпоездной интервал. Задержка пригородного поезда составит  $t_{зп}$ . Для ввода поездов в график могут быть использованы резервы времени, заложенные в перегонное время хода поездов на участке «А — Б» (см. рисунок 3.12). Таким образом, через некоторое время оба поезда будут введены в график (в отличие от примера 1, где произвести нагон мешает движущийся по расписанию пригородный поезд) [11]. Из рисунков 3.18 и 3.19 видно, что сумма временных задержек во втором случае будет меньше, чем в первом случае:

$$t_{зт2} > t_{зт1} + t_{зп}. \quad (3.45)$$

Для оценки эффективности такого способа работы с опаздывающими поездами проведены имитационные эксперименты. Результаты эксперимента занесены в таблицу 3.2, в графу «с нагоном». После анализа полученных данных сделан вывод, что суммарные задержки в движении всех категорий поездов по 2 варианту путевого развития ниже, чем в 1 варианте на 0,23 часа, что говорит о предпочтительности использования 2 варианта примыкания трамвайно-железнодорожных соединительных линий (гейтов).

Выбор того или иного метода работы с опаздывающими поездами должен производиться в зависимости от величины опоздания и с учётом категорий обращающихся на участке поездов [11].

Могут быть рассмотрены также дополнительные способы предварительной подготовки к сбою в работе транспортной системы и восстановления нормальной работы. Для возможности выполнения части пригородного маршрута «трамвая-поезда» в случае его неисправности и последующей замены подвижным составом железной дороги (без возможности выезда на городскую трамвайную сеть) рекомендуется нитку «трамвай-поезда» от зонной станции до гейта устанавливать ежедневной, а на участке железной дороги от гейта до центрального вокзала (или до конечного пункта по существующему пригородному маршруту) прокладывается вариантная нитка графика. В этом случае нитки «трамвая-поезда» на железной дороге должны быть проложены с использованием перегонных времен хода, используемых для пригородных поездов.

### Выводы по 3 главе

1. Методические принципы расчета пропускной способности железнодорожных линий в условиях интенсивного тактового движения пассажирских поездов учитывают некрatность периода тактового графика, межпоездного интервала и взаимное расположение поездов в графике движения. Расчет коэффициента дополнительного съема для поездов тактового графика показал колебания его значений в зависимости от величины такта и межпоездного интервала в диапазоне от 0 до 0,9.

2. Гибридная технология имитационного моделирования содержит этап интерактивного построения нормативного графика движения поездов, что позволяет обеспечить предварительную приоритизацию и взаимоувязку всех видов движения, занимающих общие элементы инфраструктуры. При этом имитационный расчёт использует рациональные схемы пропуска поездов, предусмотренные разработанным графиком движения; проверяет реализуемость графика в различных эксплуатационных условиях и возможности его восстановления при сбоях; определяет динамические приоритеты в управляющих операциях в зависимости от величины неграфиковых задержек поездов.

3. Для определения зависимости технологических потерь, мероприятий и затрат на обеспечение надежности транспортно-технологической системы от потоковой нагрузки разработан типовой имитационный модуль пассажирской станции.

4. Цель расчета надежности транспортных систем в пригородно-городском сообщении — оценить их работоспособность на всем периоде действия нормативного графика движения поездов в условиях изменяющихся транспортных потоков и эксплуатационной обстановки. Систематизированы факторы, влияющие на вероятность безотказной работы системы, и факторы, влияющие на тяжесть последствий сбоя в работе системы.

5. Проведено имитационное исследование вариантов путевого развития трамвайно-железнодорожных соединительных линий при её примыкании к пассажирской станции с учетом особенностей взаимодействия двух рельсовых транс-

портных систем. Варианты примыкания трамвайно-железнодорожной соединительной линии в горловине, ближайшей к направлению следования по железнодорожной инфраструктуре, в случае сбоя в движении позволяют более оперативно вводить поезда в график, обеспечивают снижение задержек поездов и более высокие показатели надежности графика движения поездов.

6. Для проектируемой или действующей бимодальной транспортной системы диагностируются точки её функциональной уязвимости (элементы, операции, процессы), для которых определяются производственные правила выбора наборов возможных мероприятий: в используемой инфраструктуре, в маршрутной сети, в принципах организации движения и оперативного управления.

## ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ И СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ «ТРАМВАЙ-ПОЕЗД» В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ

### 4.1 Технология взаимодействия систем при организации движения по принципу «трамвай-поезд»

Классификация транспортных систем (отдельных маршрутов) «трамвай-поезд» возможна по признаку используемой инфраструктуры, т.к. требования к подвижному составу, системам управления и безопасности в каждом случае не будут одинаковы [6]:

1. Городская трамвайная сеть, пути общего пользования.
2. Городская трамвайная сеть, пути необщего пользования.
3. Городская трамвайная сеть, пути общего пользования, пути необщего пользования.
4. Пути общего пользования, пути необщего пользования.
5. Пути необщего пользования.

Рассмотрим несколько сценариев организации пригородно-городского движения: базовый сценарий — организация движения по существующей обособленной технологии и три сценария с применением технологии «трамвай-поезд» (см. рисунок 2.18). В рассматриваемых сценариях каждый перевозчик использует собственный подвижной состав.

**Базовый сценарий.** Пассажирская пригородная компания (далее — ППК) планирует и создает маршруты для перевозки пассажиров на основе своих решений, основываясь на заказе (договоре) на организацию пригородных перевозок от Министерства транспорта субъекта РФ. Для организации работы собственного подвижного состава ППК заключает с владельцем инфраструктуры общего пользования *договор на оказание услуг инфраструктуры* [102], а при необходимости использования инфраструктуры пути необщего пользования (далее — ПНП) ППК заключает соответствующий договор с владельцем ПНП.

Для регламентации технологического взаимодействия при передаче поездов и маневровых составов между двумя владельцами инфраструктур разрабатывается

и утверждается *инструкция о порядке обслуживания и организации движения на железнодорожном пути необщего пользования* [118]. На схеме (рисунок 4.1) представлены рассматриваемые организационные взаимосвязи между субъектами транспортной отрасли при организации пригородных железнодорожных перевозок по существующей технологии. Пояснения к цифровым обозначениям приведены после рисунка 4.2.



Рисунок 4.1 — Схема технологического взаимодействия транспортных организаций при организации пригородных и городских перевозок рельсовым транспортом в настоящее время

При организации бимодальной транспортной системы на рынке транспортных услуг региона появляется **новый перевозчик**, предоставляющий инновационную транспортную услугу с помощью специального подвижного состава (ССПС) — «трамвая-поезда», который имеет возможность передвигаться как по железнодорожной, так и по городской трамвайной инфраструктуре.

Для перехода ССПС из одной сети в другую **новый перевозчик** сооружает трамвайно-железнодорожную соединительную линию (гейт). Гейт примыкает к инфраструктуре общего пользования и является самостоятельным ПНП, а **новый перевозчик** — его владельцем. Далее, гейт как субъект права будет обозначаться — ПНП-гейт.

**Сценарий № 1.** Технология организации движения «трамваев-поездов» по маршруту, затрагивающему инфраструктуру городской трамвайной сети и железнодорожную инфраструктуру общего пользования, должна регламентироваться инструктивными документами и заключаемыми соглашениями, приведенными ниже (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 — Обобщенная схема взаимосвязей при организации пригородно-городских перевозок с помощью бимодальной транспортной системы, пригородных поездов и городской трамвайной сети

1. *Договор на оказание услуг инфраструктуры* между владельцем инфраструктуры общего пользования и **новым перевозчиком**. В рамках этого договора производится заказ и оплата услуг предоставления **новому перевозчику** доступа к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования.

2. *Договор на оказание услуг трамвайной инфраструктуры* между оператором городской трамвайной сети и **новым перевозчиком**. В рамках этого договора производится заказ и оплата услуг предоставления **новому перевозчику** доступа к трамвайной инфраструктуре городского транспорта.

3. *Инструкция о порядке обслуживания и организации движения на ПНП-гейте*. **Новый перевозчик**, как владелец ПНП-гейта, разрабатывает инструкцию, в которой описывается порядок технологического взаимодействия между ПНП-гейтом и железнодорожной инфраструктурой общего пользования.

4. *Договор на оказание услуг по регулярным перевозкам пассажиров и багажа на маршрутной сети города* между Министерством транспорта субъекта РФ (уполномоченной организацией) и оператором городской трамвайной сети.

5. *Договор на оказание услуг по перевозке пассажиров в пригородном и городском сообщении* между Министерством транспорта субъекта РФ (уполномоченной организацией) и **новым перевозчиком**. Заключается для выполнения перевозок по социально-значимым маршрутам с компенсацией выпадающих доходов и предоставлением скидки 99 % на стоимость использования железнодорожной инфраструктуры общего пользования.

**Сценарий № 2.** Технология организации движения «трамваев-поездов» по маршруту, затрагивающему железнодорожную инфраструктуру общего пользования, а также инфраструктуры необщего пользования и городской трамвайной сети, в дополнение к соглашениям 1, 2, 3, 5 должна регламентироваться следующими соглашениями (см. рисунок 4.2).

6. *Договор на эксплуатацию пути необщего пользования* между владельцем ПНП и **новым перевозчиком**, по которому **новому перевозчику** предоставляется право доступа на инфраструктуру ПНП для организации пассажирского движения.

7. *Инструкцию по обслуживанию и организации движения на ПНП*, в которой регламентируется порядок технологического взаимодействия между ПНП и железнодорожной инфраструктурой общего пользования. В уже существующую инструкцию вносятся корректировки о порядке движения «трамваев-поездов».

**Сценарий № 3.** Маршрут «трамвая-поезда» проходит по городской трамвайной инфраструктуре и путям необщего пользования, не затрагивая инфраструктуру общего пользования. Это означает, что ПНП-гейт примыкает напрямую к ПНП стороннего владельца. Потребуется, помимо документов под номерами 2, 4, 5, 6, разработать:

8. *Инструкцию о порядке обслуживания и организации движения* на ПНП и ПНП-гейте, регламентирующую порядок технологического взаимодействия между ПНП и ПНП-гейтом.

Обобщенная схема соглашений между участниками перевозочного процесса при организации движения пригородно-городских поездов с применением бимодальной транспортной системы, пригородных поездов и трамваев включает (см. рисунок 4.2), в дополнение к описанным выше, следующие соглашения:

9. *Договор на оказание услуг инфраструктуры* между владельцем инфраструктуры общего пользования и ППК. Заключается для организации движения пригородных поездов по инфраструктуре общего пользования.

10. *Договор на эксплуатацию пути необщего пользования* между владельцем ПНП и ППК. Заключается для организации движения пригородных поездов по инфраструктуре необщего пользования.

11. *Договор на оказание услуг по перевозке пассажиров и багажа железнодорожным транспортом в пригородном сообщении.* При необходимости заключается между Министерством транспорта субъекта РФ (уполномоченной организацией) и ППК.

Представим описанную выше схему регламентации технологии взаимодействия субъектов транспортной отрасли для организации движения поездов по технологии «трамвай-поезд» в виде матрицы заключаемых договоров и соглашений (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Матрица договоров и соглашений для организации движения поездов по технологии «трамвай-поезд» при появлении нового перевозчика

Исполнитель Заказчик	ППК	Новый перевозчик («трамвай-поезд»)	Городской трамвай	ПОП	ПНП	Субъект РФ
ППК	X			II	III	
Новый перевозчик («трамвай-поезд»)		X	V	II, IV	III, IV	
Городской трамвай			X			
ПОП				X		
ПНП				IV	X	
Субъект РФ	I	I	I			X

Виды договоров:

I — Заказ Субъекта РФ на перевозку пассажиров.

II — Договор о предоставлении услуг инфраструктуры общего пользования.

III — Договор на эксплуатацию пути необщего пользования.

IV — Инструкция о порядке обслуживания и организации движения на ПНП.

V — Договор на предоставление услуг трамвайной инфраструктуры.

Выше рассмотрена наиболее полная схема взаимодействия между транспортными предприятиями. Организация взаимодействия значительно упрощается в случае принятия на себя одним из существующих перевозчиков функций организации движения по технологии «трамвай-поезд».

Предлагаемые организационно-правовые механизмы функционирования бимодальной системы «трамвай-поезд» предусматривают типовые сценарии, которые — с поправкой на местные условия — могут быть настроены на любые структуры взаимодействующих предприятий в условиях разных транспортных узлов и агломераций.

## **4.2 Методические принципы определения технико-экономической эффективности применения транспортных систем в пригородно-городском сообщении**

Технико-экономическое обоснование создания системы «трамвай-поезд» в конкретной агломерации должно опираться на сравнение вариантов организации маршрутной сети и определение того, какой из них предпочтительнее: использование специальных «трамваев-поездов» либо развитие уже действующих способов перевозок. Финансовый результат системы не должен быть отрицателен. При этом входящие в расчет зависимости и их численное выражение будут варьироваться для каждого владельца инфраструктуры и перевозчика.

Расчету подлежат операционные расходы и инвестиции, связанные с объектами инфраструктуры и подвижным составом; операционные расходы, связанные с простоями, обработкой и продвижением транспортных потоков; взаимные платежи участников перевозочного процесса.

Бимодальная транспортная система позволяет получить экономический эффект:

для перевозчика — за счет меньшей стоимости транспортного средства (легкий подвижной состав), снижения затрат на его обслуживание и эксплуатацию (меньшая энергоёмкость);

для владельцев транспортных инфраструктур — за счет общего уменьшения неблагоприятного воздействия на путевое хозяйство; применения нормативов не железнодорожного, а легкорельсового транспорта при строительстве транспортной инфраструктуры и дальнейшей её эксплуатации; уменьшения интервалов движения и др.

Цели для перевозчика и владельца инфраструктуры идентичны — это максимизация удельного финансового результата (в социально значимом проекте — минимизация отрицательного финансового результата, приходящегося на 1 пассажиро-километр):

$$\frac{\Sigma D - \Sigma R}{\Sigma Al} \rightarrow \max, \quad (4.1)$$

где  $\Sigma R$  — инвестиционные затраты и прямые производственные расходы по перевозочной деятельности;

$\Sigma D$  — доходные поступления, обеспечивающие безубыточность перевозок;

$\Sigma Al$  — пассажирооборот транспортной системы.

При этом, сумма  $\Sigma R$  и сумма  $\Sigma D$  в рамках единой транспортной системы различны для каждого участника транспортного обслуживания. Указанные параметры расходов и доходов транспортных предприятий рассматриваются подробнее в разделе 4.5. На выбор решения оказывают влияние ограничения, диктуемые заданными объемами работы и требуемым качеством транспортного обслуживания населения.

Внедрение технологии «трамвай-поезд» эффективно, если технические решения и технологические процессы обеспечивают экономичность и более высокое качество транспортного обслуживания по сравнению с традиционными технологиями пассажирских перевозок. При разработке технико-экономического обоснования следует базироваться на представленной структуре финансового результата (формула 4.1), которая, учитывая расходы и доходы отдельных транспортных предприятий, позволяет рассчитать наиболее эффективные параметры и сферы применения технологии «трамвай-поезд».

### **4.3 Влияние применяемой технологии организации пассажирского сообщения на показатели спроса на транспортную услугу**

Преимущества системы «трамвай-поезд», описанные в разделах 1.5 и 1.6, следует дополнить оценкой влияния фактора времени на перспективный пассажиропоток в зависимости от возможных вариантов маршрута следования пассажиров при организации бимодальной транспортной системы.

Оценить распределение перспективного пассажиропотока возможно сравнением вариантов предлагаемых маршрутов следования для пассажиров.

Для рассмотрения предлагается схема рельсового транспорта города «Н».

Так как пункты отправления и прибытия пассажиров по железной дороге (вокзалы, остановочные пункты, трамвайно-железнодорожные соединительные линии) не являются пунктами зарождения и погашения пассажиропотоков, для оценки перспективного пассажиропотока в городе «Н» следует учесть время перемещения пассажира по городу до терминала железной дороги, время, затрачиваемое внутри терминала железной дороги (или на объекте, его заменяющем), и время следования от терминала железной дороги до места назначения с учетом привлекательности того или иного маршрута.

Вариант 1 — существующее положение (рисунок 4.3).

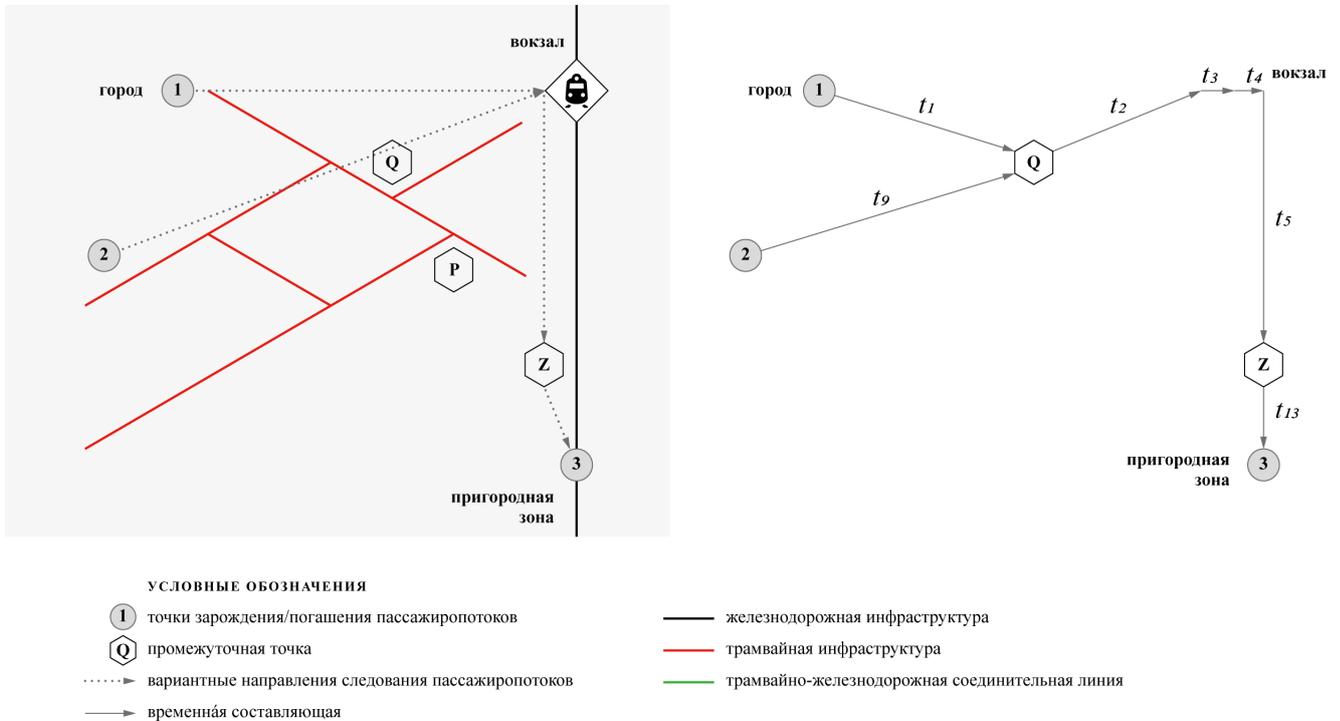


Рисунок 4.3 — Схема затрат времени пассажира на поездку от точек зарождения пассажиропотока до пригородной зоны (вариант 1)<sup>9</sup>

В первом случае (**вариант 1** — существующее положение) — маршрут пассажира проложен с использованием городского трамвая, с пересадкой между трамваем и железнодорожным транспортом на вокзале и с использованием обычного электропоезда для поездки в пригородную зону (формула 4.2). Отсутствуют альтернативные точки пересадки на железнодорожный транспорт. При прочих равных

<sup>9</sup> Описания составляющих  $t_x$  приведены после формулы (4.4).

условиях концентрация прибытия и отправления пассажиров на один терминал приводит к снижению составляющей  $t_4$  внутри общего времени поездки пассажира. Но это снижение произойдет, если рассматриваемый терминал может принять и обработать потребные размеры движения пассажирских поездов в наиболее благоприятные для клиента периоды суток. Расположение железнодорожного терминала относительно центра города (пунктов зарождения пассажиропотока) влияет на величину составляющих  $t_2$  и  $t_5$ .

Для сокращения времени в пути пассажиров, использующих рельсовый транспорт, из центра города в пригородную зону (и обратно) возможно организовать движение поездов по принципу «трамвай-поезд». Необходимо рационально выбрать место, где построить трамвайно-железнодорожную соединительную линию (гейт). Маршрут «трамвая-поезда» прокладывается через основные точки зарождения и погашения пассажиропотоков, недоступные для обслуживания железнодорожным транспортом. Таким образом, для пассажиров уменьшается составляющая  $t_1$  и исключаются составляющие  $t_3$  и  $t_4$ , так как пассажир уже произвел посадку в транспортное средство.

Для сравнения приводятся следующие варианты соединения трамвайной и железнодорожной инфраструктуры для организации более короткой (по временным затратам) связи точек зарождения/погашения пассажиропотока №1 и 2 (центр города) с точкой №3 (пригородная зона).

**Вариант 2**, «перспективный» — маршрут «трамвая-поезда» проходит через вокзал (рисунок 4.4).

Во втором случае (построена трамвайно-железнодорожная соединительная линия в центральном узле — центральный гейт). На рисунке 4.4 приведена схема движения, где у пассажира появляется альтернатива первому варианту. Теперь, на этапе посадки в городской транспорт, пассажир получает возможность воспользоваться новым транспортным средством («трамваем-поездом»), который провезет его через центральный гейт по маршруту от той же трамвайной остановки (точки посадки на трамвай) до точки высадки из электропоезда.

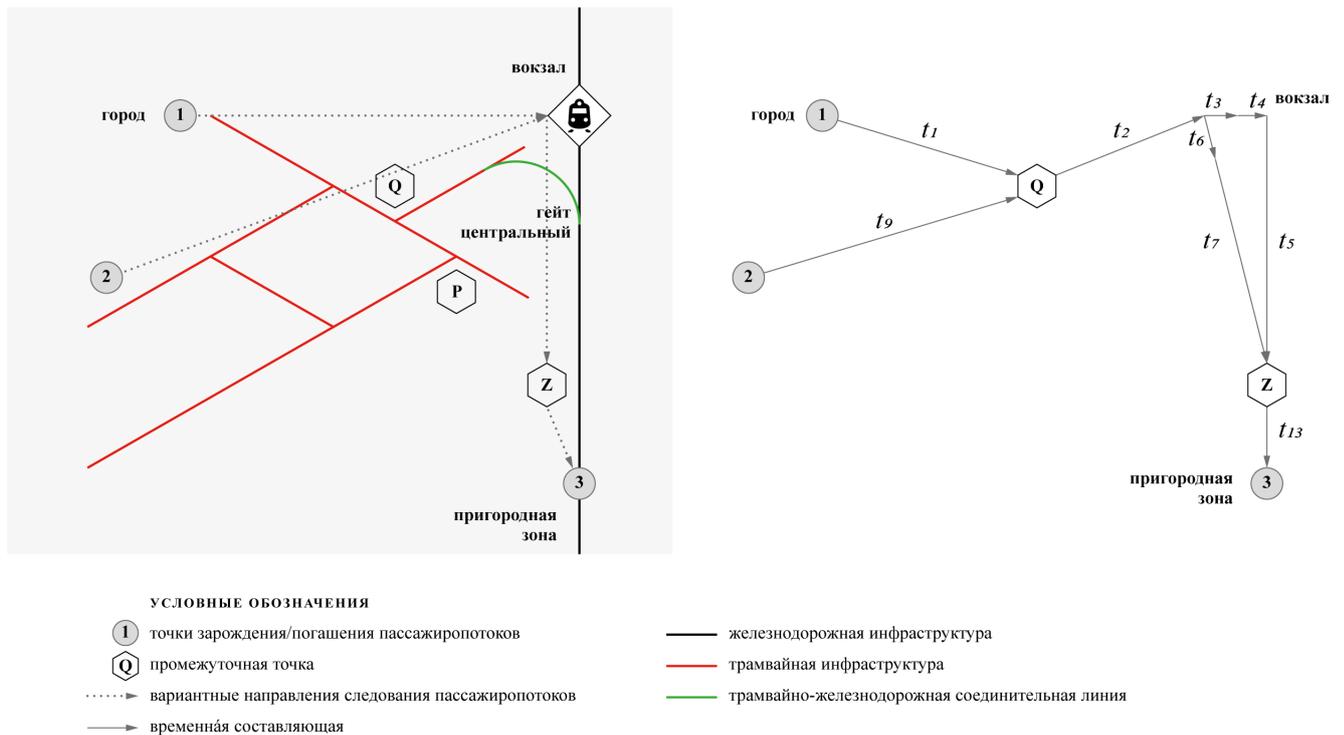


Рисунок 4.4 — Схема затрат времени пассажира на движение из центра города в пригородную зону по разным вариантам маршрутов при строительстве центрального гейта (вариант 2)

На новом маршруте пассажир минует вокзальный терминал, в связи с чем отсутствуют составляющие временных затрат  $t_3$  и  $t_4$ . Вместо них следует учесть составляющую  $t_6$  (формула 4.3).

Кроме того, сохраняется возможность проехать на городском трамвае до вокзала и затем пересесть на обычный электропоезд.

**Вариант 3:** построена трамвайно-железнодорожная соединительная линия в периферийной узле — периферийный гейт (рисунок 4.5).

Рассмотрим еще одну альтернативу первому варианту. При строительстве периферийного гейта (рисунок 4.5) следует сравнить суммарные затраты времени пассажиров (формула 4.4) на следование из центра в пригородную зону по традиционному маршруту (через вокзал) и через периферийный гейт (составляющая  $t_{12}$ ).

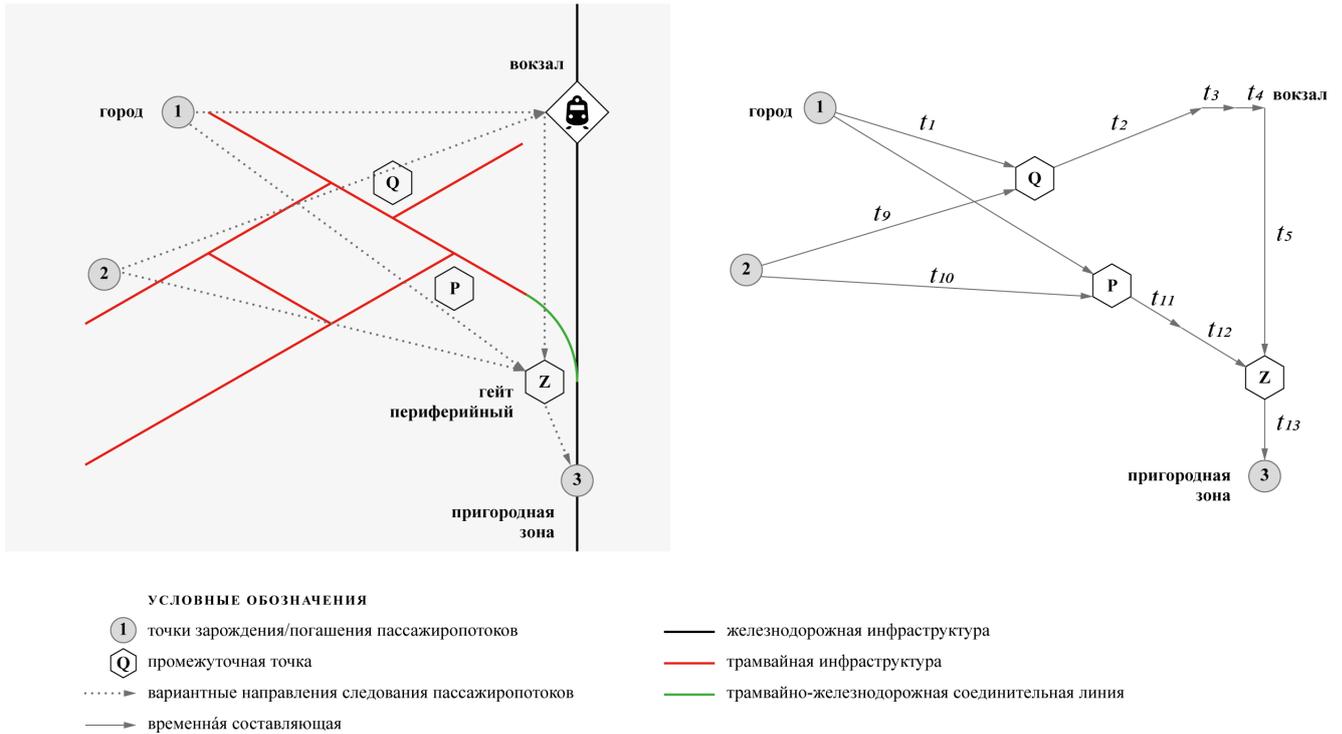


Рисунок 4.5 — Схема затрат времени пассажира на движение из центра города в пригородную зону по разным вариантам маршрутов при строительстве периферийного гейта (вариант 3)

$$\begin{cases} T_{1-3}^1 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_{13} \\ T_{2-3}^2 = t_9 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_{13} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\begin{cases} T_{1-3}^1 \\ T_{2-3}^2 \\ T_{1-3}^3 = t_1 + t_2 + t_6 + t_7 + t_{13} \\ T_{2-3}^4 = t_9 + t_2 + t_6 + t_7 + t_{13} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} T_{1-3}^1 \\ T_{2-3}^2 \\ T_{1-3}^5 = t_8 + t_{11} + t_{12} + t_{13} \\ T_{2-3}^6 = t_{10} + t_{11} + t_{12} + t_{13} \end{cases} \quad (4.4)$$

где  $T_{ij}^r$  — суммарные затраты времени пассажира на передвижение из пункта  $i$  в пункт  $j$  по маршрут  $r$ , мин.;

$t_1; t_9$  — затраты времени пассажира на следование от точки начала поездки № 1 и №2 до промежуточной точки Q соответственно (включая проход до остановки городского транспорта, ожидание транспортного средства), мин.;

$t_2$  — затраты времени пассажира на следование от промежуточной точки **Q** до места высадки из городского транспорта или центрального гейта (время одинаково, так как центральный гейт начинается от трамвайного разворотного кольца, расположенного на привокзальной площади), мин.;

$t_3$  — затраты времени пассажира на терминальные операции (проход от места высадки из городского транспорта до места посадки в электропоезд, приобретение билета, прохождение турникетов и процедур транспортной безопасности), мин.;

$t_4$  — затраты времени пассажира на ожидание электропоезда потребного направления, мин.;

$t_5$  — затраты времени пассажира на следование на электропоезде от терминала железнодорожного транспорта до промежуточной точки **Z**, мин.;

$t_6$  — затраты времени пассажира на следование на «трамвае-поезде» по центральному гейту, мин.;

$t_7$  — затраты времени пассажира на следование на «трамвае-поезде» по железной дороге от центрального гейта до промежуточной точки **Z**, мин.;

$t_8; t_{10}$  — затраты времени пассажира на следование от точки начала поездки № 1 и 2 до промежуточной точки **P** соответственно (включая проход до остановки городского транспорта, ожидание транспортного средства), мин.;

$t_{11}$  — затраты времени пассажира на следование на «трамвае-поезде» от промежуточной точки **Q** до периферийного гейта, мин.;

$t_{12}$  — затраты времени пассажира на следование на «трамвае-поезде» по центральному гейту до промежуточной точки **Z**, мин.;

$t_{13}$  — затраты времени пассажира на следование на электропоезде или «трамвае-поезде» от промежуточной точки **Z** до станции назначения пассажира, мин.

Капитальные и эксплуатационные затраты следует определять отдельно для каждого рассматриваемого случая.

Предпочтительность передвижения из пункта  $i$  в пункт  $j$  по маршруту  $r$  для пассажиров можно математически описать как функцию от трёх составляющих:

1) комплексного значения комфорта поездки пассажира  $K_{ij}^r$ , которое учитывает: высоту уровня пола транспорта и посадочных платформ, количество пересадок между видами транспорта и транспортными средствами одного вида транспорта, вибрационную и шумовую нагрузку, количество лестниц на пути пассажира при пересадках и на подходах к остановочным пунктам, освещенность улиц и пересадок в ночное время, потребность в прохождении процедур транспортной безопасности, удобство и количество возможных вариантов оплаты проезда [48, 119, 120];

2) стоимости проезда пассажира по маршруту  $r$  —  $E_{ij}^r$ , руб.;

3) затрат времени на поездку по маршруту  $u$ , выраженных значением  $T_{ij}^r$ , мин.

$$A_{ij}^r = f(K_{ij}^r, E_{ij}^r, T_{ij}^r). \quad (4.5)$$

Значение  $T_{ij}^r$  будет для каждого далее рассмотренного случая разным.

С учетом представленных выше факторов следует рационально выбирать место строительства трамвайно-железнодорожной соединительной линии для организации пригородно-городского движения «трамваев-поездов».

#### 4.4 Сопоставление натуральных технических показателей пригородно-городских транспортных систем

Для уточнения преимуществ использования «трамваев-поездов» в городских агломерациях следует проанализировать и на основе имеющейся информации сопоставить ряд натуральных технических показателей пригородно-городских транспортных систем России: обычных пригородных поездов и «трамваев-поездов».

##### *Размеры движения пригородных поездов и «трамваев-поездов»*

Расчет размеров движения пригородно-городских поездов на участке обращения между головной и зонной станцией следует производить исходя из максимальной плотности прогнозируемого пассажиропотока  $A_{баз}$  в час «пик». При базовом

варианте технологии, когда на рассматриваемом участке обращаются только стандартные электропоезда с пассажироместимостью  $S_{\text{эп}}$ , их потребные размеры движения вычисляются по формуле:

$$n_{\text{эп}}^{\text{баз}} = A_{\text{баз}}/S_{\text{эп}}. \quad (4.6)$$

Рассмотрим далее вариант, когда в транспортную систему города внедрён новый продукт — «трамвай-поезд». При вводе нового транспортного продукта прогнозируется увеличение пассажиропотока на величину  $A_{\Delta}$ . В этом случае максимальная густота пассажиропотоке станет равна:

$$A_{\text{общ}} = A_{\text{баз}} + A_{\Delta}. \quad (4.7)$$

Для определения размеров движения «трамваев-поездов» следует определить величину пассажиропотока по признаку наличия у пассажира потребности в продолжении поездки на общественном транспорте от вокзала (либо от места примыкания к трамвайной сети) до конечной точки своего пути по маршруту «трамвая-поезда». Для этого нужно разложить значения  $A_{\text{баз}}$  и  $A_{\Delta}$  на составляющие по признаку потребности пассажира продолжить путь от вокзала (либо от места примыкания к трамвайной сети) по маршруту «трамвая-поезда» или пассажира, чья точка назначения находится в пешей доступности от вокзала (места примыкания) или на других маршрутах общественного транспорта:

$$A_{\text{баз}} = A_{\text{баз}}^{\text{пер}} + A_{\text{баз}}^{\text{вк}}; \quad (4.8)$$

$$A_{\Delta} = A_{\Delta}^{\text{пер}} + A_{\Delta}^{\text{вк}}. \quad (4.9)$$

Затем необходимо определить суммарное значение  $A_{\text{общ}}^{\text{пер}}$  — количество пассажиров, имеющих нужду в пересадке, избежать которой позволит применение «трамвая-поезда». Полученное значение нужно разделить на вместимость «трамвая-поезда»  $S_{\text{тп}}$ , результат  $n_{\text{тп}}^{\text{пик}}$  — округлить в большую сторону:

$$A_{\text{общ}}^{\text{пер}} = A_{\text{баз}}^{\text{пер}} + A_{\Delta}^{\text{пер}}; \quad (4.10)$$

$$n_{\text{тп}} = \left\lceil \frac{A_{\text{общ}}^{\text{пер}}}{S_{\text{тп}}} \right\rceil; \quad (4.11)$$

$$A_{\text{общ}}^{\text{вк}} = A_{\text{баз}}^{\text{вк}} + A_{\Delta}^{\text{вк}}. \quad (4.12)$$

Таким образом, пассажироместимость «трамваев-поездов» в час «пик» на участке максимальной густоты будет составлять:

$$A_{\text{ТП}} = S_{\text{ТП}} n_{\text{ТП}}. \quad (4.13)$$

В рассматриваемом условно-расчетном случае у пассажиров есть возможность доехать на «трамвае-поезде» до вокзала. Поэтому для определения необходимых размеров движения обычных электропоездов следует из общего прогнозного пассажиропотока на рассматриваемом участке вычесть пассажиропоток, который осваивается «трамваями-поездами» («трамвай-поезд» привлекателен для пассажиров за счет универсальности). Полученное значение делится на вместимость электропоезда и округляется в большую сторону:

$$n_{\text{ЭП}} = \left\lceil \frac{(A_{\text{общ}} - A_{\text{ТП}})}{S_{\text{ЭП}}} \right\rceil. \quad (4.14)$$

Графическая интерпретация изложенного выше порядка расчета размеров движения «трамваев-поездов» и электропоездов для суточного периода представлена на рисунке 4.6.

Следует отметить, что общие размеры движения электропоездов и «трамваев-поездов» не должны превышать наличную пропускную способность участка (см. раздел 3.1.2):

$$n_{\text{ЭП}} + n_{\text{ТП}} < n_{\text{нал}}^{\text{общ}}, \quad (4.15)$$

В условиях тактового движения «трамваев-поездов» с переменным тактом по часам суток (с выделением двух отрезков времени интенсивного движения, в остальное время — в два раза реже, чем в «пиковые» часы) необходимые размеры движения поездов для освоения пассажиропотока за сутки будут вычисляться по формуле:

$$n_{\text{ТП}}^{\text{пер.такт}} = h_{\text{ут}}^{\text{пик}} n_{\text{ТП}}^{\text{пик}} + h_{\text{вч}}^{\text{пик}} n_{\text{ТП}}^{\text{пик}} + K_{\text{такт}} (h^{\text{дв}} - h_{\text{ут}}^{\text{пик}} - h_{\text{вч}}^{\text{пик}}) n_{\text{ТП}}^{\text{пик}}, \quad (4.16)$$

где  $n_{\text{ТП}}$  — размеры движения «трамваев-поездов», пар поездов/сутки;

$h_{\text{ут}}^{\text{пик}}$  — длительность утреннего периода интенсивного отправления «трамваев-поездов» (утреннего часа «пик»), ч.;

$h_{\text{вч}}^{\text{пик}}$  — длительность вечернего периода интенсивного отправления «трамваев-поездов» (утреннего часа «пик»), ч.;

$n_{\text{ТП}}^{\text{пик}}$  — размеры движения «трамваев-поездов» в час «пик», пар поездов/ч.;

$h^{\text{ДВ}}$  — длительность работы маршрута «трамвай-поезда» в течение суток, ч.;

$K_{\text{такт}}$  — коэффициент, учитывающий снижение интенсивности движения «трамваев-поездов» вне часа «пик», принимается по таблице 4.2.

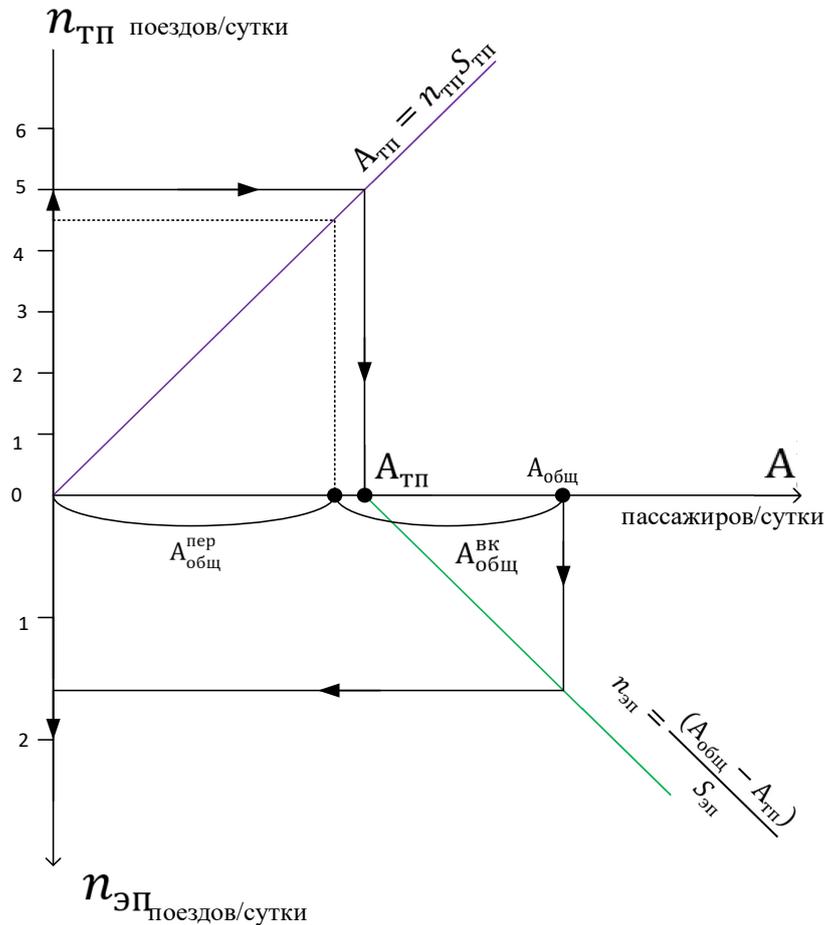


Рисунок 4.6 — Графическая интерпретация расчета размеров движения «трамваев-поездов» и электропоездов на участке совмещенного движения

Таблица 4.2 — Значения коэффициента снижения интенсивности движения поездов вне часа «пик» относительно часа «пик»

Поездов в час «пик» $n_{\text{ТП}}^{\text{пик}}$	Поездов вне часа «пик» $n_{\text{ТП}}^{\text{внпик}}$	$K_{\text{такт}}$
2	1	0,50
3	1	0,33
3	2	0,67
4	1	0,25
4	2	0,50
4	3	0,75
5	1	0,20

Продолжение таблицы 4.2

5	2	0,40
5	3	0,60
5	4	0,80

В иных случаях расчет коэффициента  $K_{\text{такт}}$  возможно произвести по формуле:

$$K_{\text{такт}} = \frac{n_{\text{ТП}}^{\text{пик}}}{n_{\text{ТП}}^{\text{внепик}}}, \quad (4.17)$$

где  $n_{\text{ТП}}^{\text{внепик}}$  — размеры движения «трамваев-поездов» вне часа «пик». Определяется исходя из прогнозируемого пассажиропотока во внепиковое время, пар поездов/ч.

### *Парк подвижного состава*

Потребный парк подвижного состава  $M_{\text{ТП}}$  (в том числе моторвагонного подвижного состава  $M_{\text{МВПС}}$ , трамваев  $M_{\text{ТР}}$ , бимодального подвижного состава («трамваев-поездов»)) определяется как сумма:

$$M_{\text{потр}} = M + M_{\text{рез}} + M_{\text{неиспр}}, \quad (4.18)$$

где  $M$  — эксплуатируемый парк подвижного состава для обслуживания маршрутов, ед.;

$M_{\text{рез}}$  — количество подвижного состава, находящегося в резерве. Устанавливается нормативно для каждого типа подвижного состава, ед.;

$M_{\text{неиспр}}$  — количество подвижного состава, находящегося в неисправном состоянии в депо, ед. Устанавливается нормативно [121] для данного типа подвижного состава.

Эксплуатируемый парк подвижного состава определяется графически по временному срезу нормативного графика оборота на момент наиболее интенсивного движения поездов, т.е. — в часы «пик» пригородно-городского движения, либо аналитически.

Оборот подвижного состава в часы «пик» на маршруте «А — Б» равен:

$$\theta_{\text{пик}} = (t_{\text{техн}}^{\text{А}} + t_{\text{ож}}^{\text{А'}}) + t_{\text{след}}^{\text{А-Б}} + (t_{\text{техн}}^{\text{Б}} + t_{\text{ож}}^{\text{Б'}}) + t_{\text{след}}^{\text{Б-А}}, \quad (4.19)$$

где  $t_{\text{техн}}^A, t_{\text{техн}}^B$  — минимальное потребное время технической стоянки, стоянки для посадки пассажиров на станциях (конечных пунктах) начала и конца маршрута «А» и «Б», ч.;

$t_{\text{ож}}^{A'}, t_{\text{ож}}^{B'}$  — время ожидания нитки отправления поезда со станции (конечного пункта), которое зависит от интервала тактового графика, освобождения маршрута движения, увязки составов разных маршрутов по конечному пункту в общий оборот в часы «пик», ч.;

$t_{\text{след}}^{A-B}$  — время следования поезда от станции (конечного пункта) «А» до пункта оборота «Б», ч.;

$t_{\text{след}}^{B-A}$  — время следования поезда от пункта «Б» до конечного пункта «А», ч.

Оборот подвижного состава в периоды суток вне часа «пик» на маршруте «А — Б» равен:

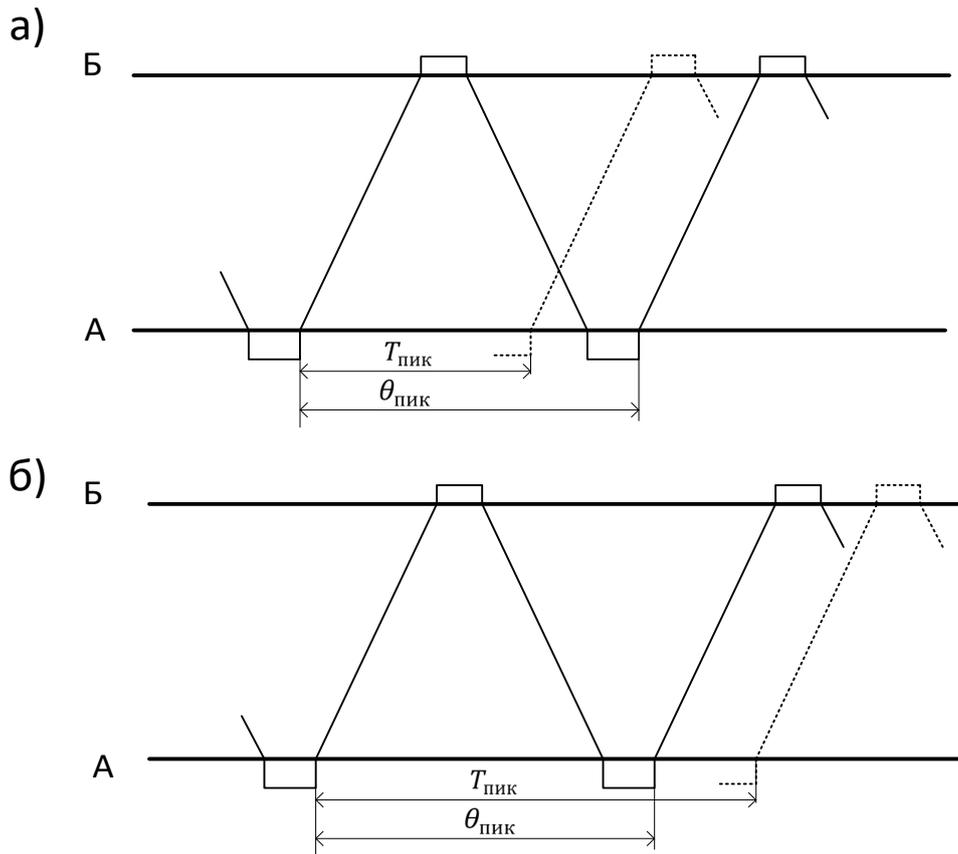
$$\theta_{\text{неп}} = \theta_{\text{пик}} + (t_{\text{ож}}^{A''} - t_{\text{ож}}^{A'}) + (t_{\text{ож}}^{B''} - t_{\text{ож}}^{B'}) \quad (4.20)$$

где,  $t_{\text{ож}}^{A''}, t_{\text{ож}}^{B''}$  — время ожидания нитки отправления поезда со станции (конечного пункта), которое зависит от интервала тактового графика, освобождения маршрута движения, увязки составов разных маршрутов по конечному пункту в периоды суток вне часа «пик», ч.;

Средневзвешенный в течение суток оборот «трамваев-поездов» (электропоездов) на маршруте «А — Б» равен:

$$\theta = \frac{\theta_{\text{пик}} n_{\text{ТП(ЭП)}}^{\text{пик}} + \theta_{\text{неп}} (n_{\text{ТП(ЭП)}} - n_{\text{ТП(ЭП)}}^{\text{пик}})}{n_{\text{ТП(ЭП)}}} \quad (4.21)$$

Определение потребного количества подвижного состава для обслуживания маршрутов следует производить в часы «пик» пригородно-городского движения. На рисунке 4.7 представлена схема оборота подвижного состава при длительности оборота больше периода интенсивного отправления поездов (см. рисунок 4.7, а) и при длительности оборота меньше периода интенсивного отправления поездов (см. рисунок 4.7, б).



- а) длительность оборота больше периода интенсивного отправления поездов;  
 б) длительность оборота меньше периода интенсивного отправления поездов.

Рисунок 4.7 — Схема оборота подвижного состава

Согласно данным рисунка, если

$$\theta_{\text{пик}} \leq T_{\text{пик}} , \quad (4.22)$$

то

$$M = [n_{\text{пик}} \theta_{\text{пик}}]. \quad (4.23)$$

Если

$$\theta_{\text{пик}} > T_{\text{пик}} , \quad (4.24)$$

то

$$M = n_{\text{пик}} T_{\text{пик}} + n_{\text{посл}} (\theta_{\text{пик}} - T_{\text{пик}}) , \quad (4.25)$$

где  $n_{\text{пик}}$  — часовая интенсивность отправления поездов с конечных пунктов в период интенсивного движения (час «пик»), пар поездов/ч;

$n_{\text{посл}}$  — часовая интенсивность отправления поездов в период суток, следующий за интенсивным, пар поездов/ч;

$T_{\text{пик}}$  — длительность периода интенсивного отправления поездов (час «пик»), ч.

### Явочный контингент локомотивных бригад (водителей)

Явочный контингент локомотивных бригад вычисляется по формуле:

$$B_{\text{яв}} = \frac{\sum Mh_{\text{сут}} * j}{C}, \text{ лок. бригад,} \quad (4.26)$$

где  $\sum Mh_{\text{сут}}$  — среднесуточные бригадо-часы работы локомотивных бригад.

$$\sum Mh_{\text{сут}} = n_{\text{яв}} (T_{\text{прием}} + T_{\text{раб}} + T_{\text{сд}}), \text{ лок. бригад,} \quad (4.27)$$

где  $n_{\text{яв}}$  — число поездок (явок локомотивных бригад) в средние сутки;

$j$  — среднее число дней в месяце, сут;

$C$  — среднемесячная норма рабочих часов по производственному календарю, ч.

$T_{\text{прием}}, T_{\text{раб}}, T_{\text{сд}}$  — время, затрачиваемое локомотивной бригадой на прием смены, управление подвижным составом, сдачу смены соответственно, ч. (см. рисунок 4.8).

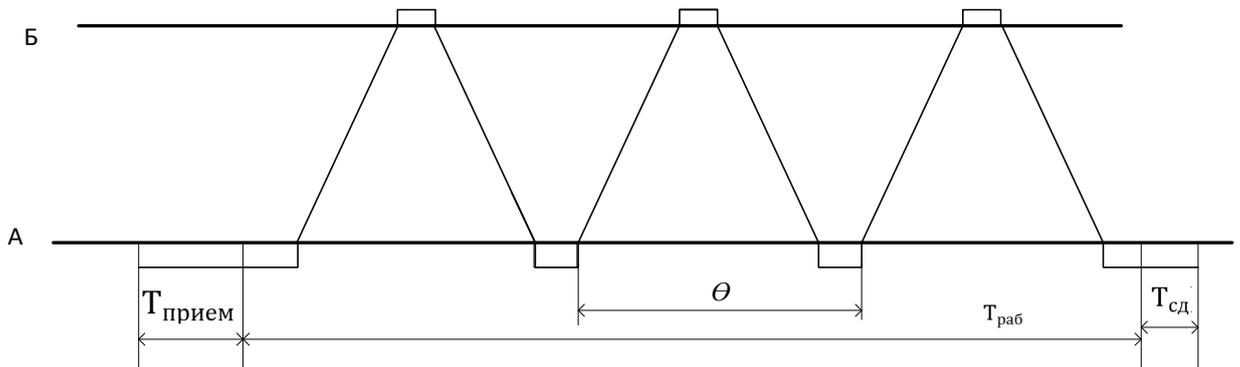


Рисунок 4.8 — Схема работы локомотивной бригады

$$n_{\text{яв}} = \frac{n_{\text{тп(эп)}}}{n_{\text{м}}}, \text{ лок. бригад,} \quad (4.28)$$

где  $n_{\text{м}}$  — число пар поездов, обслуживаемых одной локомотивной бригадой, пар поездов/сут.

$$n_{\text{м}} = \left\lfloor \frac{T_{\text{раб}}}{\theta} \right\rfloor, \text{ пар поездов.} \quad (4.29)$$

### ***Расход энергоресурсов на тягу поездов и собственные нужды подвижного состава***

Количество затрачиваемых энергоресурсов на организацию движения поездов зависит от нескольких составляющих: тип подвижного состава, размеры движения поездов, маршрутная скорость движения, режим остановок, продольный профиль участка обращения.

Среднесуточный расход энергоресурсов, кВт-ч/сут, определяется:

для электропоездов

$$W_{\text{Эп}} = 2 \sum_i n_i^{\text{Эп}} L_i^{\text{Эп}} Q_{\text{бр } i}^{\text{Эп}} \frac{a_{\text{дв } i}^{\text{Эп}}}{10000} + 2 \sum_i n_i^{\text{Эп}} k_{\text{ост } i}^{\text{Эп}} a_{\text{ост } i}^{\text{Эп}} + \sum_i n_i^{\text{Эп}} (\theta_i^{\text{Эп}} - \frac{2L_i^{\text{Эп}}}{V_{\text{М } i}^{\text{Эп}}}) a_{\text{сн } i}^{\text{Эп}} ; \quad (4.30)$$

для «трамваев-поездов» (трамваев)

$$W_{\text{Тп}} = 2 \sum_i n_i^{\text{Тп}} L_i^{\text{Тп}} Q_{\text{бр } i}^{\text{Тп}} \frac{a_{\text{дв } i}^{\text{Тп}}}{10000} + 2 \sum_i n_i^{\text{Тп}} k_{\text{ост } i}^{\text{Тп}} a_{\text{ост } i}^{\text{Тп}} + \sum_i n_i^{\text{Тп}} (\theta_i^{\text{Тп}} - \frac{2L_i^{\text{Тп}}}{V_{\text{М } i}^{\text{Тп}}}) a_{\text{сн } i}^{\text{Тп}} ; \quad (4.31)$$

где  $i$  – маршрут следования;

$n_i^{\text{Эп}}, n_i^{\text{Тп}}$  – размеры движения соответственно электропоездов и «трамваев-поездов» (трамваев) на маршруте  $i$ , пар поездов/сут;

$L_i^{\text{Эп}}, L_i^{\text{Тп}}$  – расстояние следования соответственно электропоездов и «трамваев-поездов» (трамваев) на маршруте  $i$ , км;

$Q_{\text{бр } i}^{\text{Эп}}, Q_{\text{бр } i}^{\text{Тп}}$  – расчетная масса брутто соответственно электропоезда и «трамвая-поезда» (трамвая) на маршруте  $i$ , т;

$a_{\text{дв } i}^{\text{Эп}}, a_{\text{дв } i}^{\text{Тп}}$  – норма удельного расхода электроэнергии на тягу соответственно электропоезда и «трамвая-поезда» (трамвая) на 10000 тонно-км брутто на маршруте  $i$  (без учета затрат электроэнергии на остановках поездов), кВт-ч/тонно-км;

$k_{\text{ост } i}^{\text{Эп}}, k_{\text{ост } i}^{\text{Тп}}$  – количество остановок соответственно электропоезда и «трамвая-поезда» (трамвая) на маршруте  $i$ ;

$a_{\text{дв } i}^{\text{Эп}}, a_{\text{дв } i}^{\text{Тп}}$  – норма удельного расхода электроэнергии на одну остановку соответственно электропоезда и «трамвая-поезда», кВт-ч;

$\theta_i^{\text{Эп}}, \theta_i^{\text{Тп}}$  – средневзвешенная длительность оборота соответственно электропоезда и «трамвая-поезда» (трамвая) на маршруте  $i$ , ч;

$V_{\text{М } i}^{\text{Эп}}, V_{\text{М } i}^{\text{Тп}}$  – маршрутная скорость движения соответственно электропоезда и «трамвая-поезда» (трамвая) на маршруте  $i$ , км/ч;

$a_{\text{CH}}^{\text{ЭП}}, a_{\text{CH}}^{\text{ТП}}$  – норма удельного расхода электроэнергии на собственные нужды соответственно электропоезда и «трамвая-поезда» (трамвая) при стоянках на конечных станциях маршрута  $i$ , кВт-ч.

В качестве расчетного (как наиболее подходящий отечественный аналог «трамвая-поезда» по пассажировместимости) принят вагон модели 71-934 «Лев». Технологическая норма расхода электроэнергии на электротягу трамвайных вагонов 71-934 «Лев» составляет  $V_{30} = 65 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{Т} \cdot \text{км}$  при базовой средней эксплуатационной скорости 15 км/ч<sup>10</sup>. На основании методики [122] нормирован расход электроэнергии на тягу и вспомогательные нужды трамвайного вагона при скоростях от 15 до 45 км/ч, эквивалентном уклоне 2 ‰ и с учетом работы вспомогательных потребителей, при весе вагона с пассажирами 62 т. Результаты нормирования приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Норма расхода электроэнергии на тягу и вспомогательные устройства при средней эксплуатационной скорости на маршруте трамвая («трамвай-поезда») в диапазоне от 15 до 45 км/ч.

Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	Технологическая норма расхода электроэнергии на электротягу трамвайных вагонов кВт – ч / 1000 ткм	Технологическая норма расхода электроэнергии на работу вспомогательных устройств вагона кВт – ч / 1000 ткм	Суммарная норма расхода электроэнергии на пробег 1 км кВт – ч / км
15	67,7	0,3	4,21
20	94,6	0,23	5,88
25	121,7	0,18	7,56
30	148,7	0,15	9,23
35	175,8	0,13	10,91
40	202,8	0,11	12,58
45	229,8	0,10	14,26

Технологические нормы расхода электроэнергии на тягу электропоездов приняты по Методическим рекомендациям [123] при составности электропоезда 10 вагонов (таблицы 4.4 и 4.5).

<sup>10</sup> базовая средняя эксплуатационная скорость — для трамвая 15 км/ч, эквивалентный уклон равен нулю, температура окружающего воздуха +5 °С, при номинальной нагрузке (5 чел/м<sup>2</sup> площади пола, сидячие места заняты) [122].

Таблица 4.4 – Расход электроэнергии на разгон и движение электропоездов в зависимости от целевой скорости движения, кВт-ч.

Тип электропоезда	40 км/ч	60 км/ч	80 км/ч	100 км/ч
Расход электроэнергии электропоездом на пробег 1 км в зависимости от скорости движения				
ЭР2, ЭД4М, ЭП2Д	5,8	3,8	3,2	2,6
ЭР9П	7,1	4,5	3,2	2,6
Расход электроэнергии на один разгон электропоезда от остановки в зависимости от целевой скорости движения				
ЭР2	38,5	85,9	117,3	185,9
ЭР9П	51,3	115,4	163,5	262,8

Таблица 4.5 – Расход электроэнергии при простое электропоезда длительностью 1 час, кВт-ч.

Тип электропоезда	Расход электроэнергии при простое электропоезда длительностью 1 час, кВт-ч.
ЭР2, ЭД4М, ЭП2Д	35,3
ЭР9П	64,7

#### 4.5 Расходные показатели пригородно-городских транспортных систем

Расходные и доходные показатели в пригородно-городских транспортных системах группируются по принадлежности к субъектам транспорта: перевозчики, владельцы инфраструктуры. Перевозчики на железнодорожном транспорте — пассажирские пригородные компании и оператор бимодальной транспортной системы (новый перевозчик). Владелец городской трамвайной инфраструктуры, и он же перевозчик на ней — оператор городской трамвайной сети. Владельцы рельсовой инфраструктуры: владелец инфраструктуры общего пользования, владелец путей не общего пользования, оператор городской трамвайной сети.

Составляющие финансового результата каждого участника транспортной системы структурируются на 2 группы:

1. Непосредственные инвестиции в подвижной состав, инфраструктуру, пассажирские обустройства и прямые расходы на обеспечение перевозочного процесса (обозначены в формулах индексом \*) определяют экономическую целесообразность внедрения бимодальной транспортной системы.

2. Взаимные платежи участников перевозочного процесса (обозначены в формулах индексом \*\*) обеспечивают безубыточность деятельности на основе принципа «win-win».

*Расходы пригородного перевозчика на железнодорожном транспорте (пассажирской пригородной компании) (далее — ППК):*

$$\sum R^{\text{ППК}} = \sum R_{\text{и}}^{\text{ППК}*} + \sum R_{\text{А}}^{\text{ППК}^{**}}; \quad (4.32)$$

$$\sum R^{\text{ППК}*} = R_{\text{пс}}^{\text{ППК}} + R_{\text{А}}^{\text{ППК}} + R_{\text{об}}^{\text{ППК}} + R_{\text{си}}^{\text{ППК}} + R_{\text{п}}^{\text{ППК}}; \quad (4.33)$$

$$\sum R^{\text{ППК}^{**}} = R_{\text{и}}^{\text{ППК}}; \quad (4.34)$$

$$R_{\text{и}}^{\text{ППК}} = f(n_x^{\text{ППК}}, \xi, L_x^{\text{ППК}}), \quad (4.35)$$

$$R_{\text{об}}^{\text{ППК}} + R_{\text{А}}^{\text{ППК}} = f(n_x^{\text{ППК}}, \xi, L_x^{\text{ППК}}), \quad (4.36)$$

где  $R_{\text{и}}^{\text{ППК}}$  — расходы ППК на оплату услуг предоставления железнодорожной инфраструктуры, руб.;

$R_{\text{А}}^{\text{ППК}}$  — расходы ППК на аренду подвижного состава (при использовании арендуемого подвижного состава), руб.;

$R_{\text{пс}}^{\text{ППК}}$  — удельные инвестиции ППК на приобретение собственного подвижного состава, руб.;

$R_{\text{об}}^{\text{ППК}}$  — операционные расходы ППК на эксплуатацию, обслуживание и амортизацию собственного подвижного состава, руб.;

$R_{\text{си}}^{\text{ППК}}$  — операционные расходы на обслуживание собственной инфраструктуры ППК, руб.;

$R_{\text{п}}^{\text{ППК}}$  — прочие расходы ППК, руб.;

$\xi$  — характеристика класса транспортного обслуживания, скоростной категории (определяется общим стандартом для всех перевозчиков);

$n_x^{\text{ППК}}$  — размеры движения поездов ППК на маршруте  $x$ , пар поездов/сутки;

$L_x^{\text{ППК}}$  — тарифный пробег поездов ППК для обеспечения размеров движения  $n_x^{\text{ППК}}$ , приходящийся на 1 пару поездов на маршруте  $x$ , поездо-км.

Доходы перевозчика на железнодорожном транспорте (пассажирской пригородной компании):

$$\sum D^{\text{ППК}} = \sum D^{\text{ППК}^*} + \sum D^{\text{ППК}^{**}}, \quad (4.37)$$

$$\sum D^{\text{ППК}^*} = D_{\text{Б}}^{\text{ППК}} + D_{\text{П}}^{\text{ППК}}; \quad (4.38)$$

$$\sum D^{\text{ППК}^{**}} = D_{\text{К}}^{\text{ППК}} + D_{\text{К}2}^{\text{ППК}}; \quad (4.39)$$

$$D_{\text{Б}}^{\text{ППК}} = f(\sum A l); \quad (4.40)$$

$$D_{\text{К}}^{\text{ППК}} = f(\sum A l); \quad (4.41)$$

$$D_{\text{К}2}^{\text{ППК}} = f(n_x^{\text{ППК}} L_x^{\text{ППК}}), \quad (4.42)$$

где  $D_{\text{Б}}^{\text{ППК}}$  — доходы ППК от реализации проездных документов на пригородные поезда, руб.;

$D_{\text{К}}^{\text{ППК}}$  — компенсация выпадающих доходов ППК от разницы между экономически обоснованным тарифом на перевозку пассажиров пригородным железнодорожным транспортом и тарифом для пассажиров, регулируемым субъектом РФ, руб.;

$D_{\text{К}2}^{\text{ППК}}$  — компенсация расходов ППК от субъекта РФ на получение услуг железнодорожной инфраструктуры общего пользования, руб.;

$D_{\text{П}}^{\text{ППК}}$  — доходы ППК от прочих видов деятельности, руб.

*Расходы владельцев железнодорожных инфраструктур общего пользования* (далее — владелец ИОП) выражаются формулой:

$$\sum R^{\text{ИОП}} = \sum R^{\text{ИОП}^*} = R_{\text{от}}^{\text{ИОП}} + R_{\text{ос}}^{\text{ИОП}} + R_{\text{рп}}^{\text{ИОП}}, \quad (4.43)$$

где  $R_{\text{от}}^{\text{ИОП}}$  — операционные расходы владельца ИОП, связанные с продвижением транспортных потоков (путевое хозяйство, энергетика, диспетчерское управление), руб.;

$R_{\text{ос}}^{\text{ИОП}}$  — удельные инвестиции владельца ИОП, связанные с мощностью объекта инфраструктуры, руб.;

$R_{\text{рп}}^{\text{ИОП}}$  — условно-постоянные операционные расходы владельца ИОП, связанные с обслуживанием инфраструктуры для организации пассажирского и других видов сообщений, руб.

Доходы владельца железнодорожной инфраструктуры общего пользования:

$$\sum D^{\text{ИОП}} = \sum D^{\text{ИОП}^*} + \sum D^{\text{ИОП}^{**}}, \quad (4.44)$$

$$\sum D^{\text{ИОП}^*} = D_y^{\text{ИОП}}, \quad (4.45)$$

$$\sum D^{\text{иоп**}} = D_{\text{д}}^{\text{иоп}}, \quad (4.46)$$

где  $D_{\text{д}}^{\text{иоп}}$  — доход владельца ИОП от оказания услуг предоставления инфраструктуры перевозчикам для организации пассажирского и других видов сообщения, руб.;

$D_{\text{у}}^{\text{иоп}}$  — доход владельца ИОП от оказания прочих услуг, руб.

*Расходы владельцев железнодорожных путей необщего пользования* выражаются формулой

$$\sum R^{\text{пнп}} = \sum R^{\text{пнп*}} = R_{\text{от}}^{\text{пнп}} + R_{\text{ос}}^{\text{пнп}} + R_{\text{рп}}^{\text{пнп}}, \quad (4.47)$$

где  $R_{\text{от}}^{\text{пнп}}$  — операционные расходы владельца ПНП, связанные с продвижением транспортных потоков (путевое хозяйство, энергетика, диспетчерское управление), руб.;

$R_{\text{ос}}^{\text{пнп}}$  — удельные инвестиции владельца ПНП, связанные с мощностью объекта инфраструктуры, руб.;

$R_{\text{рп}}^{\text{пнп}}$  — условно-постоянные операционные расходы владельца ПНП, связанные с обслуживанием инфраструктуры для организации пассажирского и других видов сообщений, руб.

*Доходы владельцев железнодорожных путей необщего пользования:*

$$\sum D^{\text{пнп}} = \sum D^{\text{пнп*}} + \sum D^{\text{пнп**}}, \quad (4.48)$$

$$\sum D^{\text{пнп*}} = D_{\text{о}}^{\text{пнп}} + D_{\text{у}}^{\text{пнп}}, \quad (4.49)$$

$$\sum D^{\text{пнп**}} = D_{\text{д}}^{\text{пнп}}, \quad (4.50)$$

где  $D_{\text{д}}^{\text{пнп}}$  — доход владельца ПНП от оказания услуг предоставления инфраструктуры перевозчикам для организации пассажирского и других видов сообщения, руб.;

$D_{\text{о}}^{\text{пнп}}$  — доход владельца ПНП от основной деятельности, руб.;

$D_{\text{у}}^{\text{пнп}}$  — доход владельца ПНП от оказания прочих услуг, руб.

*Расходы оператора городского трамвая* (далее — ГТ) выражаются формулой

$$\sum R^{\text{гт*}} = \sum R^{\text{гт}} = R_{\text{от}}^{\text{гт}} + R_{\text{ос}}^{\text{гт}} + R_{\text{рп}}^{\text{гт}} + R_{\text{пс}}^{\text{гт}} + R_{\text{об}}^{\text{гт}} + R_{\text{п}}^{\text{гт}}, \quad (4.51)$$

где  $R_{\text{от}}^{\text{гт}}$  — операционные расходы ГТ, связанные с продвижением транспортных потоков (путевое хозяйство, энергетика, диспетчерское управление), руб.;

$R_{oc}^{ГТ}$  — удельные инвестиции владельца ГТ, связанные с мощностью объекта инфраструктуры, руб.;

$R_{рп}^{ГТ}$  — условно-постоянные операционные расходы ГТ, связанные с обслуживанием инфраструктуры, руб.;

$R_{пс}^{ГТ}$  — удельные инвестиции ГТ на приобретение собственного подвижного состава, руб.;

$R_{об}^{ГТ}$  — операционные расходы ГТ на эксплуатацию, обслуживание и амортизацию собственного подвижного состава, руб.;

$R_{п}^{ГТ}$  — прочие расходы ГТ, руб.;

Доходы оператора городского трамвая выражаются формулой

$$\sum D^{ГТ} = \sum D^{ГТ*} + \sum D^{ГТ**}, \quad (4.52)$$

$$\sum D^{ГТ*} = D_{Б2}^{ГТ} + D_{п}^{ГТ}, \quad (4.53)$$

$$\sum D^{ГТ**} = D_{д}^{ГП} + D_{к3}^{ГП}, \quad (4.54)$$

$$D_{Б2}^{ГТ} = f(\sum Al); \quad (4.55)$$

$$D_{к3}^{ГП} = f(\sum Al); \quad (4.56)$$

где  $D_{Б2}^{ГТ}$  — доходы от реализации проездных документов на городской транспорт, руб.;

$D_{к3}^{ГП}$  — компенсация выпадающих доходов перевозчика от разницы между экономически обоснованным тарифом на городском транспорте и тарифом для пассажиров, регулируемым субъектом РФ, руб.;

$D_{д}^{ГП}$  — доход ГП от оказания услуг предоставления инфраструктуры перевозчикам для организации пассажирского и других видов сообщения, руб.;

$D_{п}^{ГП}$  — доходы от прочих видов деятельности, руб.

*Расходы оператора бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд» (далее — ТП) выражаются формулой*

$$\sum R^{ТП} = R^{ТП*} + R^{ТП**}; \quad (4.57)$$

$$\sum R^{ТП*} = \sum R_{пс}^{ТП} + \sum R_{об}^{ТП} + \sum R_{oc}^{ТП} + \sum R_{п}^{ТП} + R_{си}^{ТП}; \quad (4.58)$$

$$\sum R^{ТП**} = \sum R_{и}^{ТП}, \quad (4.59)$$

где  $R_{и}^{ТП}$  — расходы ТП на оплату услуг предоставления железнодорожной и трамвайной инфраструктуры, руб.;

$R_{пс}^{ТП}$  — удельные инвестиции ТП на приобретение собственного подвижного состава, руб.;

$R_{об}^{ТП}$  — операционные расходы ТП на эксплуатацию, обслуживание и амортизацию собственного подвижного состава, руб.;

$R_{си}^{ТП}$  — обслуживание собственной инфраструктуры ТП, руб.;

$R_{п}^{ТП}$  — прочие расходы ТП, руб.;

$R_{ос}^{ТП}$  — удельные инвестиции владельца ТП, связанные с мощностью объекта инфраструктуры (устройство гейта).

Доходы оператора бимодальной транспортной системы «трамвай-поезд» выражаются формулой:

$$\sum D^{ТП} = \sum D^{ТП*} + \sum D^{ТП**}; \quad (4.60)$$

$$\sum D^{ТП*} = D_{Б}^{ТП} + D_{п}^{ТП} + D_{Б2}^{ТП}; \quad (4.61)$$

$$\sum D^{ТП**} = D_{к}^{ТП} + D_{к2}^{ТП} + D_{к3}^{ТП}; \quad (4.62)$$

где  $D_{Б}^{ТП}$  — доходы ТП от реализации проездных документов на пригородные поезда, руб.;

$D_{к}^{ТП}$  — компенсация выпадающих доходов ТП от разницы между экономически обоснованным тарифом на перевозку пассажиров пригородным железнодорожным транспортом и тарифом для пассажиров, регулируемым субъектом РФ, руб.;

$D_{к2}^{ТП}$  — компенсация расходов ТП от субъекта РФ на получение услуг железнодорожной инфраструктуры общего пользования, руб.;

$D_{п}^{ТП}$  — доходы ТП от прочих видов деятельности, руб.;

$D_{Б2}^{ТП}$  — доходы от реализации проездных документов на городской транспорт, руб.;

$D_{к3}^{ТП}$  — компенсация выпадающих доходов перевозчика от разницы между экономически обоснованным тарифом на городском транспорте и тарифом для пассажиров, регулируемым субъектом РФ, руб.

Для оценки сравнительной эффективности традиционной (пересадочной) и бимодальной транспортных систем необходимы формулы расчета прямых операционных расходов, зависящих от объема работы и приходящихся на эксплуатационные измерители.

1) Расходы, связанные с поездо-километрами пробега, руб./сут.:

электропоездов

$$R_{\text{проб}}^{\text{эп}} = 2 \sum_i n_i^{\text{эп}} L_i^{\text{эп}} m_{\text{эп}} e_{\text{СКМ}}^{\text{эп}}; \quad (4.63)$$

«трамваев-поездов» (трамваев)

$$R_{\text{проб}}^{\text{тп}} = 2 \sum_i n_i^{\text{тп}} L_i^{\text{тп}} e_{\text{ПКМ}}^{\text{тп}}. \quad (4.64)$$

2) Расходы, связанные с поездо-часами эксплуатируемого парка подвижного состава, руб./сут:

электропоездов

$$R_{\text{вп}}^{\text{эп}} = \sum_i n_i^{\text{эп}} \theta_i^{\text{эп}} m_{\text{эп}} e_{\text{сч}}^{\text{эп}}; \quad (4.65)$$

«трамваев-поездов» и трамваев

$$R_{\text{вп}}^{\text{тп}} = \sum_i n_i^{\text{тп}} \theta_i^{\text{тп}} e_{\text{пч}}^{\text{тп}}. \quad (4.66)$$

3) Расходы, связанные с бригадо-часами, руб./сут.:

локомотивных бригад электропоездов

$$R_{\text{бч}}^{\text{эп}} = \sum_i n_i^{\text{эп}} \theta_i^{\text{эп}} (1 + \varphi_{\text{эп}}) e_{\text{бч}}^{\text{эп}}; \quad (4.67)$$

водителей «трамваев-поездов» и трамваев

$$R_{\text{бч}}^{\text{тп}} = \sum_i n_i^{\text{тп}} \theta_i^{\text{тп}} (1 + \varphi_{\text{тп}}) e_{\text{бч}}^{\text{тп}}. \quad (4.68)$$

4) Расходы инфраструктуры, связанные с тонно-километрами брутто, руб./сут.:

на участке железной дороги для электропоездов и «трамваев-поездов»

$$R_{\text{бр}}^{\text{эп}} = 2 \sum_i n_i^{\text{эп}} L_i^{\text{эп}} Q_{\text{бр}}^{\text{эп}} e_{\text{бр}}^{\text{жд}}; \quad (4.69)$$

на городской трамвайной сети для «трамваев-поездов» и трамваев

$$R_{\text{бр}}^{\text{эп}} = 2 \sum_i n_i^{\text{тп}} L_i^{\text{тп}} Q_{\text{бр}}^{\text{тп}} e_{\text{бр}}^{\text{тр}}. \quad (4.70)$$

5) Расходы, связанные с энергоресурсами на тягу и собственные нужды подвижного состава, руб./сут.:

электропоездов

$$R_{\text{эн}}^{\text{эп}} = W_{\text{эп}} \lambda e_{\text{эн}}; \quad (4.71)$$

«трамваев-поездов» и трамваев

$$R_{\text{ЭН}}^{\text{ТП}} = W_{\text{ТП}} \lambda e_{\text{ЭН}}. \quad (4.72)$$

б) Расходы, связанные с отправленными пассажирами, руб./сут.:  
электropоездов

$$R_{\text{ПС}}^{\text{ЭП}} = \sum A_i^{\text{ЭП}} e_{\text{ПС}}^{\text{ЭП}}; \quad (4.73)$$

«трамваев-поездов» и трамваев

$$R_{\text{ПС}}^{\text{ТП}} = \sum A_i^{\text{ТП}} e_{\text{ПС}}^{\text{ТП}}. \quad (4.74)$$

В формулах (4.63 — 4.74):

$m_{\text{ЭП}}$  — число двухвагонных электросекций в составе электропоезда;

$\varphi_{\text{ЭП}}, \varphi_{\text{ТП}}$  — коэффициент учета вспомогательного времени работы соответственно локомотивной бригады электропоезда и водителя «трамвай-поезда»;

$\lambda$  — коэффициент «условных» потерь электроэнергии на тяговой подстанции и в контактной сети;

$A_i^{\text{ЭП}}, A_i^{\text{ТП}}$  — число отправленных пассажиров в сутки соответственно в электропоездах и в «трамваях-поездах» на маршруте  $i$ ;

$e_{\text{СКМ}}^{\text{ЭП}}, e_{\text{СЧ}}^{\text{ЭП}}, e_{\text{БЧ}}^{\text{ЭП}}, e_{\text{ПС}}^{\text{ЭП}}$  — единичные расходные ставки соответственно на 1 секции-километр, 1 секции-час эксплуатируемого парка, 1 бригадо-час локомотивной бригады, 1 отправленного пассажира электропоездов;

$e_{\text{ПКМ}}^{\text{ТП}}, e_{\text{ПЧ}}^{\text{ТП}}, e_{\text{БЧ}}^{\text{ТП}}, e_{\text{ПС}}^{\text{ТП}}$  — единичные расходные ставки соответственно на 1 поездокм, 1 поездок-час эксплуатируемого парка, 1 час работы водителя, 1 отправленного пассажира «трамваев-поездов»;

$e_{\text{БР}}^{\text{ЖД}}, e_{\text{БР}}^{\text{ТР}}$  — единичные расходные ставки на 1 тонно-км брутто по железнодорожной и трамвайной инфраструктурам соответственно;

$e_{\text{ЭН}}$  — единичные расходные ставки соответственно на 1 кВт-ч электроэнергии.

Расходы записаны исходя из предположения о том, что влияние на грузовое движение у вариантов технологии организации движения поездов одинаково. Если это не так, то изменение показателей и затрат по грузовому движению рассчитывается по ранее разработанным методикам.

#### 4.6 Социально-экономические эффекты от внедрения пригородно-городской транспортной системы «трамвай-поезд»

Социально-экономические эффекты от запуска линии (линий) «трамвая-поезда» в конкретном российском городе / городской агломерации могут быть оценены и рассчитаны в числовом эквиваленте лишь исходя из деталей местных условий. Возможно, однако, описать последствия внедрения бимодальной транспортной системы, которые будут влиять на жизнь любого города и дадут в совокупности сумму различных эффектов.

Для расчета стоимости социально-экономических эффектов, получаемых в результате строительства инфраструктурных объектов в сфере транспорта, утверждена специальная методика [124]. Несмотря на то, что она предполагает привлечение средств федерального бюджета, в то время как строительство линии «трамвай-поезда» может быть и региональным проектом, на основе данной методики может быть в числовом выражении рассчитан целый ряд эффектов, в том числе и социальных.

Под социальным эффектом понимается «совокупность социальных результатов, получаемых от реализации инвестиций в реальном секторе экономики, проектируемых на качество социальной среды и имеющих как положительные, так и отрицательные значения» [125]. Социальный эффект может быть оценен как прямо, так и косвенно. Прямой эффект возникает после проведения строительных работ и начала непосредственной эксплуатации линии «трамвая-поезда». Косвенный эффект имеет «отложенный» временной лаг.

Исходя из вышеизложенного, перечислим социально-экономические эффекты от внедрения линии «трамвая-поезда».

1. Изначальная задача и смысл создания «трамвая-поезда» состоят в том, чтобы экономить пассажирам время и усилия, которые они тратят на пересадку с одного транспортного средства на другой. Чем обширнее городское пространство и длиннее маршруты, тем более ценным ресурсом для пассажиров является время.

2. Вторым по важности эффектом от запуска в агломерации «трамвая-поезда»

является т.н. агломерационный эффект. Методика [124] определяет его как эффект, обусловленный приростом населения агломерации в результате расширения ее границ, повышения доступности трудовых ресурсов, а также ростом экономической эффективности хозяйствующих субъектов в связи с расширением доступа к потребителям.

3. Важным экономическим эффектом является уменьшение потребности в инвестициях капитального строительства, в том числе улично-дорожной сети, а также капитальных затрат в железнодорожную инфраструктуру, которую можно заменить трамвайной.

4. «Трамвай-поезд» как перспективная транспортная модель может предусматривать развитие различных форм государственно-частного партнерства; для этой модели возможно повышение доступности кредитных ресурсов за счет субсидирования части процентных ставок из средств федерального бюджета; возможно привлечение такой формы бизнеса, как лизинг при закупке вагонов «трамваев-поездов»; может предполагаться также привлечение средств частных инвесторов, использование транспортных облигаций, — всё это весьма положительно скажется на экономике региона.

5. Трамвай, как известно, является самым экологичным видом общественного транспорта (если не брать во внимание совсем уж экзотические модели типа фуникулеров). Чем больше пассажиров «оттягивает» на себя транспортная система «трамвай-поезд», тем меньше требуется для их передвижения личных автомобилей, автобусов и маршрутных такси. Тем самым «трамвай-поезд» способствует уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу, улучшению экологической обстановки на территории городской агломерации. В отсроченной перспективе в этом же ряду могут быть названы улучшение здоровья населения, а вслед за этим и демографической ситуации в регионе. Таков долгосрочный косвенный эффект, возникающий как сумма остальных эффектов.

6. В настоящее время среди других видов туризма вполне динамично развивается и железнодорожный, транспортный туризм. Запуск линии «трамвая-поезда» может стать одним из туристических брендов города, повысить его узнаваемость в

туристическом мире. Подобно тому, как это уже сделано в немецких городах Карлсруэ и Кассель, по пути следования «трамвая-поезда» могут возникнуть самые разные туристические объекты (гостиницы, кафе, рестораны, музеи, панорамы и т.п.). Привлечение в город туристов, экскурсантов во всем мире помогает решить городские проблемы безработицы и инвестиций в городскую инфраструктуру, способствует развитию разных видов местного бизнеса, увеличению покупательной способности населения, что, в конечном счёте, приводит к росту поступления налогов в региональный бюджет.

7. Еще один неожиданный положительный эффект «трамвая-поезда» выявился во время эпидемии COVID-19. Сокращение потребности в пересадках с одного вида транспорта на другой пусть незначительно, но снижает риск заражения, поскольку пассажиры избегают на своём пути нескольких мест скопления людей.

Списки положительных эффектов могут пополняться и отличаться друг от друга в зависимости от условий конкретной агломерации. В то же время следует понимать, что реализация проекта имеет не только эффекты, но и риски, которые также должны быть просчитаны.

#### **4.7 Рекомендуемая сфера и условия применения транспортной системы «трамвай-поезд»**

##### **4.7.1 Методические положения по отбору потенциальных транспортных узлов**

Рассмотрение возможности применения транспортной системы «трамвай-поезд» в российских условиях [5] требует прежде всего создания методики предварительного отбора городов или городских агломераций, где данная система может быть внедрена. Наиболее благоприятными условиями для развития системы «трамвай-поезд» обладают агломерации городов с плотными пригородами, прилегающими к железнодорожным линиям. Для городов, где трамвайная сеть существовала

ранее и была закрыта по разным причинам, и для городов, где трамвайного движения никогда не было, следует определить, насколько обоснованно будет в них восстановление либо организация трамвайного движения. Если строительство новой трамвайной системы экономически оправдано, или она уже существует в городе, нужно определить возможность и актуальность соединения трамвайной сети с железной дорогой. Это можно сделать на основе перечня критериев, сформулированных с учётом рекомендаций [74]. С целью уменьшения трудоёмкости анализа привлекаемой информационной базы критерии объединяются в две группы.

*Первая группа критериев* обеспечивает отсев объектов, не имеющих перспективы исследования и проектирования. К первой группе относятся:

**1. Наличие регулярных пригородных перевозок и устойчивого пассажиропотока** по прилегающим к городу железнодорожным линиям. Население пригородов трудоустроено либо ориентировано на работу в центральных районах города. Для ежедневных маятниковых миграций жителей пригородов в параллельных направлениях используются пригородные поезда и автобусы.

**2. Численность населения города (агломерации)** —  $M_{\Gamma}$  — в пределах от  $M_{\min}$  до  $M_{\max}$  тыс. человек.

$$M_{\min} \leq M_{\Gamma} \leq M_{\max}, \quad (4.75)$$

где  $M_{\min}$  — нижняя граница населения города (агломерации)  $M_{\min} = 0,1$  млн. чел. В городах с населением до 0,1 млн. чел пассажиропотоки достаточной мощности присутствуют редко.

$M_{\max}$  — верхняя граница величины численности населения города (агломерации), при превышении которой становится оправдано применять виды транспорта с более высокими показателями провозной способности. Для европейских агломераций эта величина определена на уровне 300 тыс. человек [74] и обуславливается высокой населенностью пригородов с центростремительными пассажиропотоками.

Для расчета  $M_{\max}$  используем расчетную провозную способность линии  $N_{\text{пр}}$  и прогнозируемое значение пассажиропотока  $P_{\text{п}}$ .

Расчет прогнозируемого пассажиропотока следует производить отдельно и подробно для каждого города, но в задачах первичного отбора можно воспользоваться корреляционным полем, характеризующим зависимость между численностью населения городов и мощностью пассажиропотоков, корреспондирующих на маршрутах.

Если на сопредельных инфраструктурах есть дополнительные (к «трамваям-поездам») размеры движения пригородных поездов и трамваев, то значение  $P_{\Pi}$  следует брать в сечении на стыке систем в час «пик». Если на одной из инфраструктур (например, на пути необщего пользования) в пассажирском движении используется только маршрут «трамвая-поезда», то значение  $P_{\Pi}$  следует брать по максимальному сечению пассажиропотока в час «пик» со стороны путей необщего пользования.

Полученное значение прогнозируемого пассажиропотока  $P_{\Pi}$  сравнивается с расчетной провозной способностью линии «трамвая-поезда»  $N_{\text{пр}}$ , которая зависит от пропускной способности линии и вместимости подвижного состава. При расчете  $N_{\text{пр}}$  следует учесть возможность кратного увеличения провозной способности, которая закладывается в инфраструктуре и реализуется с помощью сцепки двух и более вагонов по системе многих единиц, при соблюдении условия, что значение провозной способности  $N_{\text{пр}}$  больше, чем прогнозируемый пассажиропоток  $P_{\Pi}$  :

$$N_{\text{пр}} - P_{\Pi} > 0 . \quad (4.76)$$

Максимальная провозная способность линии  $N_{\text{пр}}$  при этом определит верхнюю границу численности населения города (агломерации):

$$M_{\text{max}} = f(N_{\text{пр}}) . \quad (4.77)$$

Если условия формул (4.75) и (4.76) соблюдены, то в рассматриваемом городе возможно применение «трамваев-поездов». Мощности основных направлений пассажиропотоков в связях «город-пригород» находятся в диапазоне провозной способности транспортной системы «трамвай-поезд».

**3. Расположение железнодорожного вокзала и остановочных пунктов железной дороги на отдалении от центров городской активности.** Как правило, именно в этом случае для большинства пассажиров удобнее воспользоваться

услугой «трамвая-поезда», поскольку такая транспортная система позволит им без пересадки доехать до центров городской инфраструктуры и других внутригородских пунктов назначения.

*Вторая группа критериев* обеспечивает анализ объектов, соответствующих первой группе, по следующим характеристикам.

***4. Наличие центральной городской улицы достаточной ширины.***

Улица должна соединять линию железной дороги с центром (центрами) городской активности. Будет полезным наличие незастроенной привокзальной либо внутригородской территории, по которой возможно проложить трамвайные пути.

***5. Наличие электрификации прилегающего к городу участка железной дороги с пригородным сообщением,*** так как предполагается принцип максимального использования существующей инфраструктуры. В ином случае потребуется либо электрифицировать пригородный участок железной дороги (если маршрут без контактной сети имеет значительную протяженность), либо использовать специальный автономный подвижной состав.

Приведенный список критериев носит обобщающий характер и может быть расширен или сужен в зависимости от социально-экономических условий конкретного города внутри агломерации.

#### 4.7.2 Рассмотрение городов Российской Федерации как потенциальных полигонов внедрения технологии «трамвай-поезд»

Для определения возможностей внедрения технологии «трамвай-поезд» рассмотрены 59 городов Российской Федерации с населением от 9 тыс. до 12,7 млн. чел., где на начало 2020 года действуют трамвайные системы с протяженностью линий от 5 до 418 км. На основании первой группы вышеприведённых критериев рассмотрены города Российской Федерации, которые имеют на 1 января 2020 года трамвайные системы. Результаты отбора приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты отбора по первой группе критериев.

<b>Критерий</b>	<b>Отвечает критерию</b>	<b>Не отвечает критерию</b>
Наличие регулярных пригородных перевозок	57	2
Население в пределах от 100 до 500 тыс. человек	28	31
Расположение железнодорожного вокзала на отдалении от центра города	34	25
<b>Все критерии одновременно</b>	<b>14</b>	<b>45</b>

Установлено, что трем критериям одновременно отвечают только 14 из 59 городов: Ачинск, Волжский, Златоуст, Коломна, Курск, Магнитогорск, Нижнекамск, Новочеркасск, Орел, Орск, Смоленск, Старый Оскол, Тула, Череповец. Для более точного определения городов, подходящих для внедрения «трамвай-поезда», проведена проверка по второй группе критериев. Результаты отбора по второй группе критериев отражены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Соответствие городов второй группе критериев.

<b>Критерий</b>	<b>Отвечает критерию</b>	<b>Не отвечает критерию</b>
Наличие городской улицы достаточной ширины	11	3
Электрификация прилегающей ж. д. линии	12	2
<b>Все критерии одновременно</b>	<b>10</b>	<b>4</b>

Второй группе критериев соответствуют десять городов, но после более детального их рассмотрения на предмет характера работы трамвайной и пригородной сети, населенности пригородных зон и компоновки городских районов к дальнейшему обоснованию пилотных проектов следует принять пять городов: Волжский, Курск, Орел, Орск и Тула.

#### 4.7.3 Техничко-экономическое сопоставление технологий транспортного обслуживания

В параграфе производится поиск экономически рациональной области применения технологии «трамвай-поезд».

С использованием формул, разработанных в разделах 4.4 и 4.5, проведено сопоставление прямых зависящих операционных расходов для перевозки пассажиров по трем вариантам технологии:

1. Традиционный вариант — электропоезд и городской трамвай.

Пассажиропоток в направлении город-пригород и обратно на железнодорожном транспорте осваивается при помощи электропоезда составностью в 4 или 10 вагонов; на городской части маршрута используется трамвай (рисунок 4.10, а).

2. Комбинированный вариант — электропоезд и «трамвай-поезд».

Пассажиропоток в направлении город-пригород и обратно на железнодорожном транспорте осваивается частично при помощи электропоезда ЭП2Д составностью в 4 или 10 вагонов; частично используется «трамвай-поезд» (рисунок 4.10, б).

3. Альтернативный вариант — пассажиропоток в направлении город-пригород и обратно полностью осваивается подвижным составом типа «трамвай-поезд» (рисунок 4.10, в).

Исходные данные для сравнительного расчета прямых зависящих операционных расходов представлены в таблице 4.8. В качестве исходных данных для расчета зависимостей с участием подвижного состава типа «трамвай-поезд» приняты параметры вагона 71-934 «Лев».

Основные параметры:

1)  $\gamma_{жд}$  — доля железнодорожной части в маршруте «трамвая-поезда»;

$$\gamma_{жд} = \frac{\gamma_{жд}}{\gamma_{жд} + l_{тр}}, \quad (4.79)$$

где  $l_{жд}$  — протяженность железнодорожной части в маршруте «трамвая-поезда», км;

$l_{тр}$  — протяженность городской части в маршруте «трамвая-поезда», км.

2) Доля пересадочного пассажиропотока — отношение величины пересадочного пассажиропотока к величине потока пригородных пассажиров, следующих в район вокзала (обозначения переменных в формуле приведены в разделе 4.4):

$$\sigma_{пер} = \frac{A_{общ}^{пер}}{A_{общ}^{вк} + A_{общ}^{пер}}; \quad (4.80)$$

Таблица 4.8 – Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Вместимость электропоезда ЭП2Д (4 вагона)	800 пасс.
Вместимость электропоезда ЭП2Д (10 вагонов)	2300 пасс.
Масса электропоезда ЭП2Д (4 вагона)	212 тонн
Масса электропоезда ЭП2Д (10 вагонов)	518 тонн
Вместимость вагона 71-931 «Витязь» (гор. трамвай)	200 пасс.
Масса вагона 71-931 «Витязь»	37 тонн
Вместимость вагона 71-934 «Лев» («трамвай-поезд»)	285 пасс.
Масса вагона 71-934 «Лев»	45 тонн
Масса одного пассажира	0,08 тонн
Средняя эксплуатационная скорость на ж. д.	40 км/ч
Средняя эксплуатационная скорость на трамвайной сети	20 км/ч
Единичные расходные ставки:	
- на 1 секции-км электропоезда, поездо-км «трамвай-поезда»;	10,5 руб.
- на 1 поездо-км городского трамвая;	8,43 руб.
- на 1 секции-час электропоезда;	299,91 руб.
- на 1 бригадо-час локомотивной бригады электропоезда;	1235,30 руб.
- на 1 отправленного пассажира электропоезда;	0,4 руб.
- на 1000 тонно-км брутто по ж.д. инфраструктуре;	10,3 руб.
- на 1 поездо-час «трамвая-поезда»;	379,25 руб.
- на 1 поездо-час городского трамвая;	310,29 руб.
- на 1 час работы водителя «трамвая-поезда», городского трамвая;	617,65 руб.
- на 1 отправленного пасс. «трамвая-поезда», городского трамвая;	0,3 руб.
- на 1000 тонно-км брутто по трамвайной инфраструктуре;	6,19 руб.
- на 1 кВт-ч электроэнергии.	3,7 руб.
Стоимость вагона 71-931 «Витязь»	100 млн руб.
Стоимость вагона 71-934 «Лев» («трамвай-поезд»)	120 млн руб.
Стоимость электропоезда ЭП2Д (4 вагона)	184 млн руб.
Стоимость электропоезда ЭП2Д (10 вагонов)	460 млн руб.
Стоимость строительства гейта	67 млн руб.

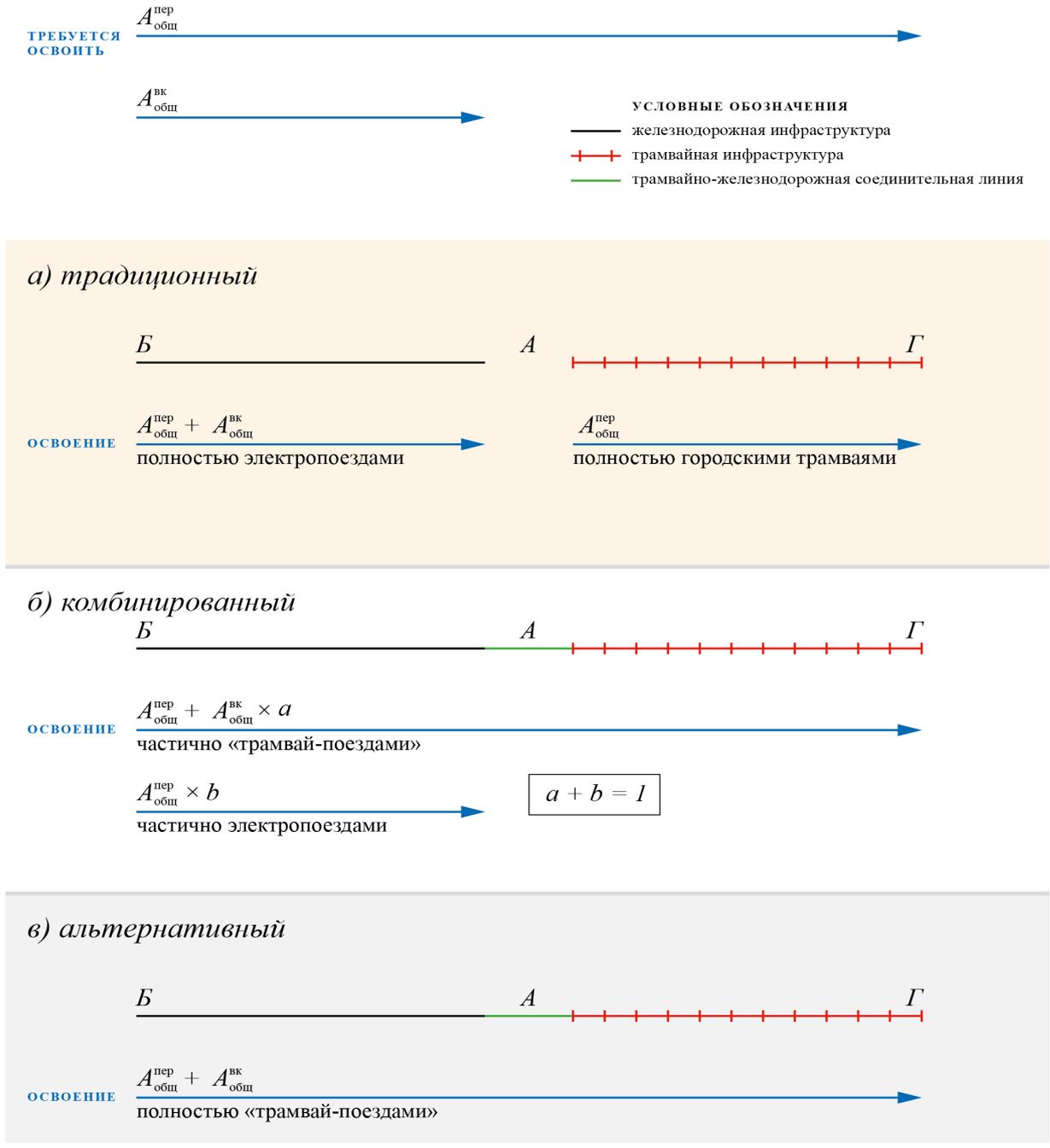


Рисунок 4.10 — Варианты освоения пассажиропотока

Графики зависящих затрат по вариантам приведены на рисунках 4.11–4.14: при доле пересадочного пассажиропотока от 0,1 до 0,9 — на рисунке 4.11; при доле железнодорожной части от 0,1 до 0,9 — на рисунках 4.12–4.14. Зависимости на рисунках 4.11–4.14 приведены при  $A_{общ}^{пер} + A_{общ}^{вк} = 10$  тыс. пасс./сутки

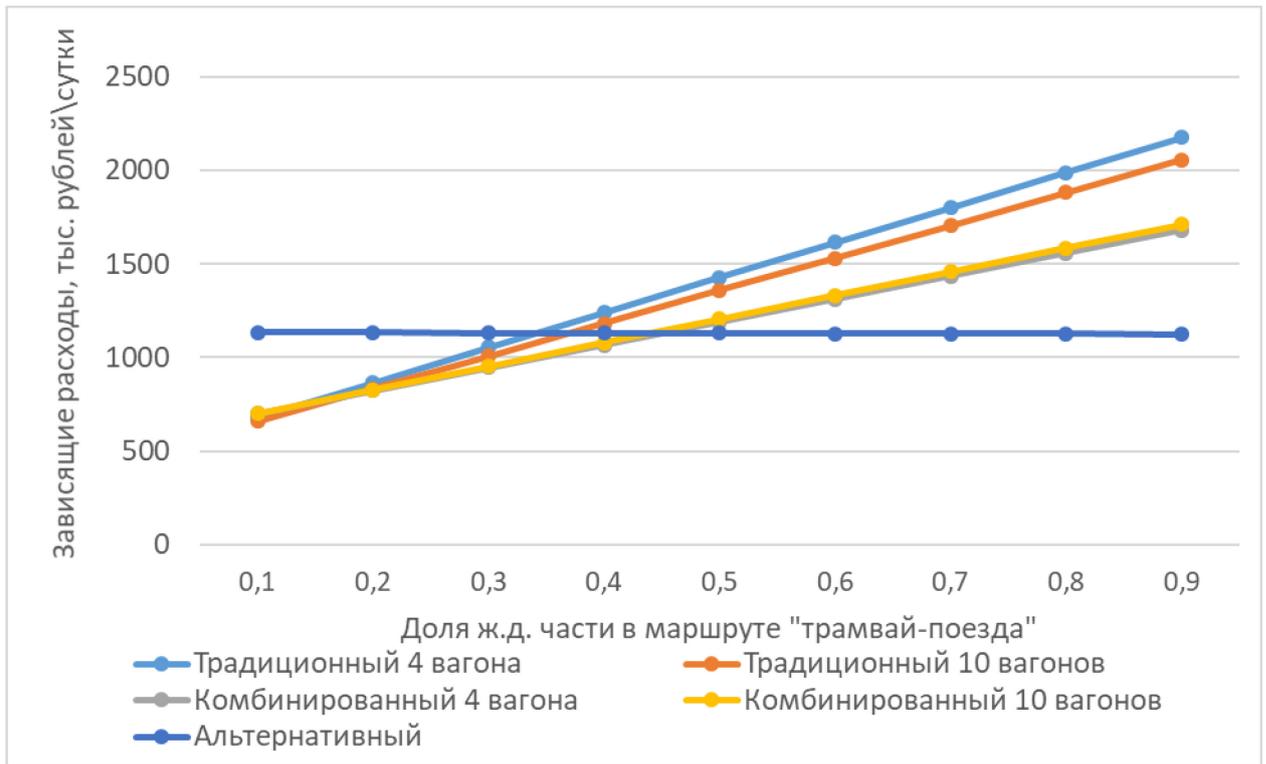


Рисунок 4.11 — Графики зависящих затрат по вариантам при различных значениях соотношения пересадочного пассажиропотока и потока пригородных пассажиров, следующих в район вокзала ( $l_{тр} = 15$  км,  $l_{жд} = 40$  км)

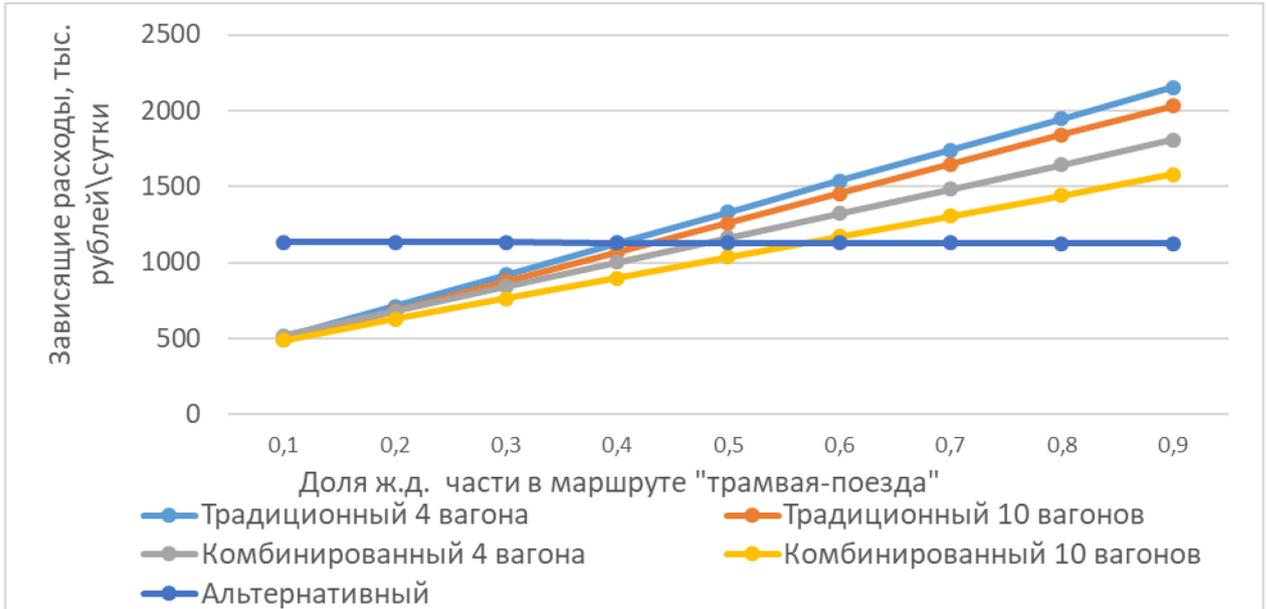


Рисунок 4.12 — Графики зависящих затрат по вариантам при различных значениях доли железнодорожной части в маршруте «трамвай-поезда» (доля пересадочного потока — 0,3;  $l_{жд} + l_{тр} = 30$  км)

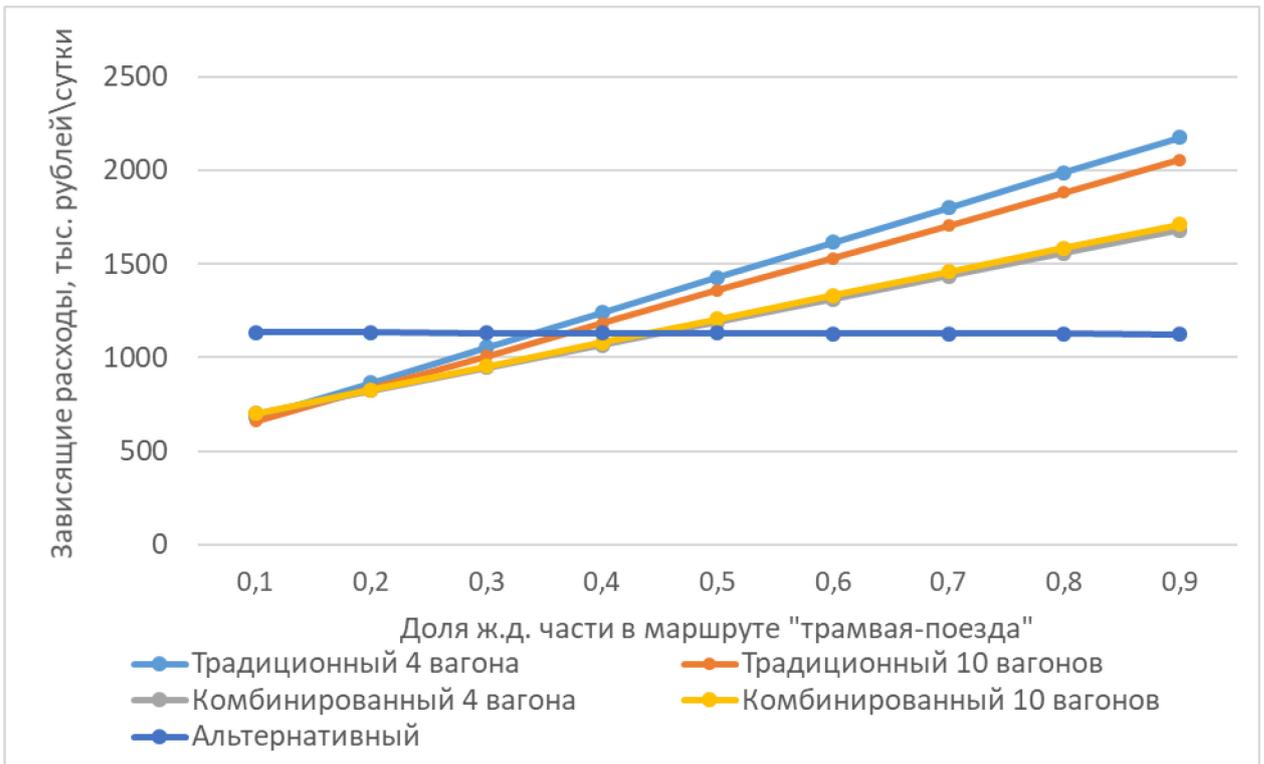


Рисунок 4.13 — Графики зависящих затрат по вариантам при различных значениях соотношения доли железнодорожной части в маршруте «трамвая-поезда» (доля пересадочного потока — 0,5;  $l_{\text{жд}} + l_{\text{тр}} = 30$  км)

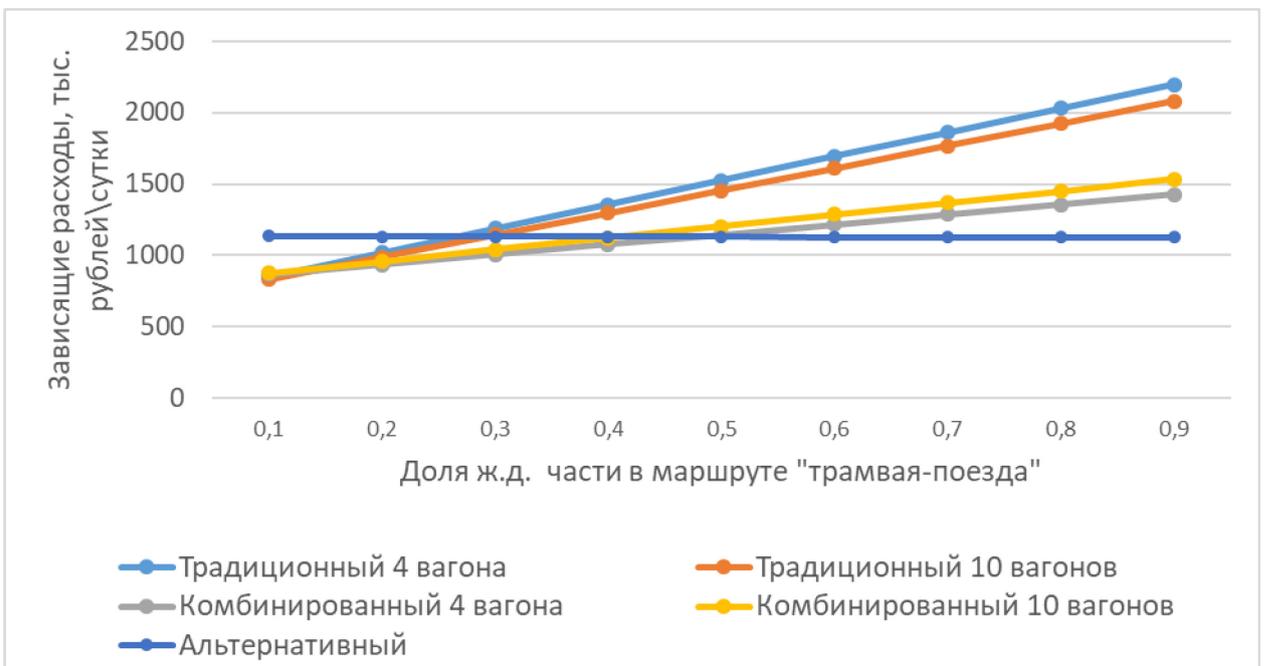


Рисунок 4.14 — Графики зависящих затрат по вариантам при различных значениях соотношения доли железнодорожной части в маршруте «трамвая-поезда» (доля пересадочного потока — 0,7;  $l_{\text{жд}} + l_{\text{тр}} = 30$  км)

На рассматриваемом наборе данных меньшие зависящие расходы на всём рассматриваемом поле значений  $\sigma_{\text{пер}}$  вызывает применение «альтернативного» варианта технологии перевозок пассажиров (см. рисунок 4.11); при применении «комбинированной» варианта технологии кривая зависящих расходов находится между кривыми зависящих расходов по «традиционному» и «альтернативному» вариантам, с тенденцией к уменьшению значения при увеличении  $\sigma_{\text{пер}}$ .

По данным рисунков 4.12 — 4.14, применение «альтернативной» технологии перевозок пассажиров вызывает меньшие зависящие расходы (относительно «традиционной» технологии) в диапазоне значений коэффициента железнодорожной части маршрута ( $\gamma_{\text{жд}}$ ) в общей длине начиная от 0,45–0,6 и выше; применение «комбинированной» технологии перевозок пассажиров вызывает меньшие зависящие расходы начиная от  $\gamma_{\text{жд}} = 0,1$  и выше за счет меньшей энергоёмкости, затрат на оплату труда локомотивных бригад, стоимости обслуживания инфраструктуры.

Графики значений зависящих эксплуатационных затрат и потребных размеров движения поездов при различных комбинациях доли железнодорожной части в маршруте «трамвая-поезда» и доли пересадочного пассажиропотока представлены в Приложении Б. Расчеты по расширенному диапазону данных выявили следующие тенденции:

- 1) с увеличением доли пересадочного потока повышается экономичность «комбинированного» варианта относительно «традиционного»; показатели приближаются к «альтернативному» варианту;
- 2) при  $l_{\text{жд}} = l_{\text{тр}}$  и  $\sigma_{\text{пер}} = 0,1$  — зависящие затраты почти одинаковы по всем вариантам;
- 3) при  $l_{\text{жд}} < l_{\text{тр}}$  — зависящие затраты по «альтернативному» варианту выше «традиционного», а по «комбинированному» варианту ниже «традиционного».

На основании приведенных выше показателей произведен расчет размеров движения (рисунок 4.15) и необходимого парка подвижного состава (рисунок 4.16)

для обеспечения движения поездов по вариантам и в зависимости от потребного объёма пассажиро-мест в сутки.

Для сравнения вариантов по инвестиционным затратам — приобретение нового подвижного состава, строительство трамвайно-железнодорожной соединительной линии — рассчитаны общие потребные инвестиции (их сравнение — рисунок 4.17). На рисунке 4.18 представлено сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров. Данные на рисунках 4.15 — 4.19 приведены при  $\gamma_{\text{жд}} = 0,8$ ;  $\sigma_{\text{пер}} = 0,5$  и на основании показателей таблицы 4.8.

Используя числовые данные из рисунков 4.17 и 4.18, рассмотрим инвестиционные затраты на покупку подвижного состава и инфраструктурные изменения при необходимости предоставления пассажиро-мест в объёме 3000 и 15000 пассажиро-мест/сутки.

Пример расчета. Инвестиционные затраты при 3000 пасс-мест/сутки по «традиционному» варианту (4 вагона ЭП2Д) технологии составляют 284 млн рублей. Зависящие эксплуатационные затраты при этом — 609 тыс. рублей/сутки. По «альтернативному» варианту технологии инвестиционные затраты составят 307 млн рублей, что на 23 млн больше, чем в «традиционном» варианте; зависящие эксплуатационные затраты при этом — 342 тыс. рублей/сутки. Разница в зависящих эксплуатационных затратах составила 267 тыс. рублей/сутки или 8 млн рублей/месяц.

Простой срок окупаемости дополнительных инвестиционных затрат вычисляется по формуле:

$$T^o = \frac{K}{\Pi}, \quad (4.81)$$

где  $K$  — разница инвестиционных затрат, млн рублей;

$\Pi$  — сокращение эксплуатационных затрат, млн рублей/год.

Отношение дополнительных инвестиционных затрат и разницы эксплуатационных затрат между вариантами:  $23/8=2,8 \approx 3$  месяца, что говорит об окупаемости дополнительных инвестиционных затрат.

Расчет простого срока окупаемости при различных исходных данных приводится в таблице 4.9.

Если потребуется предоставить до 15000 пассажиро-мест/сутки, то при использовании «альтернативного» варианта технологии только для маршрута «трамвая-поезда» должно быть выделено 50 пар ниток в ГДП.

При невозможности выделения такого количества графиковых ниток, а также для уменьшения количества незанятых пассажирских мест на городской части маршрута (при  $\sigma_{\text{пер}} = 0,5$  половина пассажиров закончила свою поездку в районе вокзала и покинула «трамвай-поезд») следует рассмотреть применение «комбинированного» варианта технологии, который предусматривает расчет размеров движения поездов и «трамваев-поездов» по схеме (см. рисунок 4.6).

Расчет окупаемости производится только в отношении разницы затрат (инвестиционных и эксплуатационных) между вариантами технологии, так как для обслуживания рассматриваемого маршрута потребуется приобретение нового подвижного состава в связи с полным износом используемого ранее (см. таблицу 4.9, графы 1, 2 и 3).

Далее рассмотрим сценарий, при котором отсутствует необходимость в покупке традиционного подвижного состава (электропоезда, городские трамваи), т.е. инвестиционные затраты состоят только из покупки подвижного состава класса «трамвай-поезд» и строительства гейта. На рисунке 4.19 представлено сравнение вариантов потребных инвестиций в ситуации, когда сохраняется возможность эксплуатации существующего подвижного состава по традиционной технологии. Используя числовые данные из рисунков 4.17 и 4.19, рассмотрим инвестиционные затраты на покупку подвижного состава и инфраструктурные изменения при необходимости предоставления пассажиро-мест в объеме 3000 и 15000 пассажиро-мест/сутки (см. таблицу 4.9, графы 4, 5 и 6).

Полученные значения окупаемости дополнительных инвестиционных затрат находятся в диапазоне от нескольких месяцев до 4 лет. Это говорит об экономической эффективности предложенной технологии перевозки пассажиров.

Таблица 4.9 – Расчет срока окупаемости дополнительных инвестиционных затрат при различных исходных данных проекта

Расчет	1	2	3	4	5	6
1. Предоставляемое кол-во мест, пасс-мест/сутки	3000	15000	15000	3000	15000	15000
2. Инвестиционные затраты по «традиционному» варианту, млн руб.	284*	660**	660**	0	0	0
3. Эксплуатационные затраты по «традиционному» варианту, тыс. рублей/сутки	609*	2684**	2684**	609*	2684**	2684**
4. Сравнимый вариант технологии	«альтернативный»	«альтернативный»	«комбинированный»	«альтернативный»	«альтернативный»	«комбинированный»
5. Инвестиционные затраты по сравниваемому варианту технологии, млн руб. (см. рисунок 4.17 и 4.19)	307	1027	1007	307	1027	547
6. Разница инвестиционных затрат, млн руб. (разница строк 5 и 2) <i>K</i>	23	367	347	307	1027	547
7. Эксплуатационные затраты по сравниваемому варианту технологии, тыс. рублей/сутки (см. рисунок 4.18)	342	1666	2240	342	1666	2240
8. Разница эксплуатационных затрат, тыс. рублей/сутки (разница строк 3 и 7),	267	1018	444	267	1018	444
9. Разница эксплуатационных затрат, млн рублей/год, <i>П</i>	97,45	371,57	162,10	97,45	371,57	162,10
10. Срок окупаемости по формуле (4.81), лет	0,25	0,99	2,1	3,1	2,8	3,4

\*по «традиционному» варианту (4 вагона ЭП2Д).

\*\*по «традиционному» варианту (10 вагонов ЭП2Д).

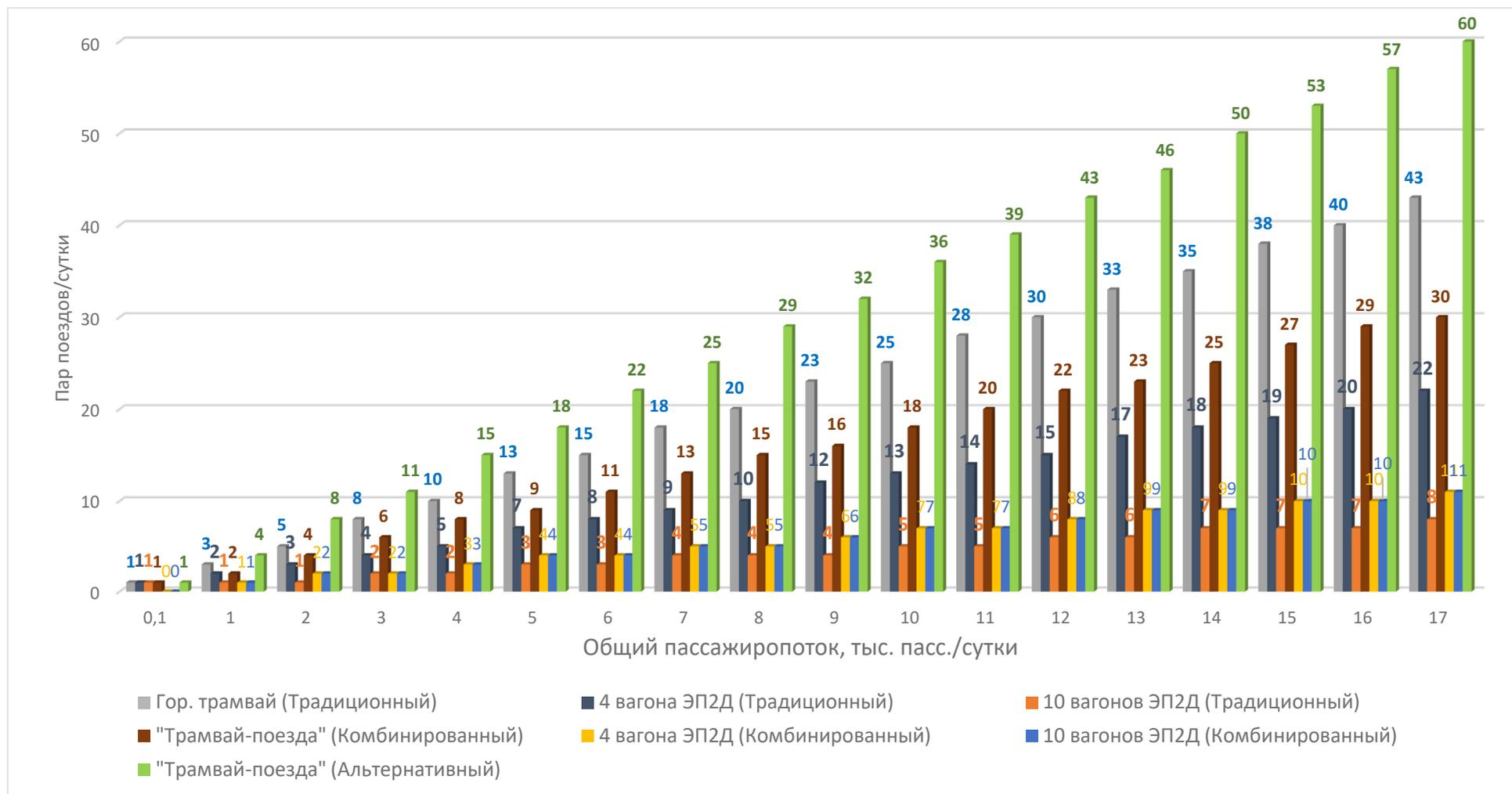


Рисунок 4.15 — Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки

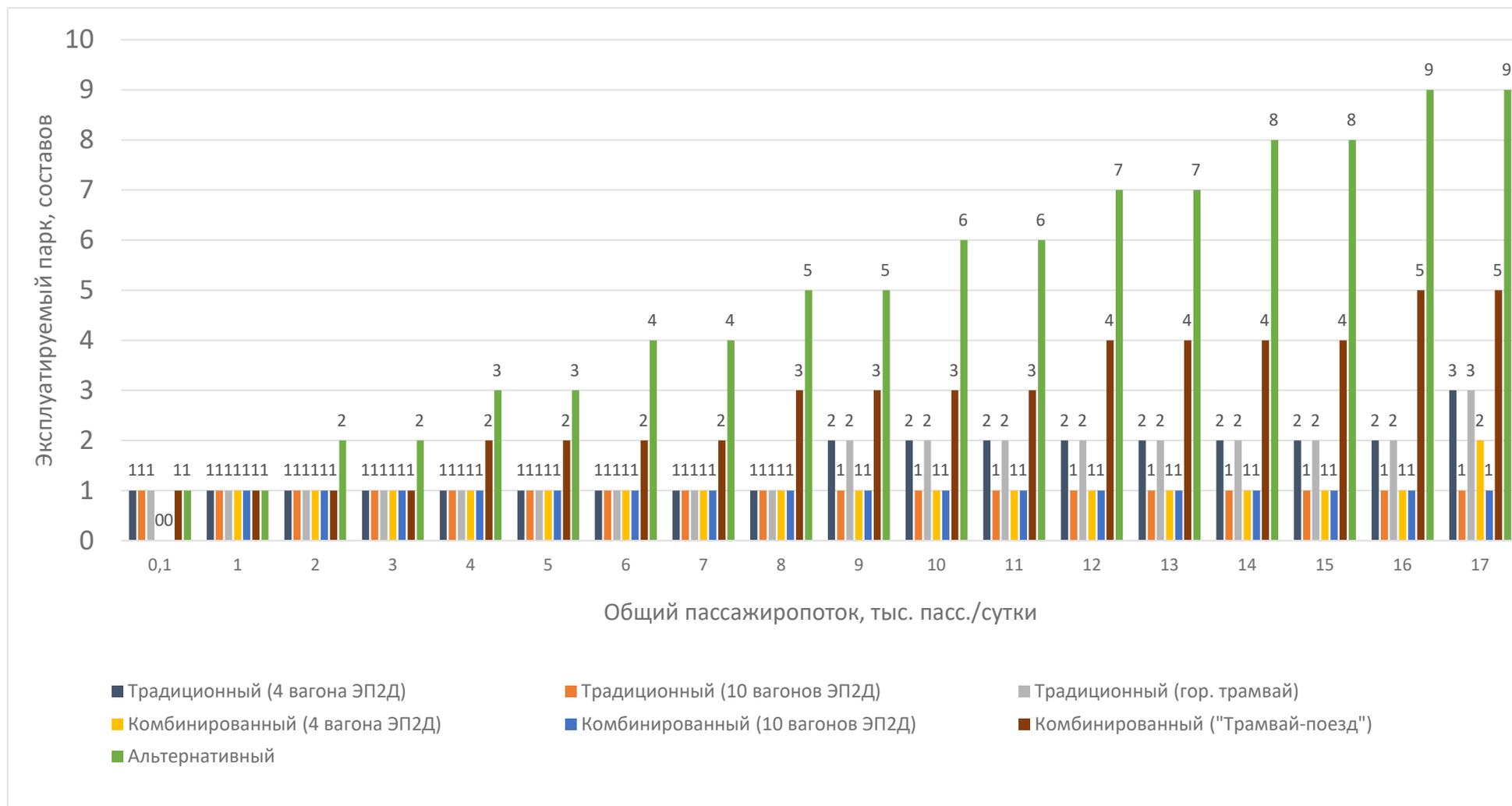


Рисунок 4.16 — Потребное количество подвижного состава для обеспечения движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров

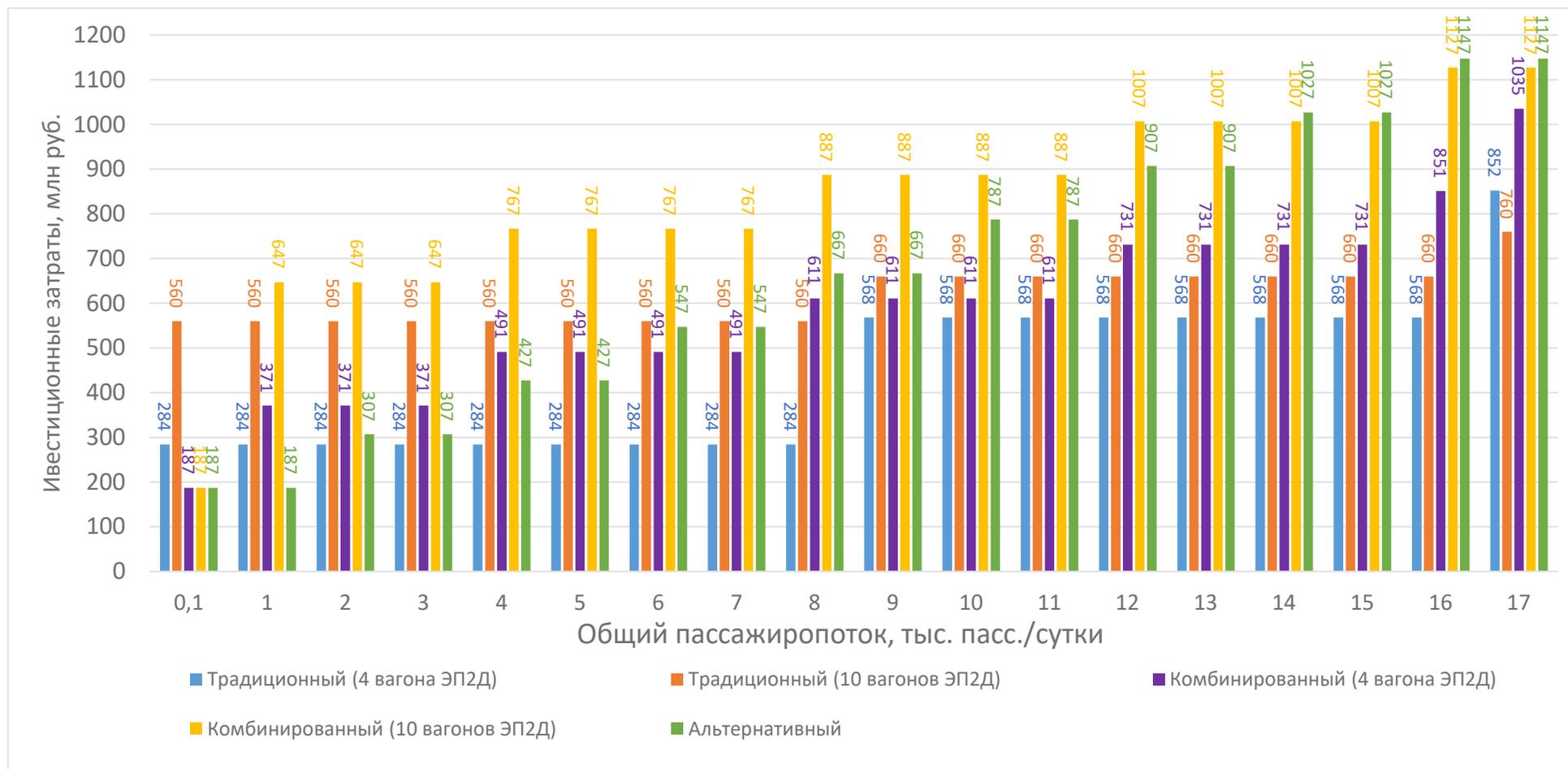


Рисунок 4.17 — Требуемые инвестиции по вариантам (приобретение нового подвижного состава, строительство трамвайно-железнодорожной соединительной линии)

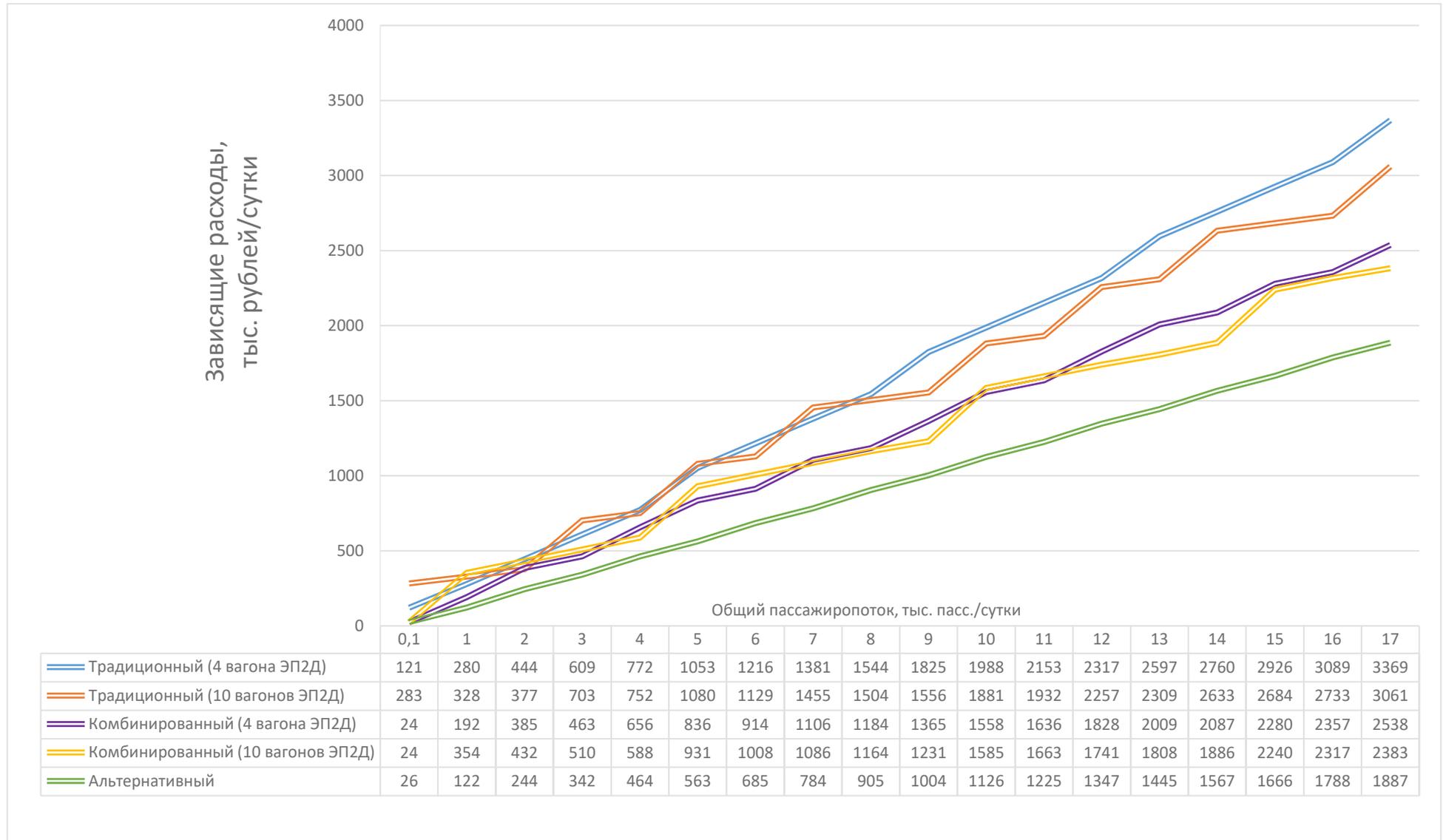


Рисунок 4.18 — Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров

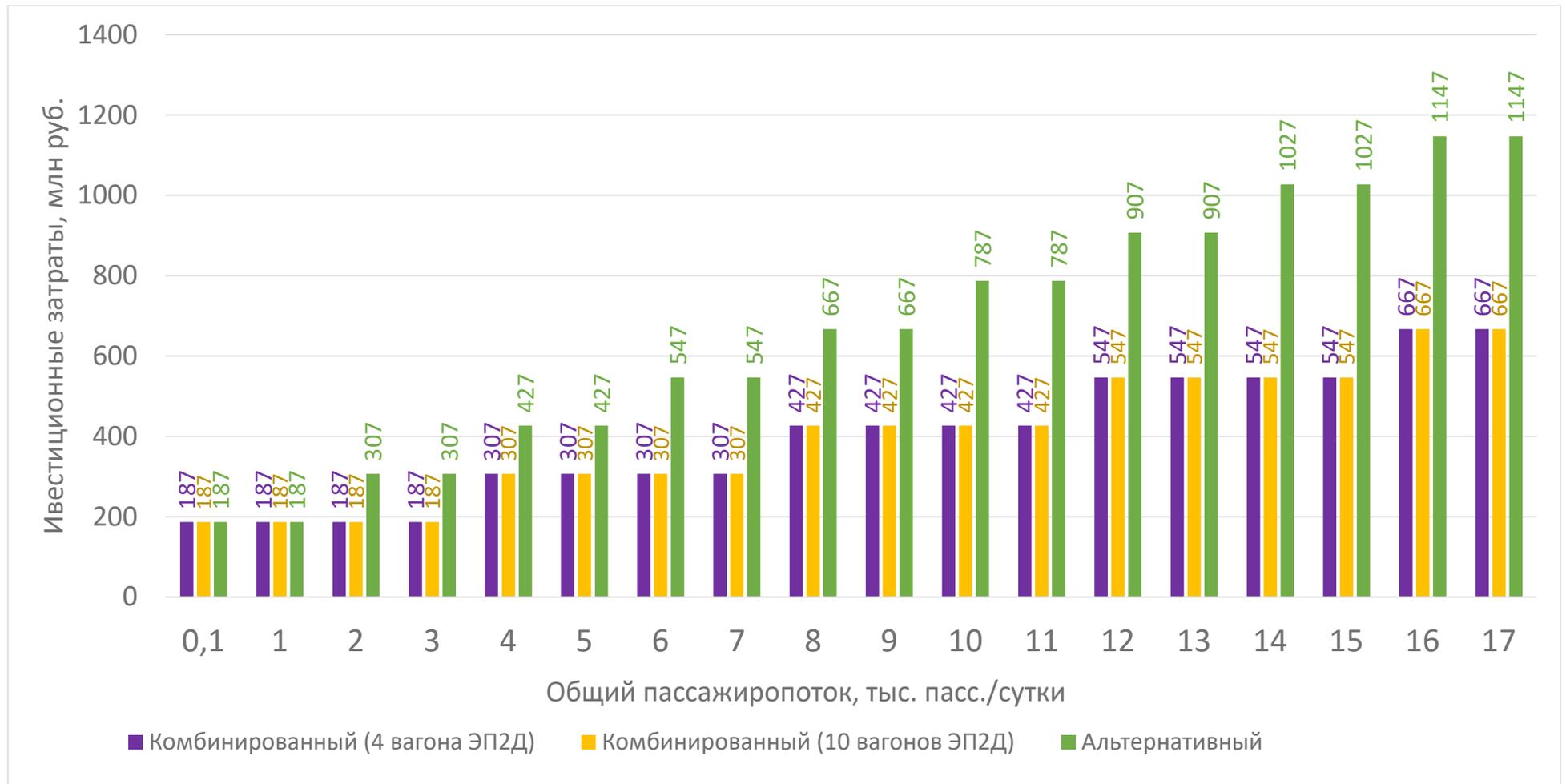


Рисунок 4.19 — Требуемые инвестиции по вариантам (приобретение нового подвижного состава, строительство трамвайно-железнодорожной соединительной линии) при наличии возможности продолжения эксплуатации существующего подвижного состава по традиционной технологии

## Выводы по 4 главе

1. Обоснованы технологические принципы регулирования взаимодействия заказчика перевозок, перевозчиков, владельцев инфраструктур различного вида для организации работы бимодальной рельсовой пассажирской транспортной системы, предусматривающие типовые сценарии, которые с поправкой на местные условия могут быть настроены на любые структуры взаимодействующих предприятий в условиях разных транспортных узлов и агломераций. При этом определен перечень нормативно-технологических и организационно-правовых документов.

2. Бимодальная транспортная система позволяет получить экономический эффект: для перевозчика — за счет меньшей стоимости транспортного средства (легкий подвижной состав), снижения затрат на его обслуживание и эксплуатацию (меньшая энергоёмкость); для владельцев транспортных инфраструктур — за счет общего уменьшения неблагоприятного воздействия на путевое хозяйство; применения нормативов не железнодорожного, а легкорельсового транспорта при строительстве транспортной инфраструктуры и дальнейшей её эксплуатации; уменьшения интервалов движения и др.

3. Влияние применяемой технологии организации пассажирского сообщения на показатели спроса на транспортную услугу по определенному маршруту математически описывается как функция от трёх составляющих: комплексного показателя, характеризующего комфорт поездки по маршруту, стоимости проезда по маршруту и затрат времени на поездку.

4. Для оценки эффективности использования «трамваев-поездов» в городских агломерациях определен порядок расчета и сопоставления натуральных технических показателей пригородно-городских транспортных систем: обычных пригородных поездов и «трамваев-поездов», включая размеры движения, обороты и парк подвижного состава, явочный контингент локомотивных бригад (водителей), расход энергоресурсов на тягу поездов и собственные нужды подвижного состава.

5. Расходные и доходные показатели в пригородно-городских транспортных системах сгруппированы по принадлежности к субъектам транспорта: перевозчики, владельцы инфраструктур, с расчетом операционных расходов и инвестиций, связанных с мощностью объектов инфраструктуры и подвижным составом; операционных расходов, связанных с простоями, обработкой и продвижением транспортных потоков; взаимных платежей участников перевозочного процесса.

6. Методические положения по отбору потенциальных транспортных узлов для внедрения системы «трамвай-поезд» предусматривают две группы критериев: 1) критерии, несоблюдение которых обеспечивает отсев объектов, не имеющих перспективы исследования и проектирования — наличие регулярных пригородных перевозок и устойчивого пассажиропотока; численность населения города (агломерации) — перспективный пассажиропоток; расположение железнодорожного вокзала и остановочных пунктов железной дороги на отдалении от центров городской активности; 2) анализ объектов, соответствующих первой группе — наличие сети городских улиц (их конфигурация), подходящих для организации эффективных маршрутов «трамвая-поезда»; наличие электрификации прилегающего к городу участка железной дороги с пригородным сообщением.

7. Проведено сопоставление прямых зависящих операционных расходов для перевозки пассажиров по трем вариантам технологии: 1) «традиционный» — электропоезд и городской трамвай; 2) «комбинированный» — электропоезд и «трамвай-поезд»; 3) «альтернативный» — пассажиропоток в направлении город-пригород и обратно полностью осваивается подвижным составом типа «трамвай-поезд».

«Альтернативный» вариант имеет наименьшие зависящие расходы относительно «традиционного» варианта при доле железнодорожной части маршрута в общей длине от 0,45–0,6 и выше. «Комбинированный» вариант имеет наименьшие зависящие расходы относительно «традиционного» варианта при доле железнодорожной части маршрута в общей длине от 0,1 и выше.

На рассматриваемом наборе данных значения окупаемости дополнительных инвестиционных затрат находятся в диапазоне от нескольких месяцев до 4 лет. Это

говорит об экономической эффективности предложенной технологии перевозки пассажиров.

8. Результирующие решения в конкретных проектах будут диктовать необходимые инвестиции в подвижной состав и инфраструктуру с учетом существующего баланса парков подвижного состава взаимодействующих видов транспорта. При этом ограничения, накладываемые максимальной и минимальной величиной осваиваемого пассажиропотока, в свою очередь, зависят от величины наличной пропускной способности железнодорожной инфраструктуры и возможности её выделения для движения «трамваев-поездов».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ основных факторов, влияющих на эффективность перевозочного процесса и обслуживания пассажиропотоков при внедрении беспересадочных бимодальных транспортных систем. Преимуществами бимодальной пассажирской транспортной системы «трамвай-поезд» являются экономия времени пассажиров и улучшение связанности территорий, меньшая капиталоемкость и энергоемкость подвижного состава, использование существующих рельсовых инфраструктур с уменьшением потребности в дополнительном путевом развитии и в усилении мощности транспортно-пересадочных узлов. Однако, при этом требуется разработка и строительство специального подвижного состава, устройство примыканий к железнодорожной сети, разработка технологии и организационно-правовых механизмов взаимодействия участников перевозочного процесса.

2. Сформулированы эксплуатационные требования к инфраструктуре, подвижному составу, пассажирским обустройствам, системам безопасности движения, диспетчерскому управлению, маршрутной сети, графикам движения поездов в бимодальной транспортной системе «трамвай-поезд», которые включают в себя не только требования, диктуемые нормативными документами взаимодействующих видов транспорта, но и специфические требования бимодальной технологии пассажирских перевозок.

3. Разработана методика расчета пропускной способности железнодорожных линий в условиях интенсивного пассажирского тактового движения поездов, в составе которой определен дополнительный съём пропускной способности, вызываемый некратностью периода такта и расчетного межпоездного интервала. Дополнительный съём тактового поезда находится в диапазоне от 0 до 0,9. Выведены зависимости для оценки влияния тактового движения поездов на пропускную способность линии с непараллельным графиком движения поездов, а также на пропускную способность элементов станций.

4. Разработана методика расчета функциональной надежности бимодальной транспортной системы на основе систематизации двух групп факторов (факторы,

влияющие на вероятность безотказной работы системы; факторы, влияющие на тяжесть последствий сбоя в работе системы) и специально разработанной гибридной технологии выполнения имитационных расчетов для определения их значений.

5. Обоснованы технологические принципы регулирования взаимодействия заказчика перевозок, перевозчиков, владельцев инфраструктур различного вида для организации работы бимодальной рельсовой пассажирской транспортной системы, предусматривающие типовые сценарии, которые с поправкой на местные условия могут быть настроены на любые структуры взаимодействующих предприятий в условиях разных транспортных узлов и агломераций. При этом определен перечень необходимых нормативно-технологических и организационно-правовых документов.

6. Разработаны методические положения по отбору потенциальных транспортных узлов на территории Российской Федерации для внедрения систем «трамвай-поезд» и методические принципы определения эффективности и сферы применения транспортной системы «трамвай-поезд» для перевозчиков, владельцев инфраструктуры, предусматривающие сравнение вариантов организации маршрутной сети с использованием «трамвай-поездов» или с развитием действующих способов освоения перевозок, с расчетом операционных расходов и инвестиций, связанных с мощностью объектов инфраструктуры и подвижным составом, с простоями, обработкой и продвижением транспортных потоков; взаимными платежами участников перевозочного процесса.

Дальнейшие разработки по теме просматриваются в части разработки юридических аспектов функционирования новой транспортной системы, а также – в случае принятия решения о внедрения системы «трамваев-поездов» в конкретной агломерации – в части детального просчёта экономической эффективности с учетом местных условий. С точки зрения технических наук, дальнейшие разработки по теме диссертационного исследования будут направлены на определение оптимальных параметров взаимодействия экипажной части подвижного состава «трамвая-поезда» с верхним строением пути железной дороги и городского трамвая.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Демографический ежегодник России 2019 [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики – 2020. - URL: [https://gks.ru/bgd/regl/B19\\_16 / Main.htm](https://gks.ru/bgd/regl/B19_16 / Main.htm) (дата обращения 12.06.2021).
2. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г., утв. Распоряжением Правительства от 22.11.2008 № 1734-р (в ред. от 12.05.2018) [Электронный ресурс] - URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009> (дата обращения 12.06.2021).
3. Послание Президента Российской Федерации В.В. Путина Федеральному Собранию Российской Федерации от 21.04.2021 // Российская газета. - 2021. – 21.04.2021. - С.1-2.
4. Концепция по развитию железнодорожной инфраструктуры в целях организации пригородных и внутригородских пассажирских перевозок в Санкт-Петербургском железнодорожном узле. Одобрена Правлением ОАО «РЖД» 09.04.2020, утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» 29.04.2020 №597 совместно с Правительством Санкт-Петербурга и Правительством Ленинградской области. [Электронный ресурс] - URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=188401> (дата обращения 15.02.2021).
5. Николаев К.Ю. Выбор полигона и параметров применения технологии «Трамвай-Поезд» в России // Транспорт Российской Федерации. - 2020. - Т. 90. - №5. - С. 40-44.
6. Николаев К.Ю. Об эксплуатационных параметрах и сферах применения транспортных систем «Трамвай-Поезд» // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV-й Международной. Науч.-практ. Конференции. В 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. И коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Бело-рус. гос. ун-т трансп.; под общ. Ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2018. – С.107-109.
7. Николаев К.Ю. Метод расчета пропускной способности железнодорожных участков с преимущественно пассажирским движением при

организации тактового движения // Третья международная научно-практическая конференция «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, 23–25 октября 2019 г.) : сборник трудов в 2-х ч. / под ред.: А.А.Краснощека, П.К. Рыбина. Ч. 1 : Развитие транспортной инфраструктуры и управление перевозками. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 237-245.

8. Николаев К.Ю. Трамвайно-железнодорожные соединительные линии в бимодальных транспортных системах "трамвай-поезд" // Бюллетень учёного совета АО «ИЭРТ» за 2020 г. / Отв. ред. Я.Ю. Чибряков.– М.: ИЭРТ, 2021. – Вып. 6. – С. 39-51.

9. Николаев К.Ю. Основные требования безопасности в пассажирских бимодальных транспортных системах // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь. Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А.Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 285-288.

10. Кириллова С.Ю., Николаев К.Ю. К определению коэффициентов съема пропускной способности участков железных дорог // Вестник ВНИИЖТ. - 2020. - Т. 79. - №4. - С. 230-238.

11. Бородин А.Ф. Методы оценки показателей надежности в прикладных задачах управления перевозочным процессом / А.Ф.Бородин, К.Ю.Николаев, А.А.Сухов // Восьмая научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование»: Москва. 21 ноября 2019 г.: сборник трудов / под ред.: В.Г.Матюхина, В.И.Строгонова – М.: АО «НИИАС», 2019 – С.110-114.

12. Бранзия Р.Л. Обоснование параметров организации диаметального движения в Московском железнодорожном узле / Р.Л.Бранзия, Н.В.Филаретова, К.Ю.Николаев, И.Ф.Мустафин // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы. IV Межд. Науч.-практ. Конф.: в 2 ч. Ч. 2 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь; Бел. ж. д., Белорус.

гос. ун-т трансп. / под общ. Ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2018. – С. 274-276.

13. Мустафин И.Ф. Перспективы организации пригородно-городского железнодорожного сообщения в Санкт-Петербургском железнодорожном узле / И.Ф.Мустафин, К.Ю.Николаев, Н.В.Филаретова // Современные технологии управления транспортным комплексом России: инновации. / ред. колл.: д.т.н., проф. В.А.Козырев; к.ф.н.Г.В. Черняева; к.э.н. Н.Н. Зенина. [Электронное издание] – М., 2019. – С. 158-162.

14. Петров А.С. Типовые модули имитационного расчета крупных железнодорожных узлов / А.С.Петров, Е.О.Дмитриев, К.Ю.Николаев // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): материалы Двенадцатой междунар. конфер, 1–3 окт. 2019 г.. Москва / под общ. ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна; Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. – М.: Международный научно-исследовательский институт проблем управления РАН, 2019. – С. 633-644.

15. Бородин. А.Ф. Принципы технологии грузового движения в Санкт-Петербургском железнодорожном узле при перспективной организации пассажирских перевозок / А.Ф.Бородин, К.Ю.Николаев, А.С.Петров // Бюллетень учёного совета АО «ИЭРТ» за 2019 г. / отв. ред. Я.Ю. Чибряков. – М.: ИЭРТ 2020. – Вып. 5. – С. 60 – 67.

16. Николаев К.Ю., Петров А.С. Поиск рациональной технологии эксплуатации железнодорожных узлов с помощью методов имитационного моделирования на примере Санкт-Петербургского железнодорожного узла // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. / под общ. ред. А.А.Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 288-292.

17. Бородин А.Ф. Принципы определения эффективных параметров организации движения поездов в пригородно-городском сообщении с учетом дифференциации классов транспортного обслуживания / А.Ф.Бородин,

И.Ф.Мустафин, К.Ю.Николаев // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). - 2021. - Т. 80. - № 2. - С. 108 – 117.

18. Николаев, К.Ю. Технические и технологические требования к системам безопасности и управления движением в бимодальной транспортной системе «трамвай-поезд» / К.Ю. Николаев, Д.И. Хомич // Фёдор Петрович Кочнев – выдающийся организатор транспортного образования и науки в России: Труды Международ. науч.-практ. конф. / Отв. ред. А.Ф. Бородин, сост. Р.А. Ефимов. – М.: РУТ (МИИТ), 2021. – С. 310-319.

19. Иванов М.Д. Московский трамвай. Страницы истории. - М.: Мосгортранс, 1999. - 249 с.

20. Гольцов Н.Н. История Оранэлы - Стрельнинской трамвайной линии. В документах и воспоминаниях. - СПб.: Сударыня, 2006. – 226 с.

21. Конарев Н.С. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия — М.: Большая Российская энциклопедия, 1994 – 559 с.

22. 50 лет Ленинградского трамвая. 1907-1957 / Г. М. Кнерель, Я. Н. Лернер, В. И. Поздеев и др. – М.: Изд-во М-ва коммунального хозяйства РСФСР, 1957.

23. Вучик В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни. - М.: Территория будущего, 2011. - 574 с.

24. Drechsler G. Durchführbarkeitsuntersuchung zur Verknüpfung des Schienenpersonenverkehrs eines Straßenbahnbetriebs und der Deutschen Bundesbahn am Beispiel des Raumes / Georg Drechsler – Karlsruhe: Albtal-Verkehrs-Ges., Karlsruhe, 1985 - 19 s.

25. Ludwig D. Stadtbahn auf Bundesbahngleisen // Eisenbahntechnische Rundschau – 1993 - No. 42 (12) - S. 777-781.

26. Karlsruhe. Regionalplan 1979. - Karlsruhe: Hrsg.RVMO – Regionalverband Mittlerer Oberrhein, 1981. – 14 s.

27. Ludwig D., Drechsler G. Mit der Stadtbahn auf Bundesbahnstrecken. // Eisenbahntechnische Rundschau – 1991 - № 40 (8) – S. 489-496.

28. Karlsruhe. Regionalplan 1993. - Karlsruhe: Hrsg.RVMO – Regionalverband Mittlerer Oberrhein, 1998. – 26 s.
29. Karlsruher Verkehrsverbund (KVV) Verbundbericht 2019/6. Dezember 2020 [Электронный ресурс] - URL: [https://www.kvv.de/suche.html?tx\\_indexedsearch\\_pi2%5Baction%5D=search&tx\\_indexedsearch\\_pi2%5Bcontroller%5D=Search&cHash=fb52ef2df1f2560d398a6393fe2c76bc](https://www.kvv.de/suche.html?tx_indexedsearch_pi2%5Baction%5D=search&tx_indexedsearch_pi2%5Bcontroller%5D=Search&cHash=fb52ef2df1f2560d398a6393fe2c76bc) (дата обращения 01.06.2021).
30. Схема линий рельсового транспорта г. Карлсруэ [Электронный ресурс] - URL: <http://www.urbanrail.net/eu/de/ka/karlsruhe.htm> (дата обращения 01.06.2021).
31. Stadtbahn-Netzausbau. Saarbahn GmbH. – 2014 [Электронный ресурс] - URL: <http://www.saarbahn.de/weiterbau/netzausbau> (дата обращения 01.06.2021).
32. Markus Ph. Straßenbahn Saarbrücken – Riegelsberg // Saarbruecker Zeitung: - 2019 - № - S. 37-52.
33. Von der Dampfbahn zur Niederflurtechnik. Die historischen Meilensteine der Kasseler Verkehrs-Gesellschaft im Überblick / Die Kasseler Verkehrs-Gesellschaft AG [Электронный ресурс] - URL: // <https://www.kvg.de/unternehmen/wir-ueber-uns/geschichte-der-kvg/> (дата обращения 09.06.2021).
34. M. Kochems, D. Höltge: Straßen- und Stadtbahnen in Deutschland. Band 12 Rheinland-Pfalz/Saarland – Freiburg: EK-Verlag, 2011 – 416 s.
35. Zwickau Straßenbahn tram [Электронный ресурс] - URL: // <https://public-transport.net/a/Zwickau> (дата обращения 09.06.2021).
36. Расширение масштабов применения системы трамвай-поезд – Железные дороги мира – 2008, № 8. – С. 44 – 48; оригинал – La Vie du Rail – 2007 - № 3101 - pp. 20-23.
37. Szeged tram-train deliveries underway //Railway Gazette International. Metro report international. 2021 - 22 January [Электронный ресурс] - URL: . <https://www.railwaygazette.com/light-rail-and-tram/szeged-tram-train-deliveries-underway/58342.article>. (дата обращения 02.06.2021).
38. Строительство линии транспортной системы трамвай-поезд в Сегеде // Железные дороги мира - 2020. - № 7. – С. 54–58; оригинал – В. Zelki. Metro Report International. - 2020. -Spring. - P. 24–27.

39. Core Valley Lines Infrastructure Manager // Transport for Wales. 2021 - № 2 – P.20-22.
40. Ferrovie Luganesi tram-train delivered // Railway Gazette International. Metro report international. – 2021 - 1 April [Электронный ресурс] - URL: <https://www.railwaygazette.com/vehicles/ferrovie-luganesi-tram-train-delivered/58817.article> (дата обращения 10. 06. 2021).
41. Guala L. A tram-train service on an existing rail line in Varese, Italy / L.Guala, L.Sciacchitano, G.Arioli: Report // European Transport Conference 2020: 09.09.2020- 11.09.2020 [Электронный ресурс] – URL: <https://trid.trb.org/view/1767466> (дата обращения 12.06.2021).
42. Lach D. The Concept of Using a Dual-System Tramway in the Upper Silesian Agglomeration: 15th Scientific and Technical Conference "Transport Systems. Theory and Practice 2018", Katowice, Poland. 17.09.2018-19.09.2018 [Электронный ресурс] – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Concept-of-Using-a-Dual-System-Tramway-in-the-Lach/da67d0484a33fe539407deca62724c8bdd171bfb> (дата обращения 12.06.2021).
43. Haifa – Nazareth tram-train infrastructure works contracts awarded // Metro report international. - 2020 - 3 November [Электронный ресурс] – URL: <https://www.railwaygazette.com/projects-and-planning/haifa-nazareth-tram-train-infrastructure-works-contracts-awarded /57 713.article> (дата обращения 12.06.2021).
44. История городского электрического транспорта Царицына (1913-1925 г.), Сталинграда (1925-1961 г.). Волгограда (1961-настоящее время) [Электронный ресурс] – URL: <http://www.gortransvolga.ru/about/history/> (дата обращения 12.06.2021).
45. Правдин Н.В., Негрей В.Я. Прогнозирование пассажирских потоков: Методика, расчеты, примеры - М.: Транспорт, 1980. - 222 с.
46. Кочнев Ф.П. Оптимальные параметры пригородных пассажирских перевозок. - М : Транспорт, 1975. - 304 с.

47. Пазойский Ю.О. Оптимизация параметров системы освоения пригородных пассажиропотоков в условиях мегаполиса : дис.. д-ра техн. наук / Ю.О. Пазойский. - М.: МИИТ, 2000. - 491 с.

48. Пазойский Ю.О. Организация пригородных железнодорожных перевозок: учеб. пособие / Ю.О.Пазойский, С.П.Вакуленко, А.В.Колин, Е.В.Копылова, Е.Б.Куликова, М.Ю.Савельев, В.Н.Шмаль; под ред. Ю.О. Пазойского. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. — 270 с.

49. Терзи В.И. Совершенствование организации пригородных железнодорожных перевозок мегаполиса в условиях формирования мультимодальных систем : На примере Новосибирского транспортного узла: дис. ... к-та техн. наук / В.И.Терзи - Новосибирск: Сиб. гос. ун-т. путей сообщ. 2001. - 150 с.

50. Голубев П.В. Выбор параметров пассажирских устройств при организации пригородно-городских перевозок в узле: дис. ... к-та техн. наук / П.В. Голубев. - М.: МИИТ, 2005. - 223 с.

51. Самарцев П.В. Совершенствование организации перевозок пассажиров в крупных городах Сибири и Дальнего Востока. дис. ... к-та техн. наук / П.В. Самарцев. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т путей сообщ., 2005. - 223 с.

52. Азаренкова З.В. Высокоскоростные пригородно-городские сообщения: Учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 2003. – 224 с.

53. Шабарова, Э. В. Железная дорога в городе - М. : Транспорт, 1986. - 223 с.

54. Бещева Н.И. Железнодорожные диаметры в больших городах // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железно-дорожного транспорта. Вып. 75 / Н.И. Бещева. - М.: Трансжелдориздат, 1953. - 199 с.

55. Мурашов В.А. Модернизация системы пассажирских перевозок в Московском железнодорожном узле: организационно-экономический аспект: дисс... канд. экономич. наук/ В.А. Мурашов – М.: Гос. ун-т упр.2011. – 210 с.

56. Бранзия Р.Л. Экономические аспекты организации интермодальных пассажирских перевозок в крупных транспортных узлах: на примере Московского мегаполиса: дисс... канд. экономич./ Р.Л.Бранзия – М: Гос. ун-т упр., 2009. - 155 с.
57. Кондратенко В.В. Модернизация железнодорожных станций и узлов как фактор улучшения пассажирских перевозок в крупных городах России: дисс... канд. эк. наук. / В.В. Кондратенко.– М.: Гос. ун-т упр., 2010. – 155 с.
58. Применение современных математических методов в расчетах по эксплуатации железных дорог: Учеб. пособие /А.К.Угрюмов, Е.М.Муковский, В.А.Кудрявцев, А.П.Романов. - Ленинград : б.и., 1976. - 40 с.
59. Лещинский Е. И. Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте / Е.И. Лещинский – М.: Транспорт, 1977. – 176 с.
60. Акулиничев В.М. Математические методы в эксплуатации железных дорог / В.М.Акулиничев, В.А.Кудрявцев, А.Н.Корешков. - М., Транспорт, 1981 - 224 с.
61. Акулиничев В.М. Проблемы и перспективы использования экономико-математически методов при оптимизации транспортных узлов: сб. науч. тр. / В.М.Акулиничев, П.А.Козлов // Проблемы развития сортировочных станций и узлов – М.: МИИТ – 1983. – С. 13-25.
62. Персианов В.А. Моделирование транспортных систем / В.А.Персианов, К.Ю.Скалов, С.Н.Усков. – М.: Транспорт, 1972. – 208 с.
63. Моисеев Н.Н. Математика ставит эксперимент – М.: Наука, 1979. – 224 с.
64. Мугинштейн Л.А. Имитационное моделирование в задачах организации движения поездов / Л.А. Мугинштейн // Сб. трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» / ОАО «Науч.-исследовательский ин-т ж.-д. трансп.» – М. : Транспорт. 1977. – 176 с.
65. Шапкин, И. Н. Планирование работ по усилению технического оснащения пассажирских технических станций (ПТС) на основе методов теории чувствительности // Труды МИИТ. - Вып. 716. – М.: МИИТ, 1982. – С. 54–56.

66. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы и методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии. // Дисс... докт. техн. наук. - М.: МИИТ, 1988. - 350 с.
67. Тушин Н.А. Системная интеграция в транспортных процессах (теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации): дисс.. д-ра техн. наук. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 291 с.
68. Пермикин В.Ю. Автоматизация структурно-технологической оптимизации железнодорожных станций: дисс... канд. техн. наук / В.Ю. Пермикин. – Екатеринбург: УрГУПС, 1999. – 137 с.
69. Колокольников В.С. Автоматизированное структурно-технологическое исследование железнодорожных станций: дис.. канд. техн. наук / В.С. Колокольников. – УрГУПС, Екатеринбург, 2013. – 151 с.
70. Тимухина Е.Н. Повышение функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях: дисс... докт. техн. наук / Е.Н.Тимухина - Екатеринбург УрГУПС, 2011. - 384 с.
71. Александров А.Э. Расчет и оптимизация транспортной системе с использованием моделей (теоретические основы, методология): Автореферат дисс... канд. техн. наук. Екатеринбург УрГУПС, - 50 с.
72. Слободянюк И.Г. Функциональный подход к моделированию транспортных систем // Транспорт Урала. 2017. – № 2. – С.96-101.
73. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий. Монография / Вакуленко С.П., Колин А.В., Евреенова Н.Ю., Роменский Д.Ю., Голиков К.В.; под ред. С.П. Вакуленко. – М.: ВИНТИ РАН, 2018. – 218 с.
74. Naegeli L. A checklist for successful application of tram-train systems in Europe / L. Naegeli, U. Weidmann, A. Nash // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board - 2012 – December - № 2275 – 19 p.
75. Федеральный закон «О государственно-частном партнерстве, муниципально-частном партнерстве в Российской Федерации и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от

13.06.2015 г. № 224-ФЗ // Собрание законодательства РФ. - 2015. - № 29 (часть I). - Ст. 4350.

76. Федеральный закон «О финансовой аренде (лизинге)» от 29.10.1998 N 164-ФЗ (в ред. от 16.10.2017) // СПС Консультант Плюс. [Электронный ресурс] – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_20780/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_20780/) (дата обращения 20.04.2021).

77. Федеральный закон «О концессионных соглашениях» от 21.07.2005 г. № 115-ФЗ // Собрание законодательства РФ. - 2005. - № 30 (ч. II). - Ст. 3126.

78. ЦППК приобретает в лизинг поезда на 94 млрд рублей // Гудок. – 2019 – 04 февраля [Электронный ресурс] – URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1452149> (дата обращения 15.05.2021) .

79. Мосгортранс получил первые 35 автобусов по контракту жизненного цикла //mos.ru. Официальный сайт мэра Москвы [Электронный ресурс] - URL: <https://www.mos.ru/news/item/14533073/> (дата обращения 12.06.2021).

80. Скиба С.А. Особенности системы правового регулирования вопросов местного значения по организации транспортного обслуживания населения в границах городского округа // Современное научные исследования и инновации. - 2019. - № 5 [Электронный ресурс] - URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/05/89167> (дата обращения 08.06.2021).

81. "Чижик" - первый в России успешный опыт государственно-частного партнерства в сфере легкорельсового транспорта // Транспортная концессионная компания. [Электронный ресурс] - URL: <http://tkk-lrt.ru/project/> (дата обращения 02.03.2021).

82. Лузан С.А. Факторы успеха и ключевые риски в транспортных проектах ГЧП / С.А.Лузан, В.В.Соколов, В.И. Мелешков [Электронный ресурс]. - URL: [http://p3transport.ru/doc/presentations/master-class\\_gchp\\_v\\_transportnoi\\_infrastrukture\\_19092018.pdf](http://p3transport.ru/doc/presentations/master-class_gchp_v_transportnoi_infrastrukture_19092018.pdf) (дата обращения 12.06.2021).

83. Алешина А. Зеленые технологии на ГЧП-тяге // РЖД·Партнер – 2021 - 13–14 июля [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.rzd->

partner.ru/publications/rzd-partner/-13-14-july-2021/zelenye-tekhnologii-na-gchp-tyage-/ (дата обращения 01.06.2021).

84. ГОСТ Р ИСО 14813–1–2011. «Интеллектуальные транспортные системы. Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем». - М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с.

85. Социальный стандарт транспортного обслуживания населения при осуществлении перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом. Утв. Распоряжением Минтранса РФ от 31 января 2017 года N НА-19-р. (с изм. на 10 марта 2021 года) [Электронный ресурс] - URL: <https://docs.cntd.ru/document/456042774> (дата обращения 01.06.2021).

86. Grant H. Transportation and the American people / H. Roger Grant - Bloomington, Indiana: Indiana university press, 2019 - 249 p.

87. Hanson M. The Nature and Magnitude of Social Costs of Urban Roadway Use/ Mark Hanson – N.Y.:US Federal Highway Administration, 1992 – 31 p.

88. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» Решение Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 N 710 // РЖД Партнер Документы. – 2011. - № 16.

89. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утв. приказом *Минтранса России от 21.12.2010 № 286* (в ред. от 25.12.2018) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2011 – № 12.; СПС Консультант Плюс.

90. Правила технической эксплуатации трамвая. Утв. распоряжением Минтранса России от 30.11.01 № АН-103-р. [Электронный ресурс] – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200069134> (дата обращения 03.04.2021)

91. Свод правил 119.13330.2017 Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95 (с Изменением № 1). Утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 12.12.2017 № 1648/пр (ред. от 24.12.2019) // СПС Консультант Плюс.

92. Свод правил 98.13330.2018. Трамвайные и троллейбусные линии. СНиП 2.05.09-90. Утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 20.11.2018 № 735/пр (ред. от 29.12.2020) // СПС Консультант Плюс.

93. Свод правил 395.1325800.2018 Транспортно-пересадочные узлы. Правила проектирования. Утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 21.09.2018 № 609/пр. // СПС Консультант Плюс.

94. ГОСТ 9238-2013 Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений.- М.: Стандартинформ, 2014 – 182 с.

95. Проект технического регламента Евразийского экономического союза "О безопасности легкорельсовых транспортных систем / трамваев" [Электронный ресурс] – URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/1139285574>

96. Чернышевская Ю. Не роскошь, а средство передвижения // РЖД-Партнер. - 2020. - № 9-10 (421-422).- С. 56-58.

97. OpenRailwayMap [Электронный ресурс] - URL: <https://openstreetmap.org> (дата обращения - 18.02.2021).

98. Правдин Н.В., Негрей В.Я. Взаимодействие различных видов транспорта в узлах. – Минск: Вышэйшая школа, 1983. – С. 247.

99. Распоряжение ОАО «РЖД» от 09.11.2009 № 2281р (ред. от 01.10.2010) «Об утверждении Регламента диспетчерского управления движением поездов ОАО "РЖД"». // СПС Консультант Плюс.

100. Московские центральные диаметры // Комплекс градостроительной политики и строительства г. Москвы [Электронный ресурс] - URL: [https://stroi.mos.ru/moskovskiiie-tsientral-nyie-diamietry-stroi\\_mos](https://stroi.mos.ru/moskovskiiie-tsientral-nyie-diamietry-stroi_mos) (дата обращения - 25.02.2021).

101. Методика расчета рациональных границ диспетчерских участков. Утв. ЦД ОАО «РЖД» 23.12.2002. – М., 2002 – 35 с..

102. Постановление Правительства РФ от 20.11.2003 № 703 (ред. от 14.12.2006) «Об утверждении правил оказания услуг по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования» // СЗ РФ. – 2003 - № 47. – Ст.4552.

103. Постановление Правительства РФ от 25.11.2003 № 710 (ред. от 02.10.2021) «Об утверждении Правил недискриминационного доступа перевозчиков к инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования» // СЗ РФ. – 2003 - № 48 – Ст.4680; 2021 - № 41 – Ст. 6982.

104. Роменский Д.Ю., Калинин К.А. Обоснование величины потребного интервала между транспортными средствами в пригородно-городских пассажирских перевозках на примере работы железнодорожных диаметров // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. - 2020. - №3 (47). - С. 81-88.

105. Трисчев Е.В. Повышение устойчивости выполнения графика движения пассажирских поездов на двухпутных линиях, оборудованных автоблокировкой: дисс... канд. техн. наук / Е.В.Трисчев. – М.: Всерос. НИИ ж.-д. трансп., 1995 – 207 с.

106. Шухина Е.Е. Гибридная система интервального регулирования движения поездов для Московского Центрального Кольца / Е.Е.Шухина, В.И.Астрахан, И.А.Парферов, Г.К.Кисельгоф. // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018): Труды седьмой научно-технической конференции. – М.: АО НИИАС, 2018. - С. 31-35.

107. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования. Утв. Приказом Минтранса России от 18.07.2018 № 266. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации – Учредитель: АО «Кодекс». - URL: <http://docs.cntd.ru /document/542629643> (дата обращения - 22.02.2021).

108. Инструкция по определению станционных и межпоездных интервалов с учетом новых средств и методов интервального регулирования движения поездов. Утв. приказом ОАО «РЖД» от 09.12.2016 № 721. – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 32 с.

109. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. Утв. ОАО «РЖД» 10.11.2010 №128 (ред. от 24.01.2019) // СПС Консультант Плюс.

110. Технология управления работой железнодорожных участков и направлений: учебн. пособ. / А.Ф.Бородин, Г.М.Биленко, В.В.Панин и др.; под ред. А.Ф. Бородина и Г.М. Биленко – М.: МИИТ, 2011 – 279 с.

111. Методика проведения исследований проектов развития железнодорожных станций и линий с определением «узких мест», влияния на пропускные и перерабатывающие способности, рациональной технологии и прогнозируемых эксплуатационных показателей с использованием аппарата математического моделирования / ОАО «РЖД»: Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.01.2018 г. № 2р. – М.: ОАО «РЖД», 2018. – 75 с.

112. Козлов П.А. Макромоделирование транспортных узлов / П.А.Козлов, Н.А.Тушин, В.Ю.Пермикин, И.Г.Слободянюк // Железнодорожный транспорт. - 2015. - № 10. – С. 38–40.

113. Бородин А.Ф. Комплексная система организация эксплуатационной работы железнодорожных направлений: дисс... докт. техн. наук. – М.: ВНИИ железнодорожного транспорта, 2000. – 491 с.

114. Методика расчета технологической надежности графика движения грузовых поездов и технико-экономической оценки мер по ее повышению. Утв. ЦД ОАО «РЖД» 30.12.2012. – М., 2012 – 45 с.

115. Тишкин Е.М. Оценка эксплуатационной надежности графика движения поездов // Каретников А.Д., Воробьев Н.А. График движения поездов - М.: Транспорт, 1979. – С. 288 – 295.

116. Грунтов П. С. Эксплуатационная надежность станций. — М.: Транспорт, 1986.- 247 с.

117. Герасимов А.С. Руководство поезвному диспетчеру – М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1944. – 387 с.

118. Правила эксплуатации и обслуживания железнодорожных путей необщего пользования. Утв. Приказом МПС РФ от 18.06.2003 г. № 26 (с изм. на

19.12.2017) // Российская газета (специальный выпуск). - 2003. - № 119/2; СПС Консультант Плюс.

119. Куликова Е.Б., Евреенова Н.Ю. Техничко-технологические особенности работы вокзальных комплексов и транспортно-пересадочных узлов: Учебное пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2020. – 123 с.

120. Нордаль Д. Без машины? С удовольствием! Как сделать общественный транспорт привлекательным: пер. с англ. – М.: Фонд содействия развитию городов «Городские Проекты Ильи Варламова и Максима Каца», 2016. – 188 с.

121. Положение о планово-предупредительном ремонте моторовагонного подвижного состава ОАО «РЖД». Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 19.12.2016 №2585Р «Об утверждении положения о планово-предупредительном ремонте моторовагонного подвижного состава ОАО «РЖД» (ред. от 10.12.2018) // СПС Консультант Плюс.

122. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Утв. Распоряжением Минтранса России от 18.04.2013 № НА-37-р. (в ред. от 25.12.2013) // СПС Консультант Плюс.

123. Методические указания по сравнению вариантов проектных решений железнодорожных линий, узлов и станций / под ред. А.М.Козлова, К.К.Талы - М: Вптитранстрой, 1988. - 235 с.

124. Постановление Правительства РФ «Об утверждении методики оценки социально-экономических эффектов от проектов строительства (реконструкции) и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, планируемых к реализации. с привлечением средств федерального бюджета, а также с предоставлением государственных гарантий и налоговых льгот» от 26.11.2019 г. № 1512 // СЗ РФ – 2019 - № 49 (ч.V) - Ст.7103.

125. Ивушкина Н.В. Социальный эффект инвестиционных процессов: Дисс... канд. экон. Наук / Н.В.Ивушкина. - М.: Ин-т труда М-ва труда и соц. развития РФ, 2001. - 139 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А. Существующие трамвайно-железнодорожные соединительные линии

В данном приложении представлены выкопировки [97] существующих трамвайно-железнодорожных соединительных линий, схематические изображения которых представлены в разделе 2.3.2. На рисунках А.1-А.12 используются следующие условные обозначения: черные, желтые, коричневые и оранжевые линии – железнодорожная инфраструктура, розовые и зеленые линии – трамвайная инфраструктура.

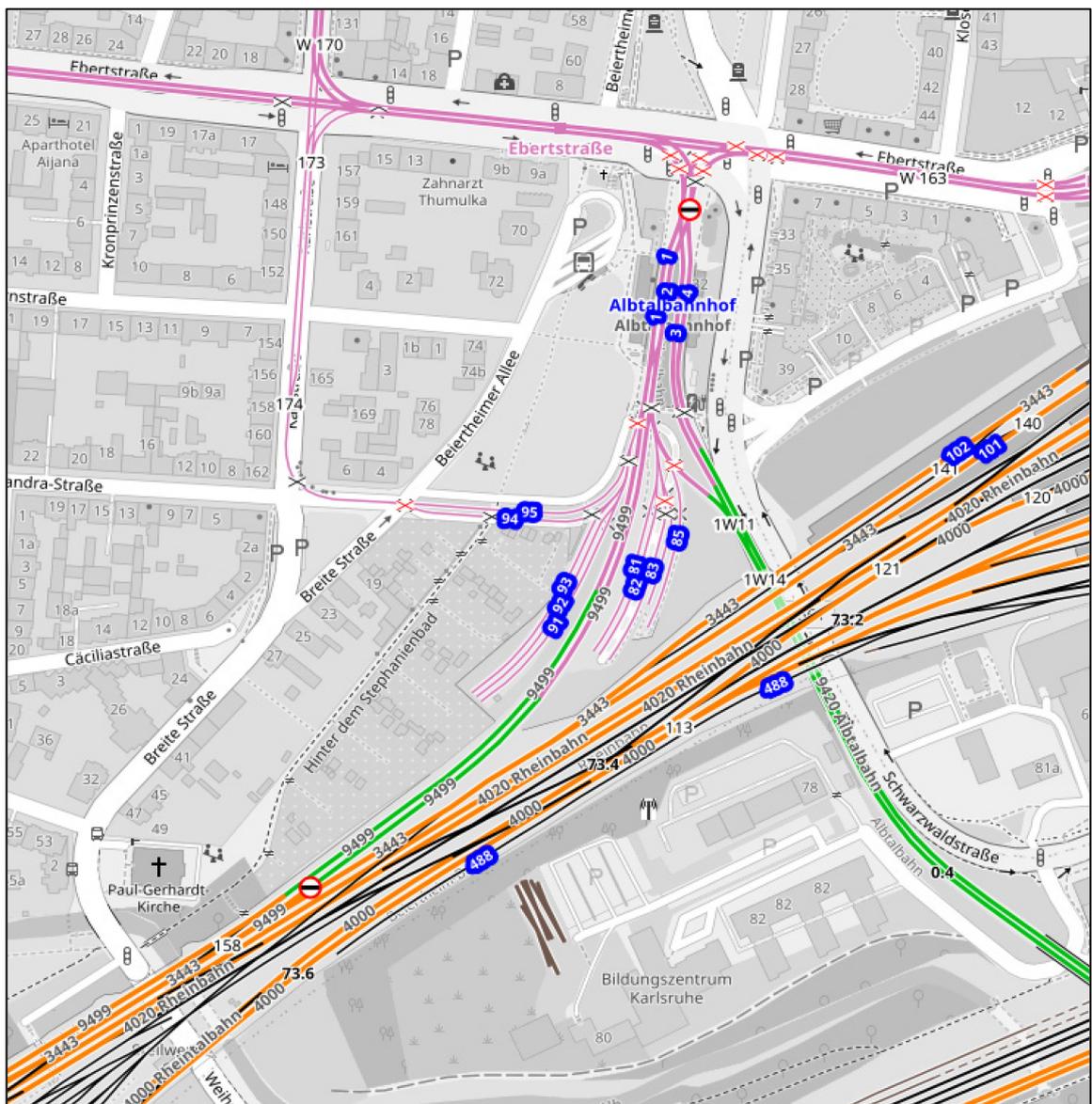


Рисунок А.1 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия на центральной станции г. Карлсруэ

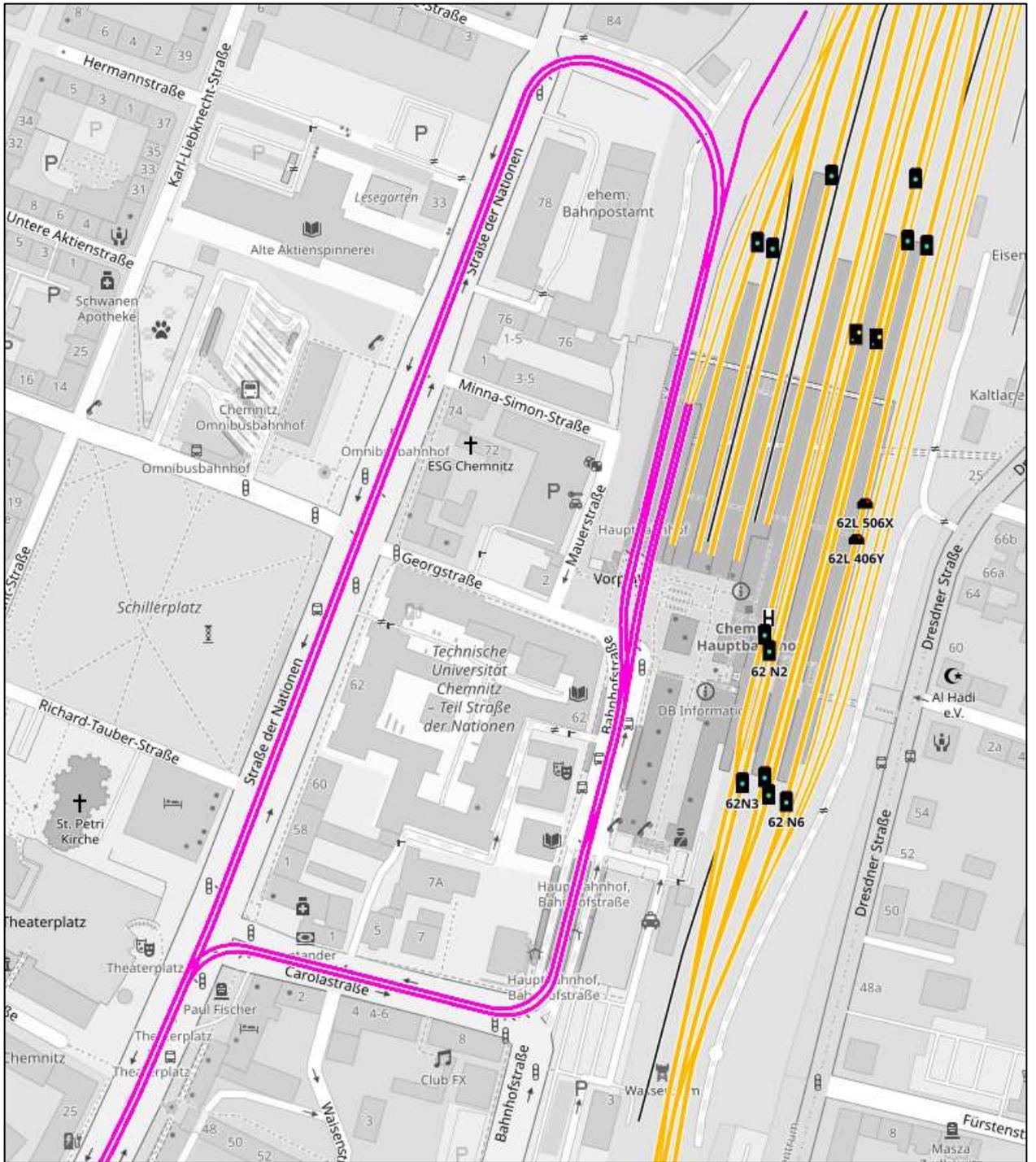


Рисунок А.2 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия на центральной станции г. Хемниц

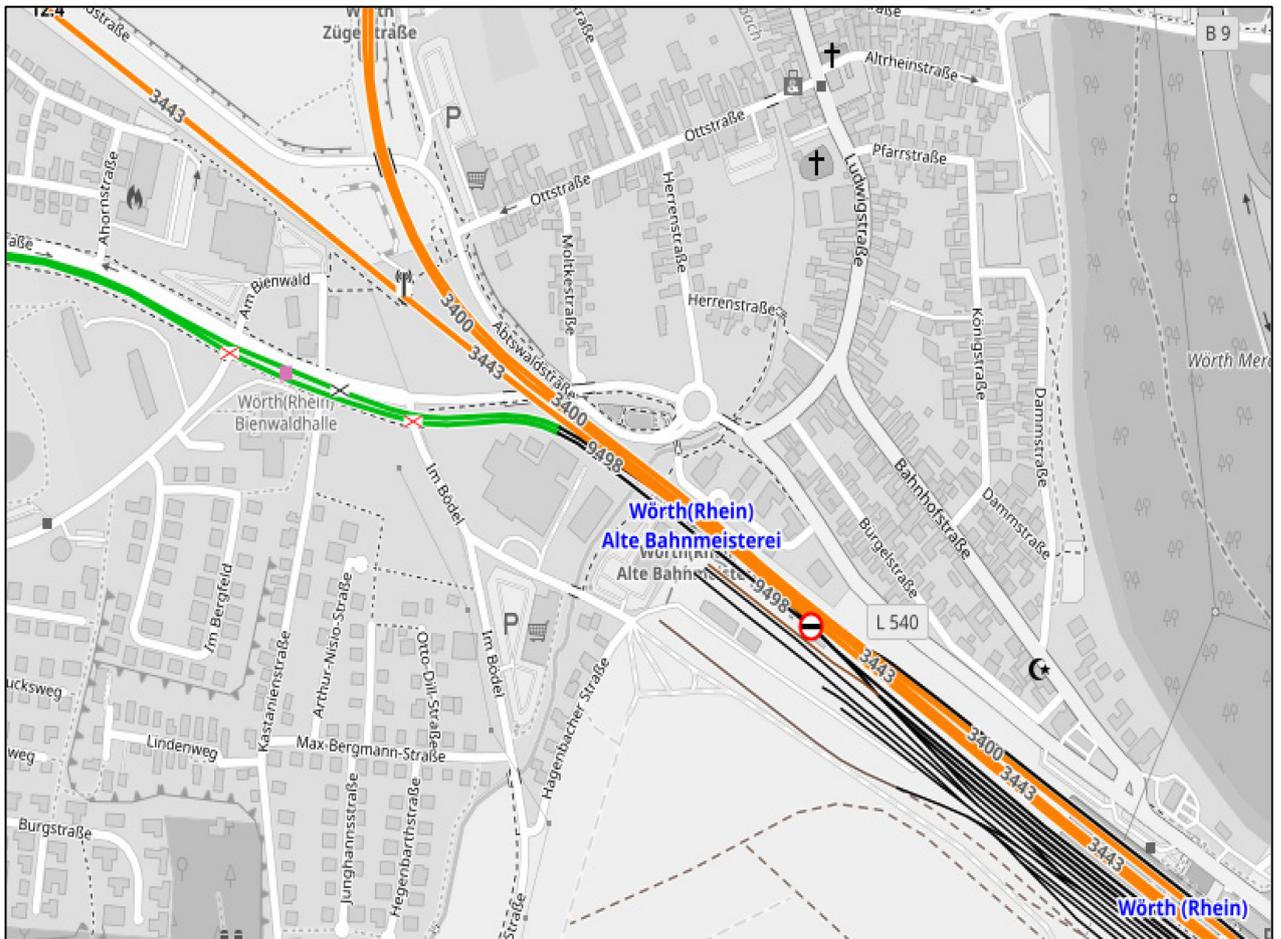


Рисунок А.3 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия в районе остановочного пункта Вёрт-Альт-Банетмайстрай, г. Вёрт-ам-Рейне



Рисунок А.4 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия на центральной станции г. Кассель

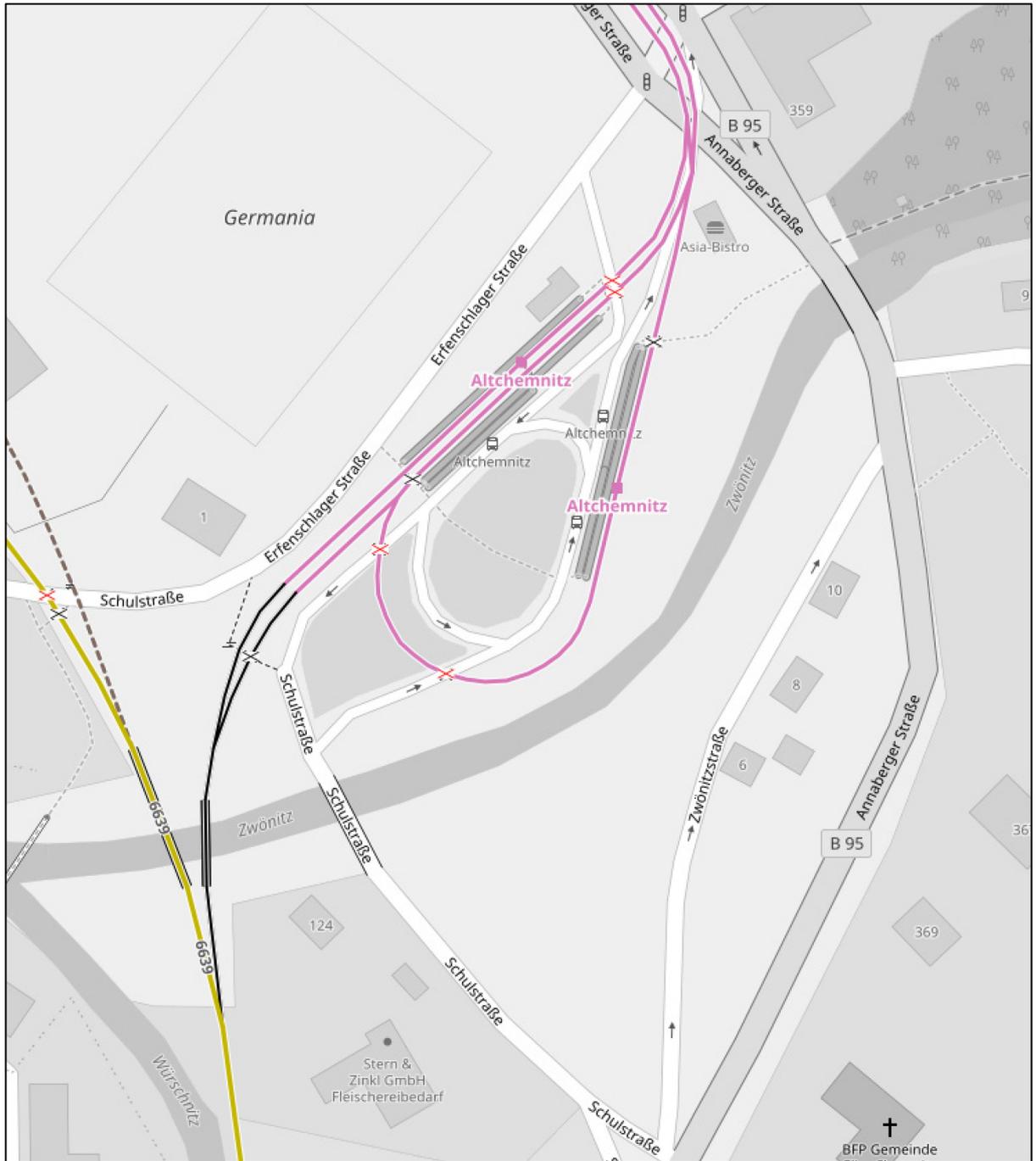


Рисунок А.5 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия в районе остановочного пункта Альтхемниц, г. Хемниц

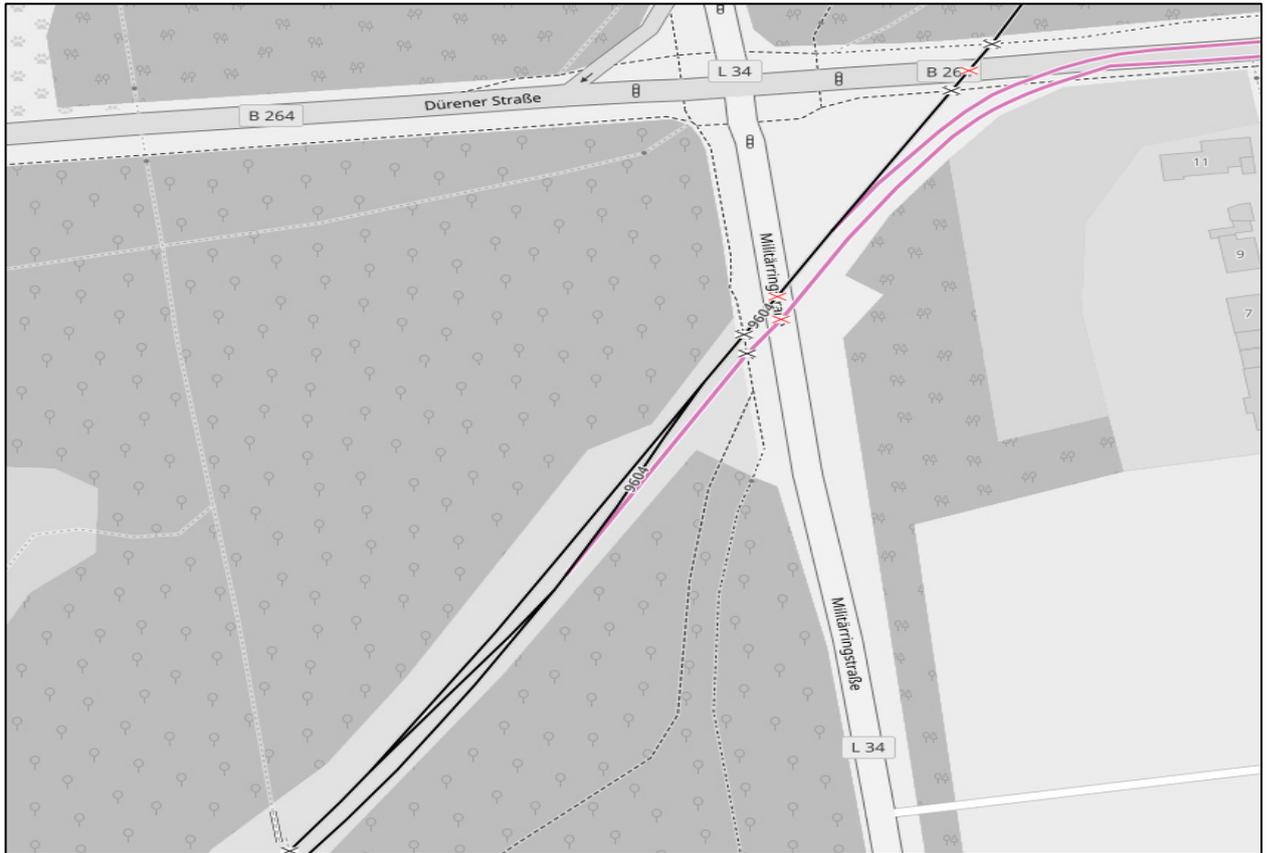


Рисунок А.6 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия в районе Дюрнер-Штрассе, г. Кёльн

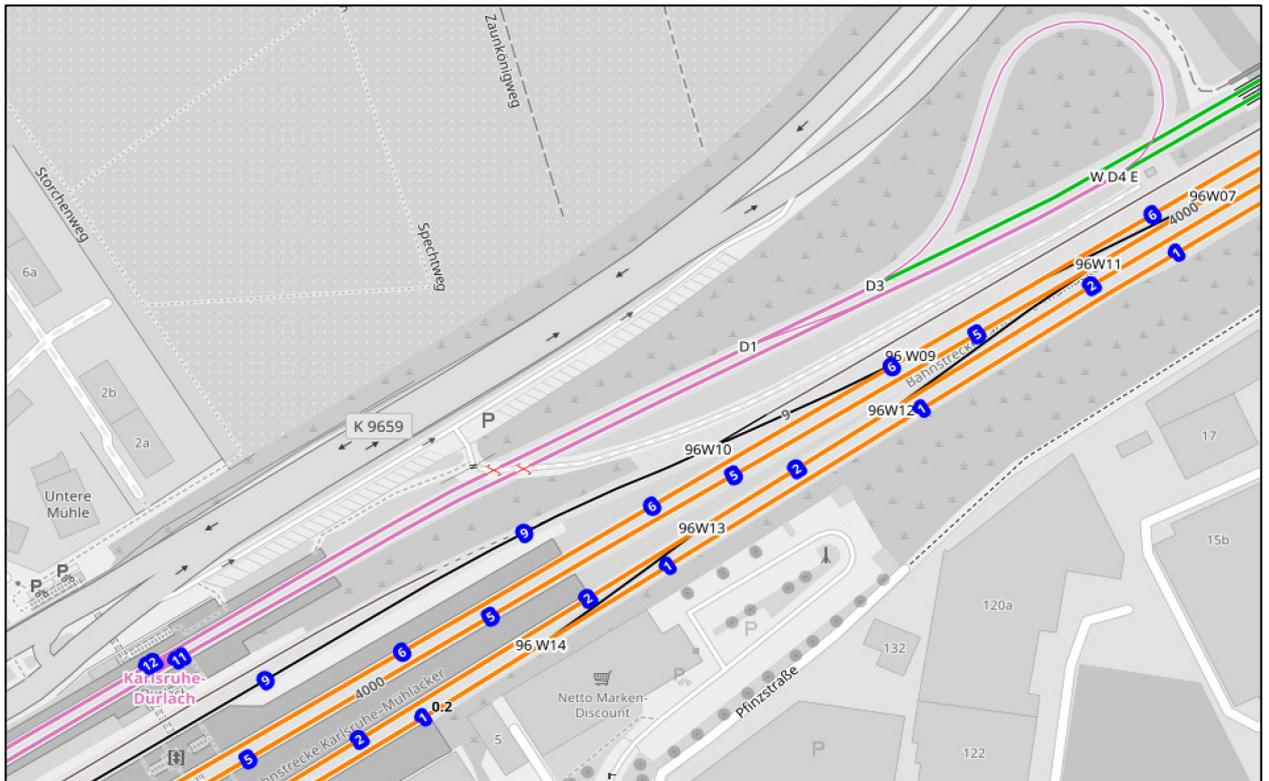


Рисунок А.7 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия в районе остановки Карлсруэ-Дурлах, г. Карлсруэ

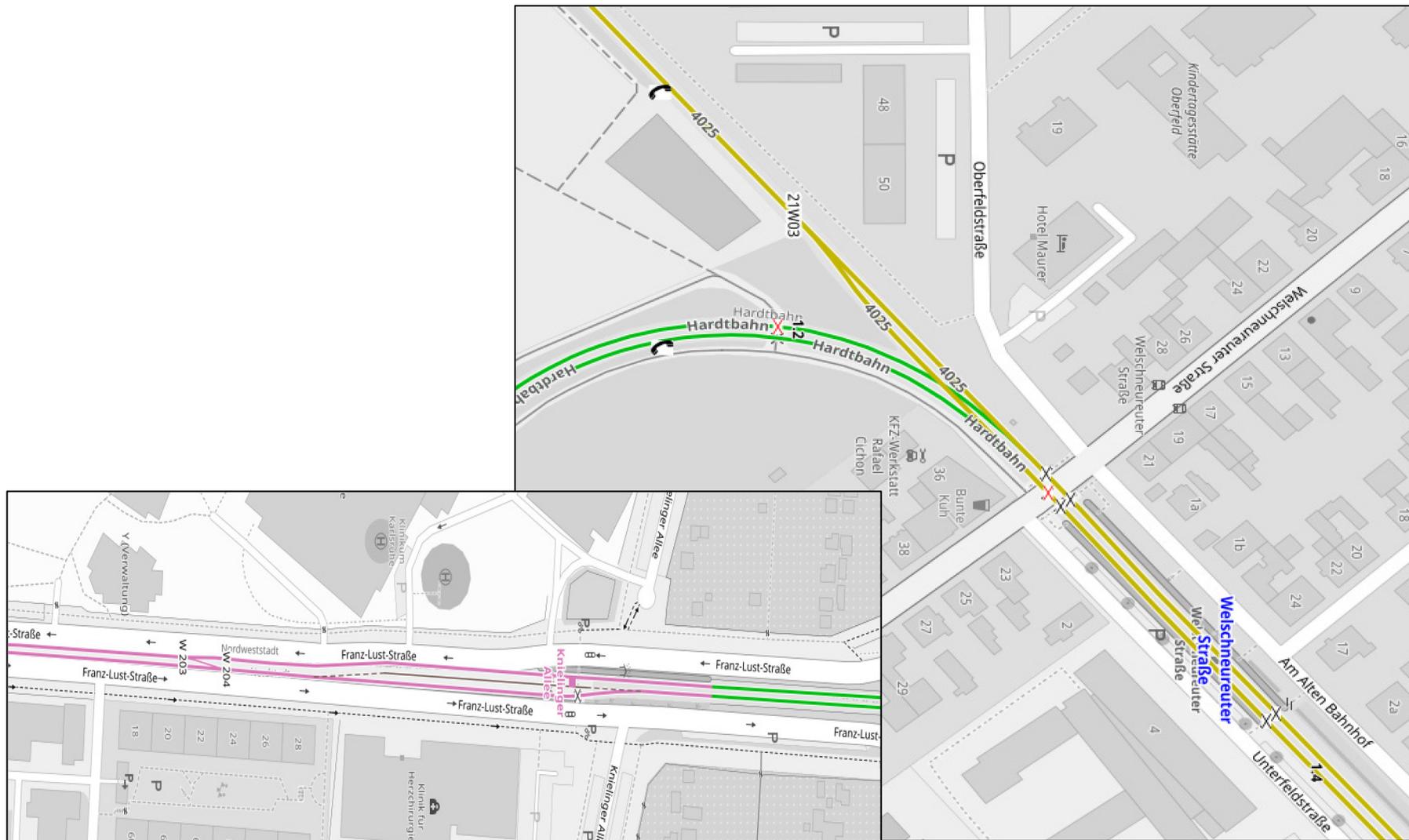


Рисунок А.8 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия между путевыми постами Книленгер-Аллея и Велшнойройтер-Штрассе, г. Карlsruэ

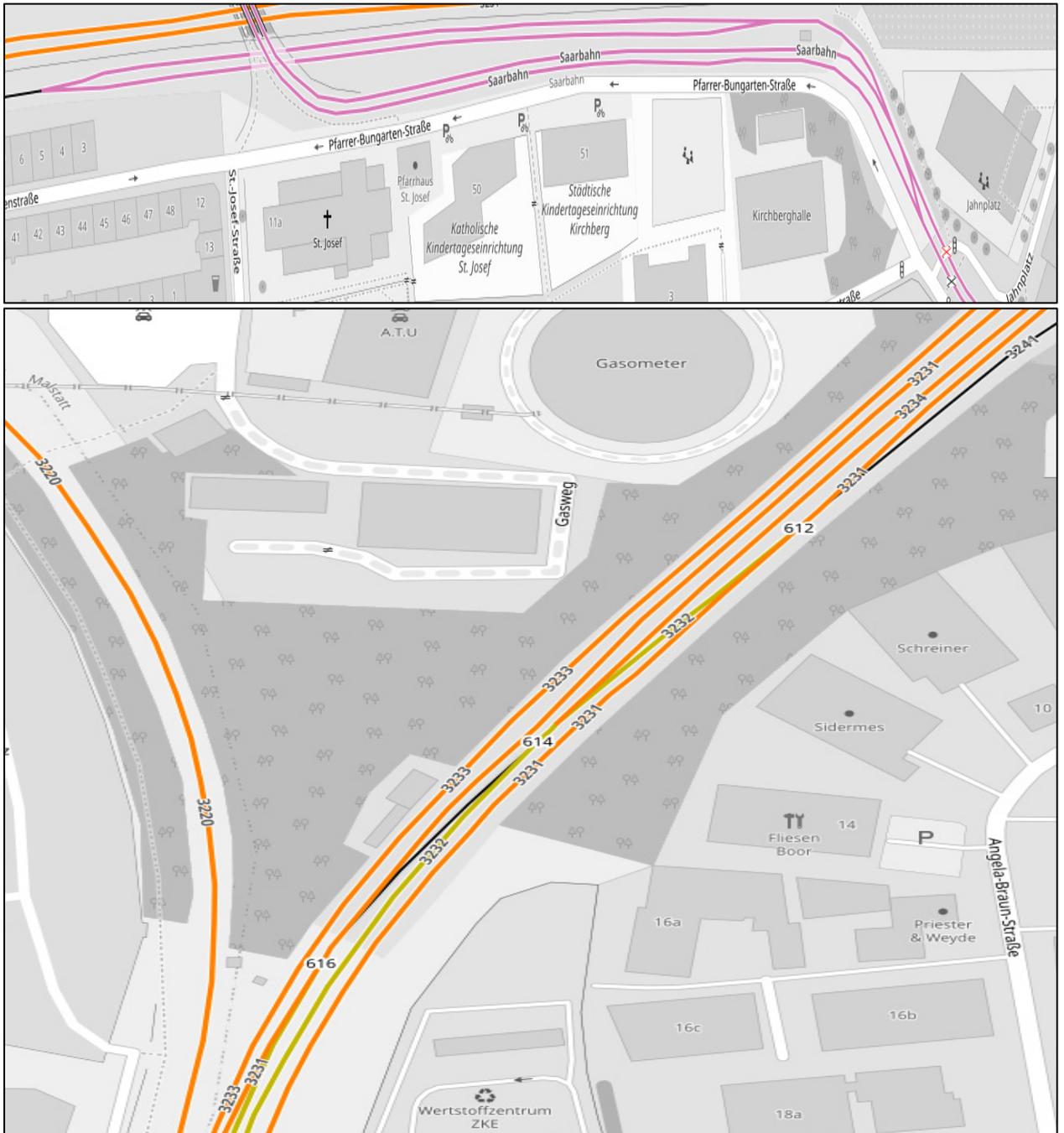


Рисунок А.9 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия в районе улицы Пфarrer-Бунгартен-Штрассе, г. Саарбрюккен

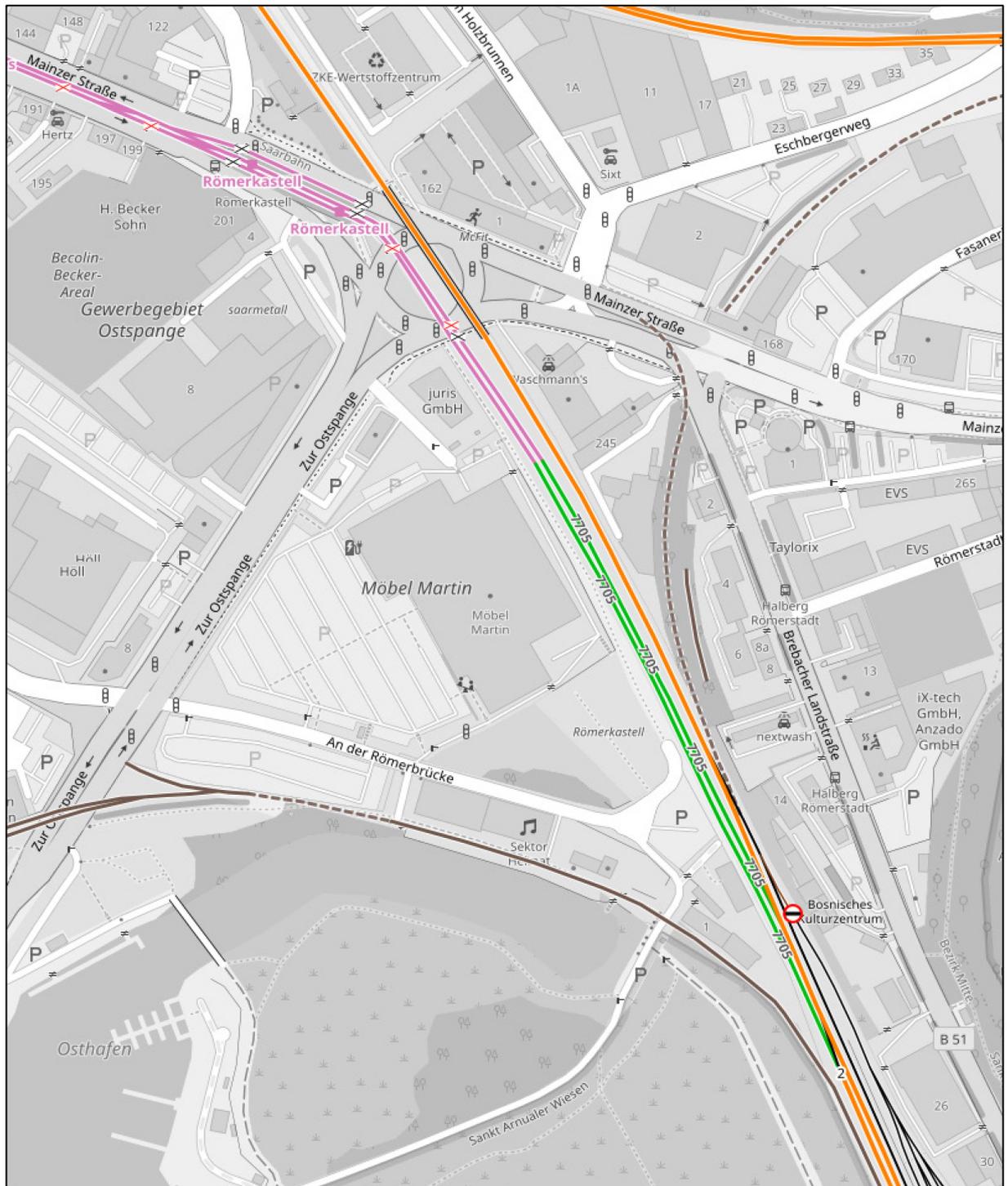


Рисунок А.10 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия в районе остановки Рёмеркастел,, г. Саарбрюккен

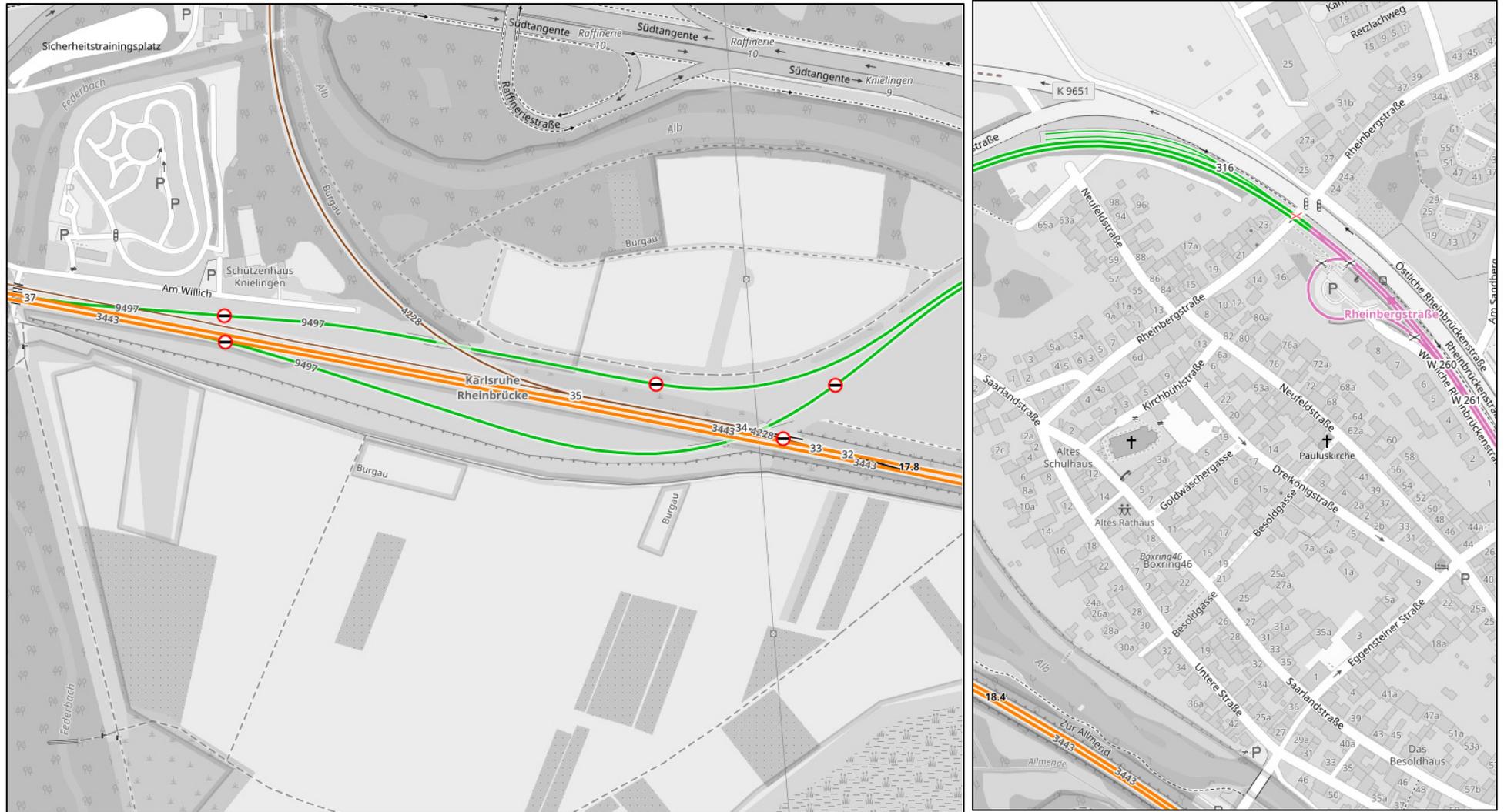


Рисунок А.11 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия в районе остановки Книленген-Райбергштрассе, г. Карlsruэ

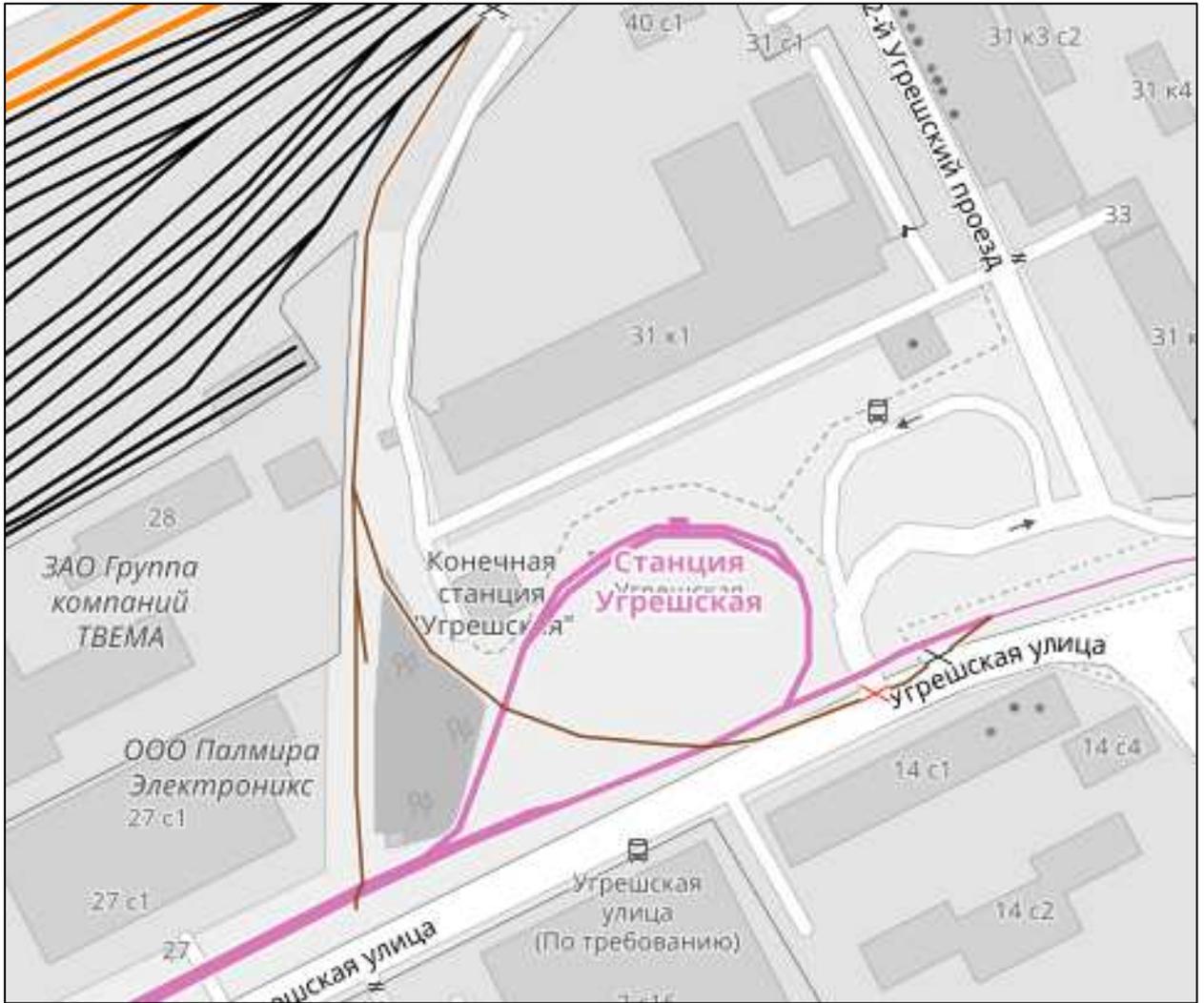


Рисунок А.12 – Трамвайно-железнодорожная соединительная линия на конечной станции Угрешская, г. Москва

## Приложение Б. Графики значений зависящих эксплуатационных затрат и потребных размеров движения поездов

Графики значений потребных размеров движения поездов и зависящих эксплуатационных затрат (рисунки Б.1 – Б.18) при различных комбинациях доли железнодорожной части в маршруте «трамвай-поезда» и доли пересадочного пассажиропотока.

**Вариант 1:**  $l_{\text{жд}} = 24$  км,  $l_{\text{тр}} = 6$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,3$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,8$ .

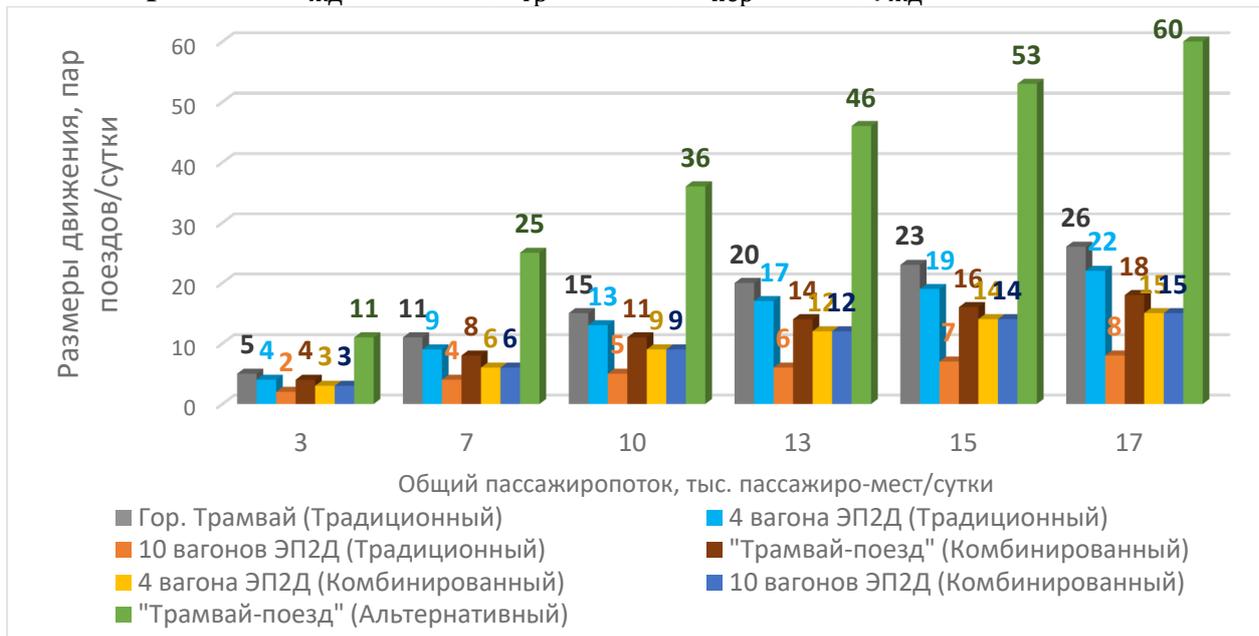


Рисунок Б.1 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 1)

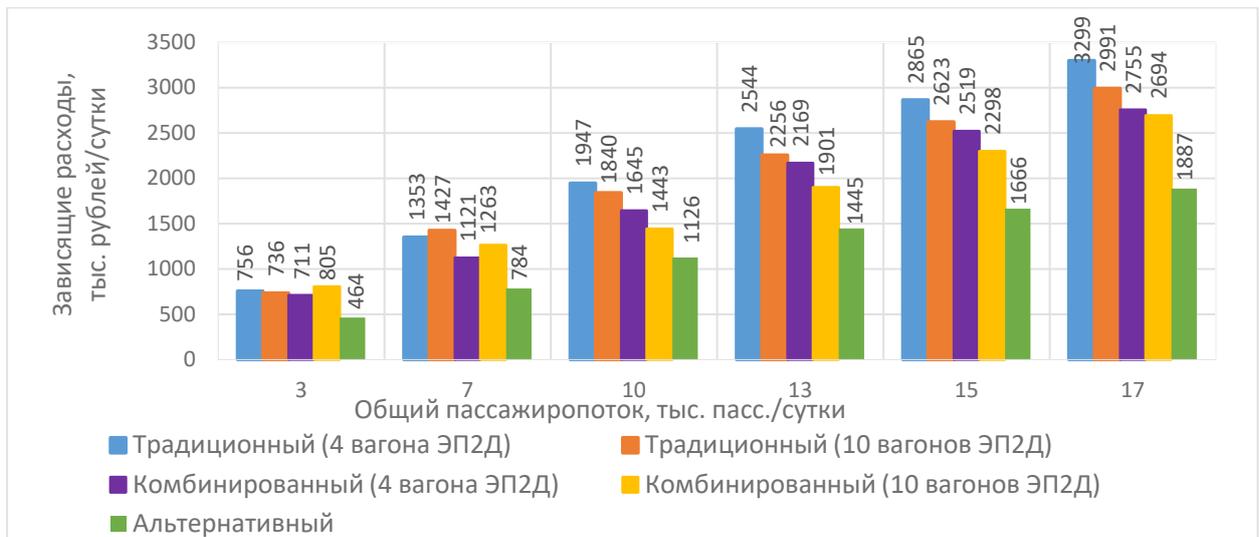


Рисунок Б.2 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 1)

**Вариант 2:**  $l_{\text{жд}} = 24$  км,  $l_{\text{тр}} = 6$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,5$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,8$ .

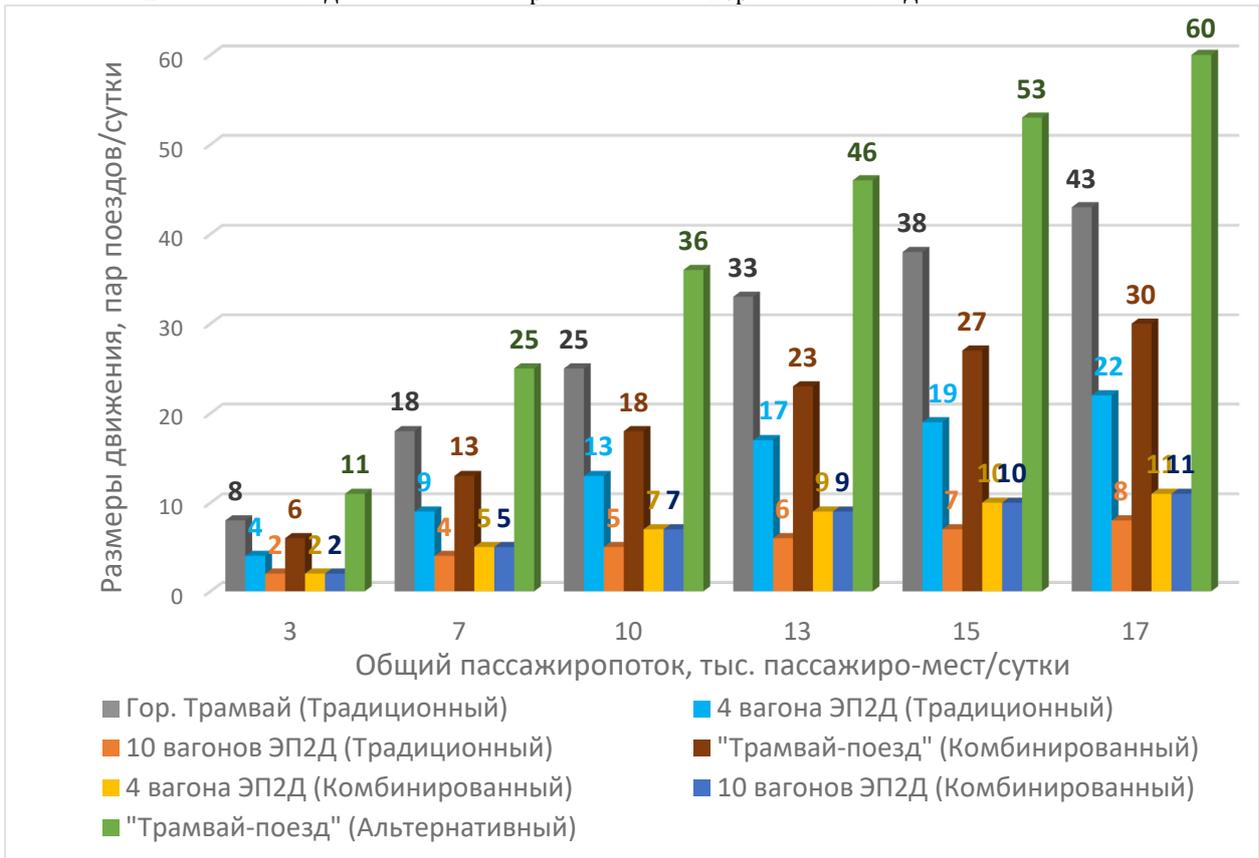


Рисунок Б.3 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 2)

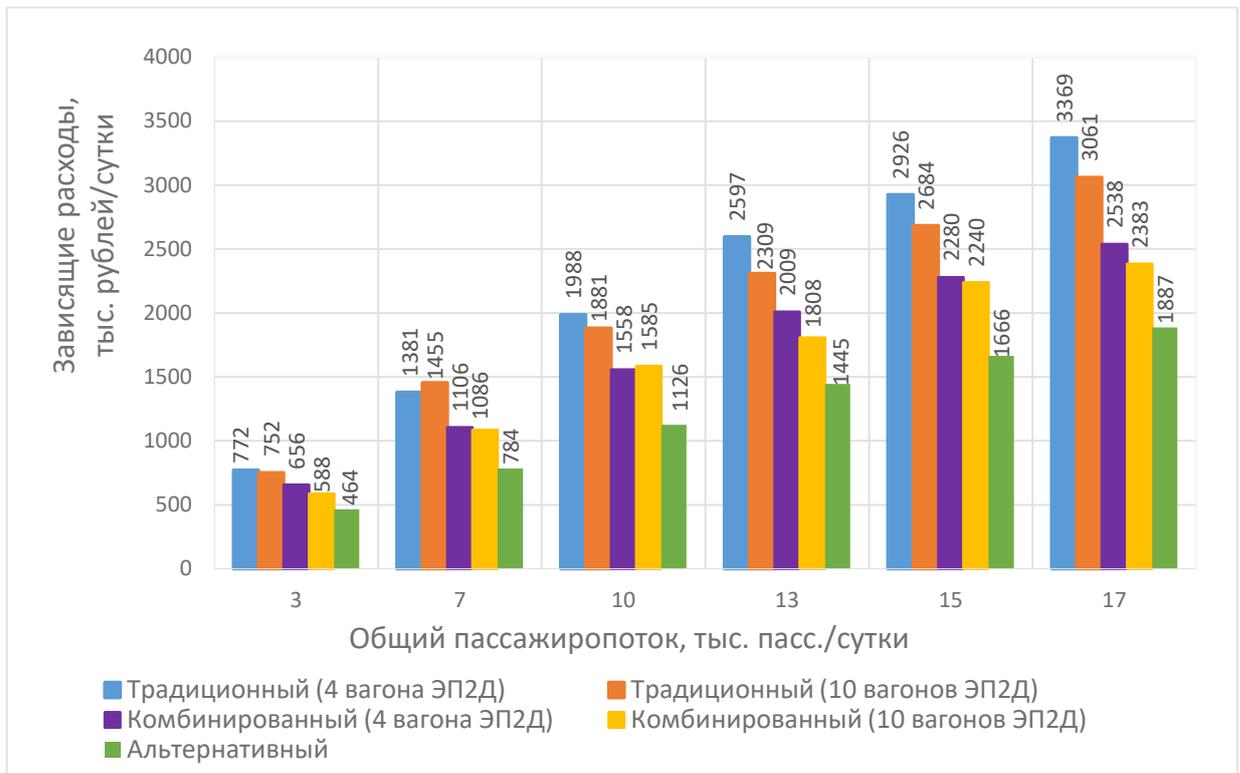


Рисунок Б.4 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 2)

**Вариант 3:**  $l_{\text{жд}} = 24$  км,  $l_{\text{тр}} = 6$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,8$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,8$ .

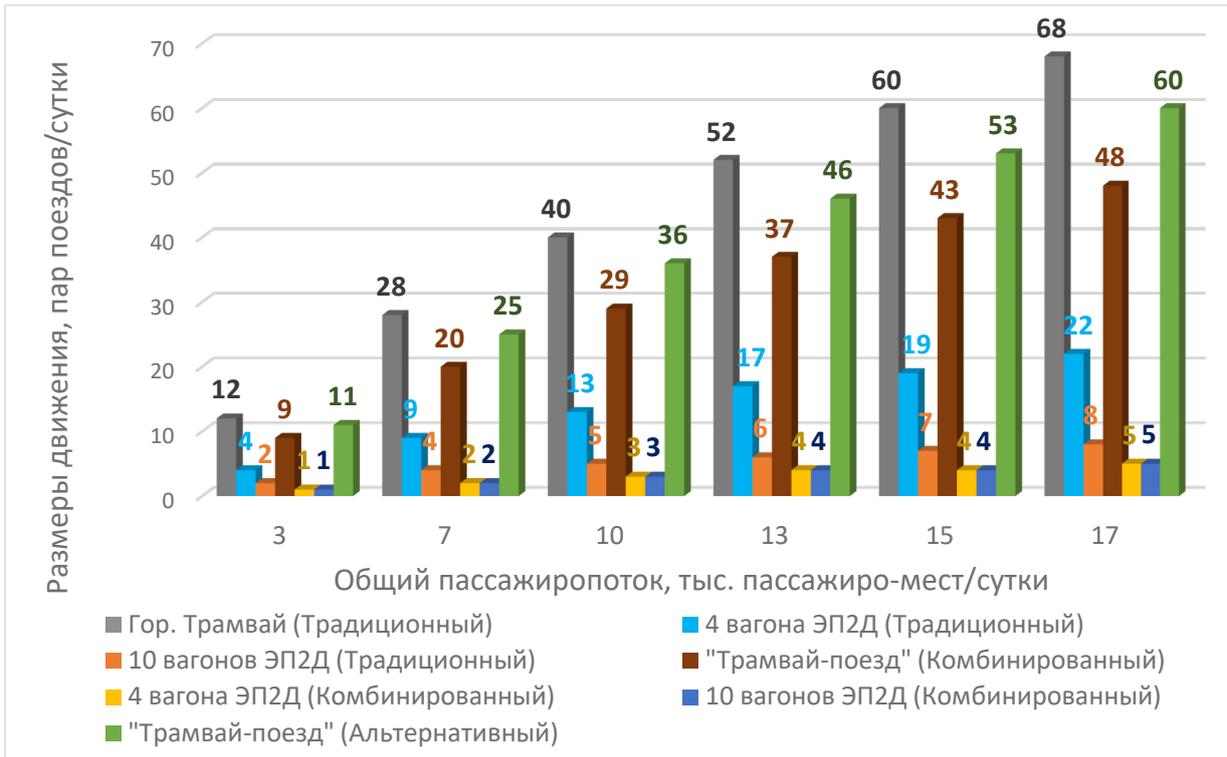


Рисунок Б.5 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 3)

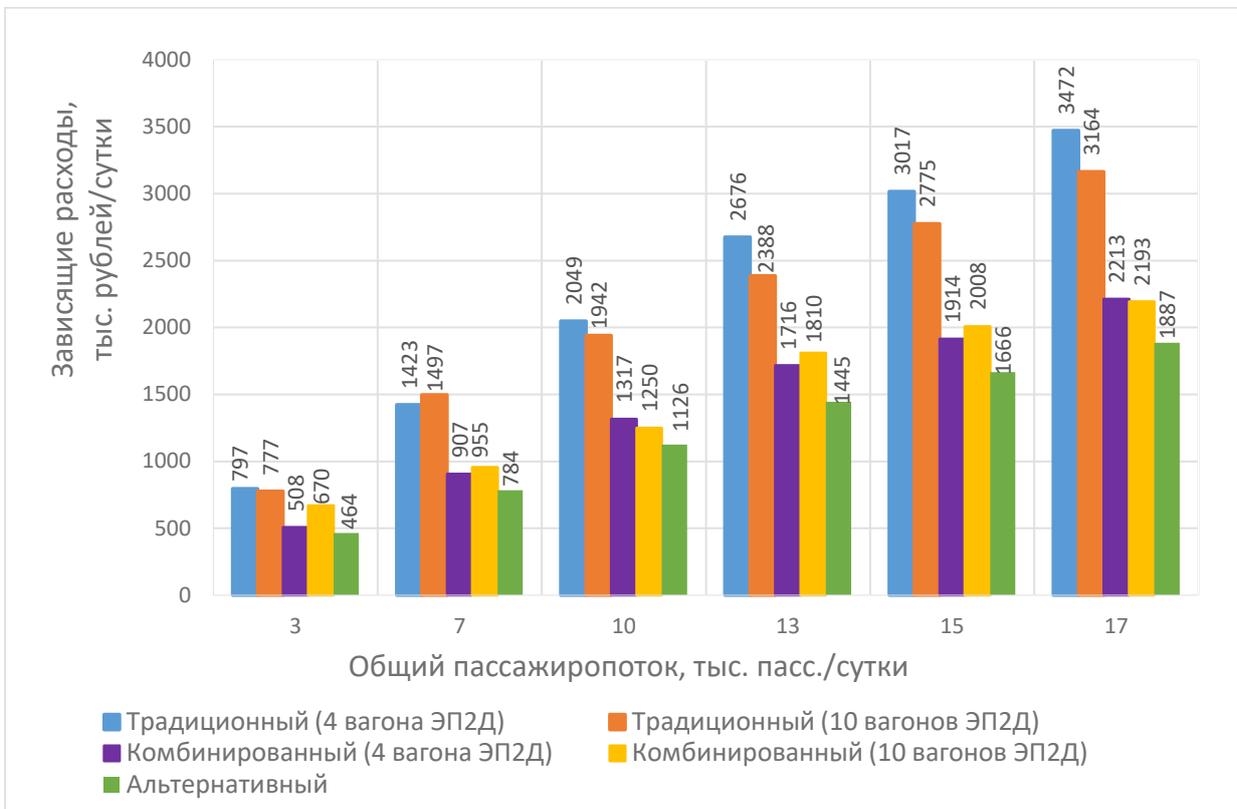


Рисунок Б.6 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 3)

**Вариант 4:**  $l_{\text{жд}} = 15$  км,  $l_{\text{тр}} = 15$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,1$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,5$ .

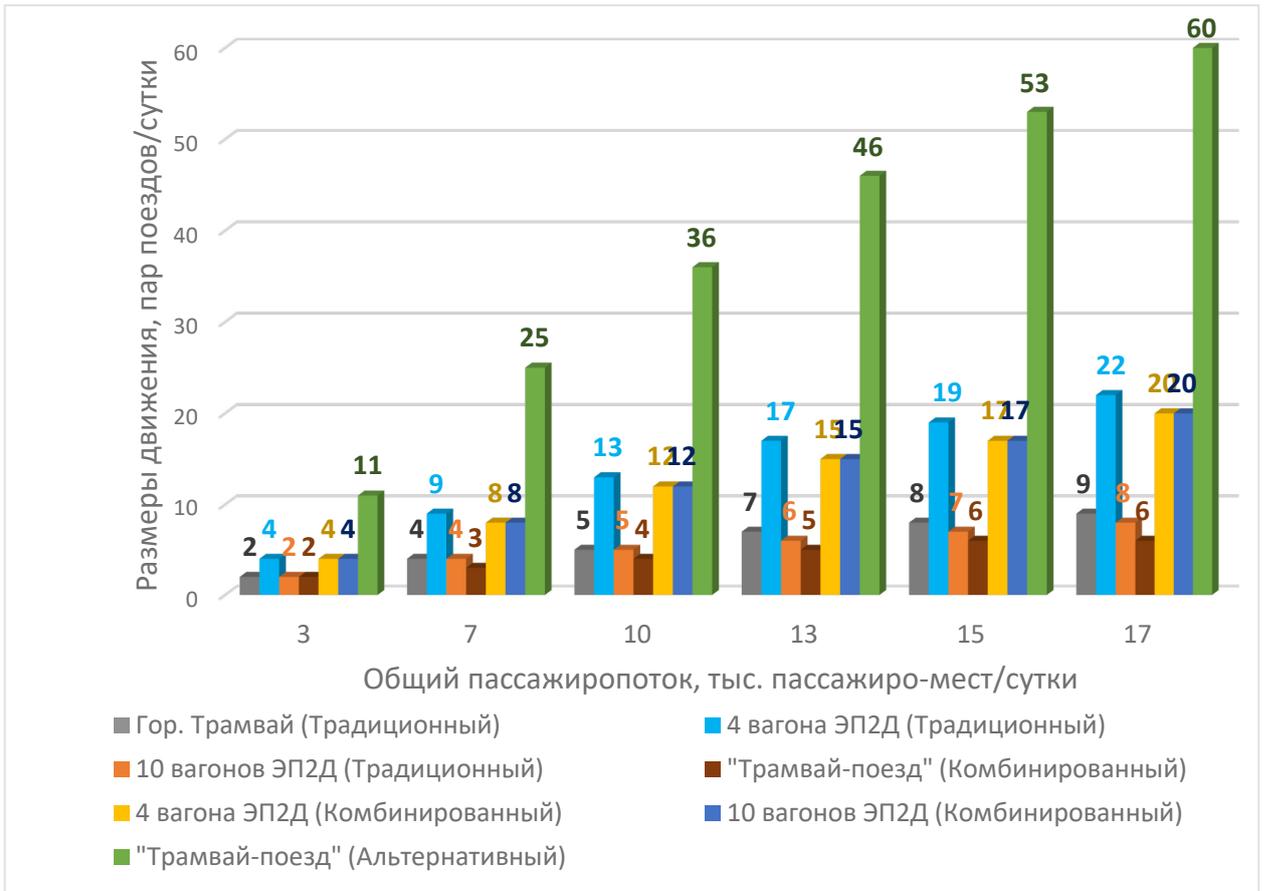


Рисунок Б.7 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 4)

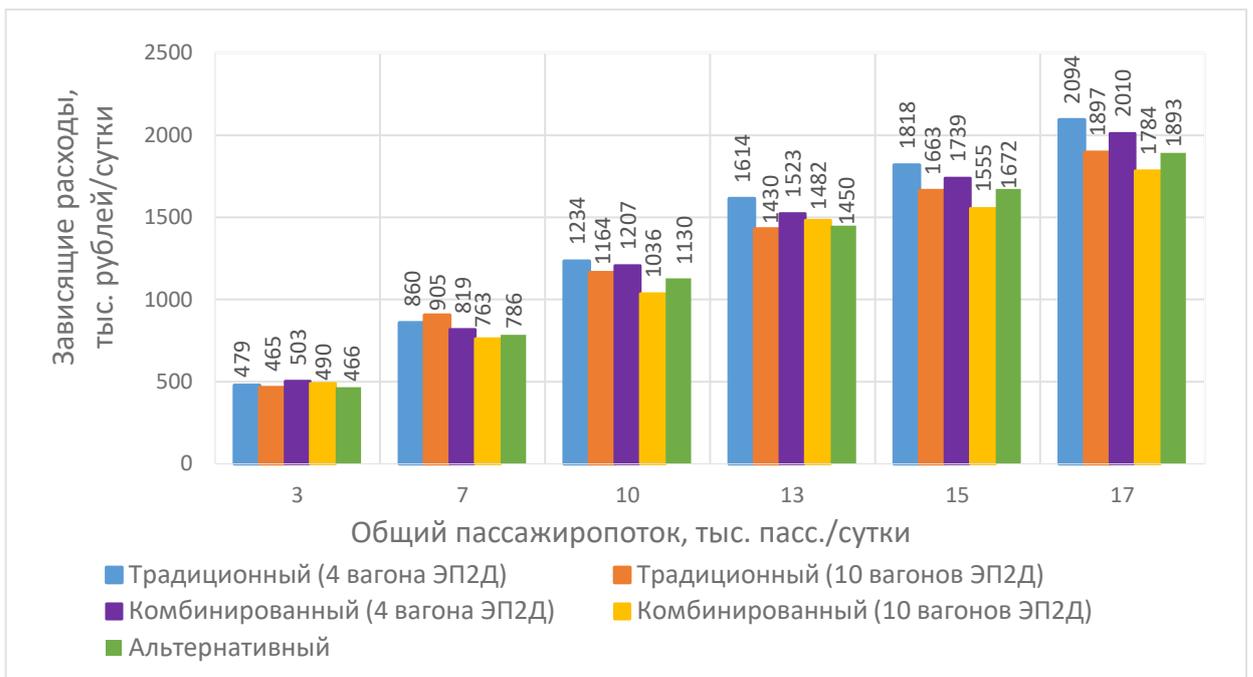


Рисунок Б.8 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 4)

**Вариант 5:**  $l_{\text{жд}} = 15$  км,  $l_{\text{тр}} = 15$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,5$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,5$ .

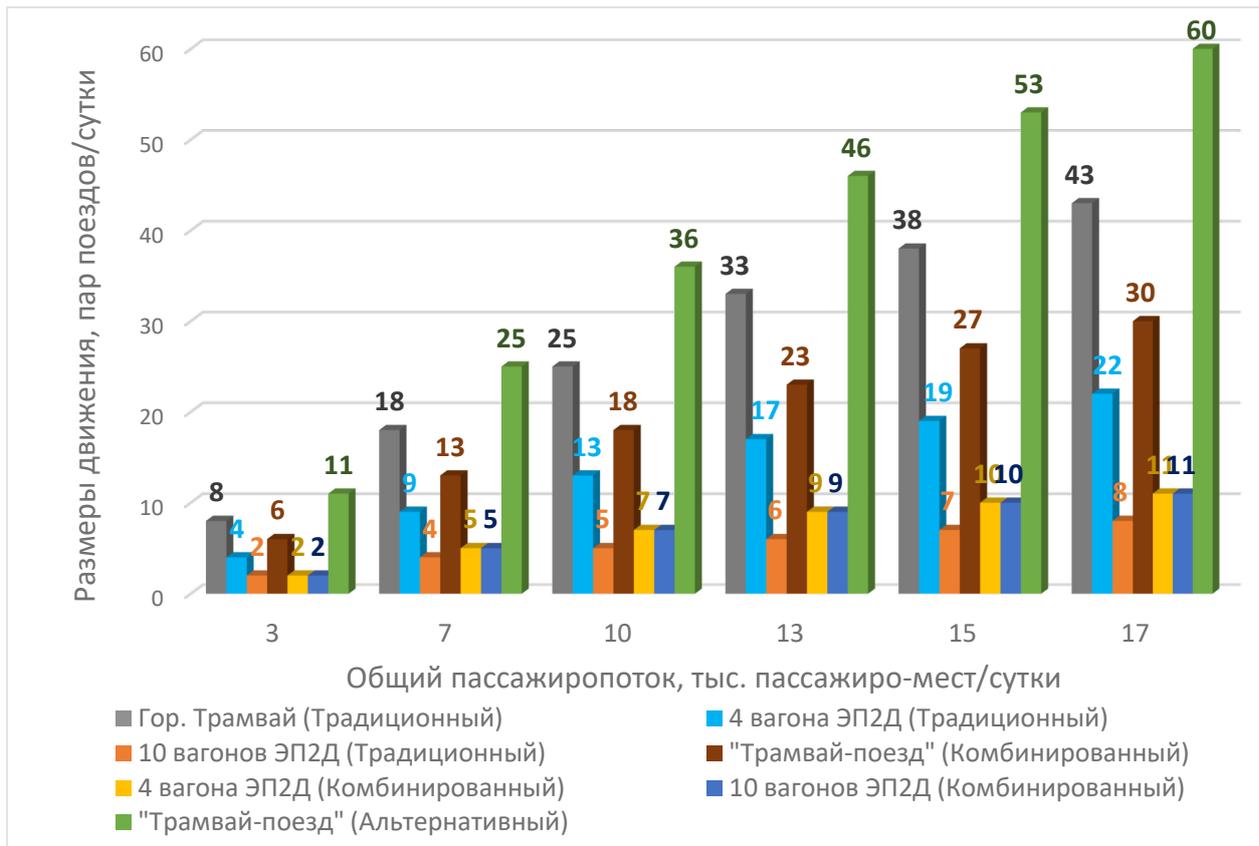


Рисунок Б.9 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 5)

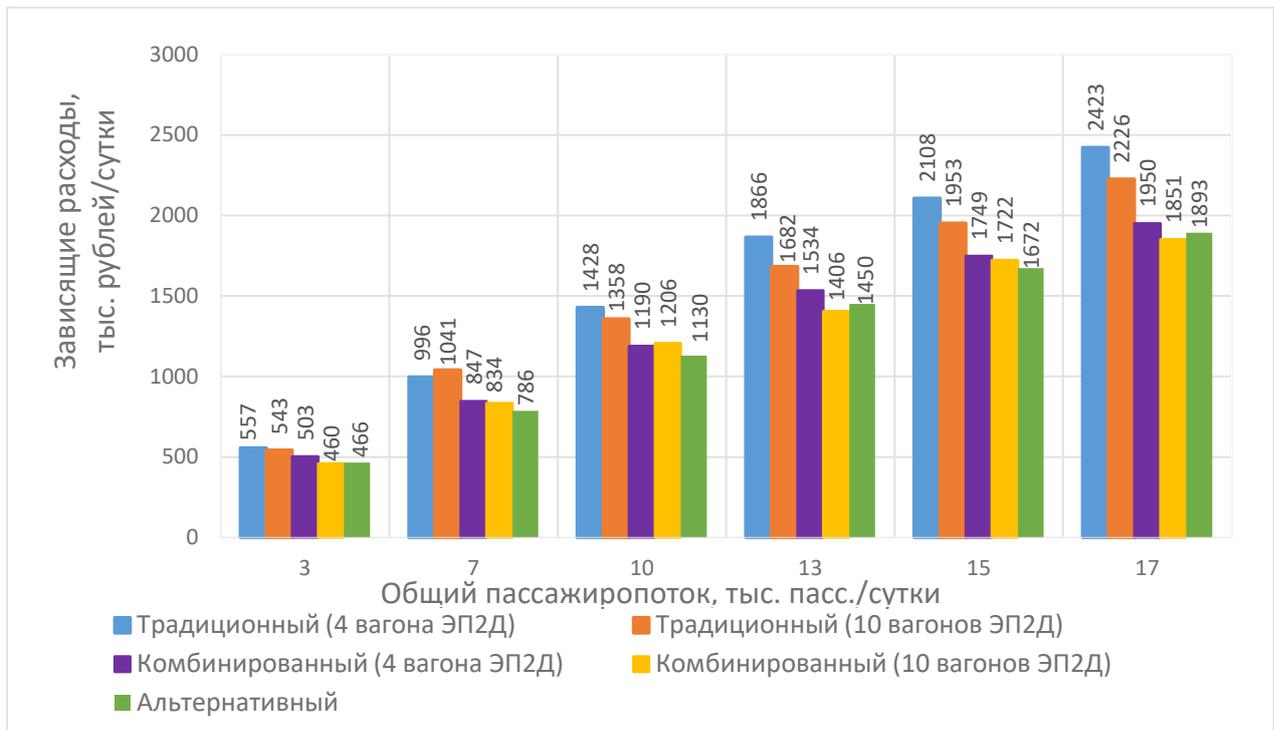


Рисунок Б.10 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 5)

**Вариант б:**  $l_{\text{жд}} = 15$  км,  $l_{\text{тр}} = 15$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,8$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,5$ .

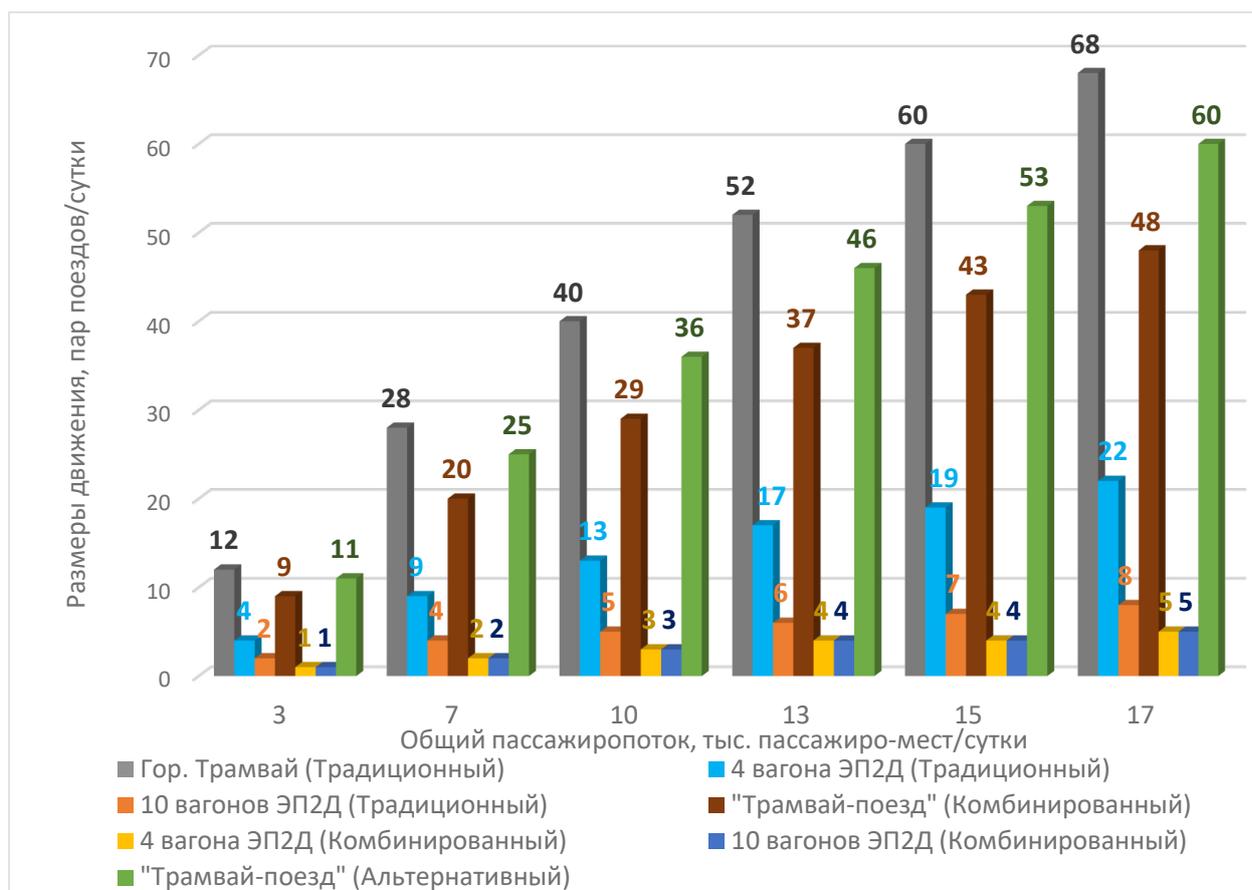


Рисунок Б.11 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант б)

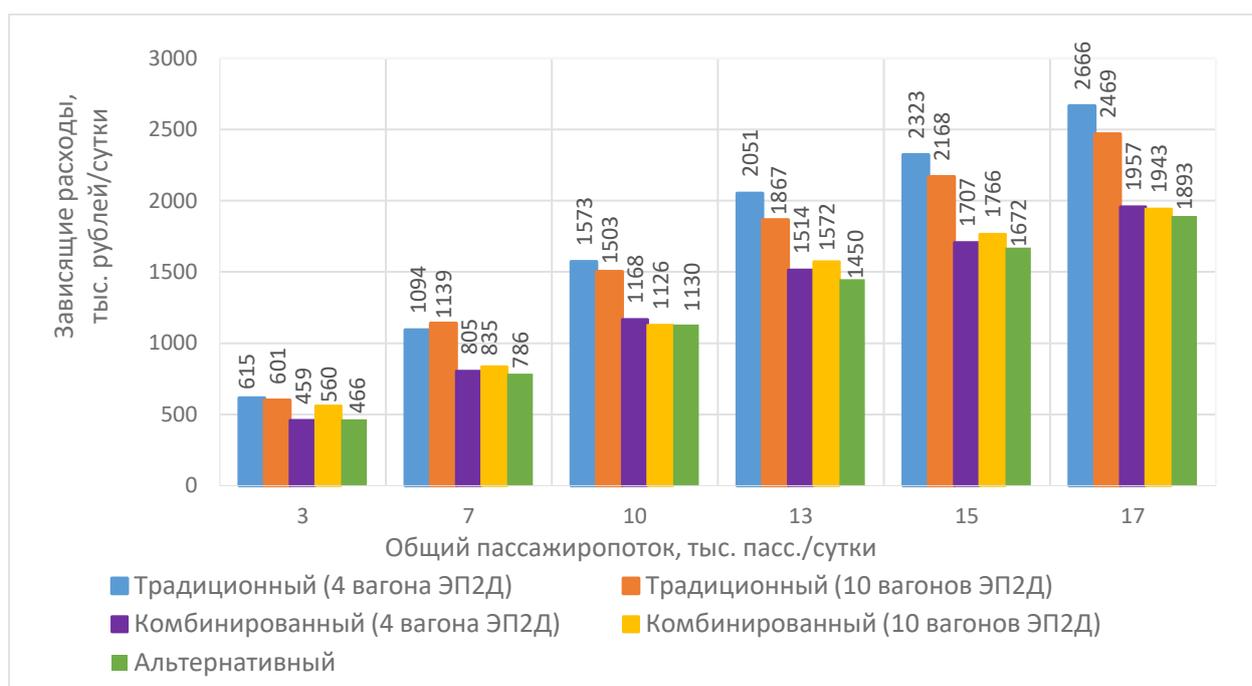


Рисунок Б.12 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант б)

**Вариант 7:**  $l_{\text{ЖД}} = 12$  км,  $l_{\text{ТР}} = 18$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,3$ ,  $\gamma_{\text{ЖД}} = 0,4$ .

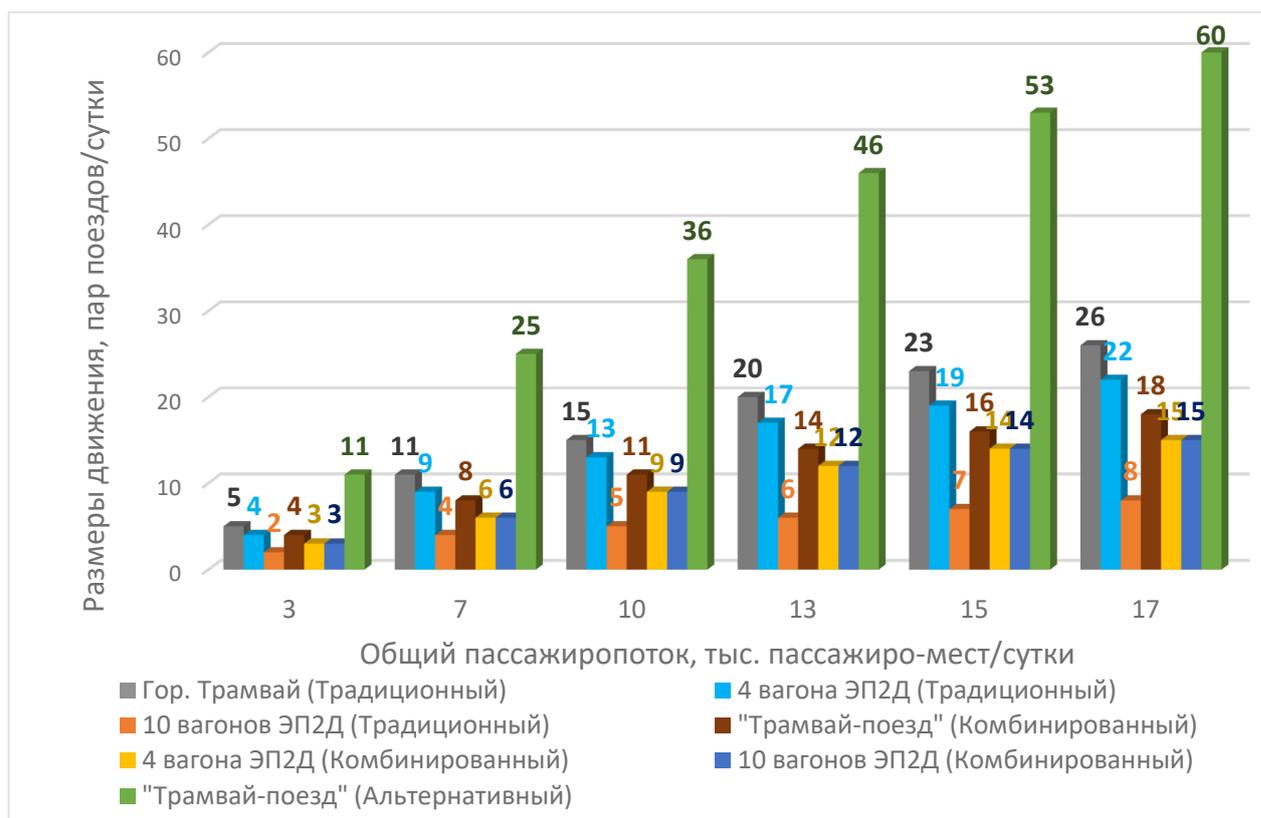


Рисунок Б.13 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 7)

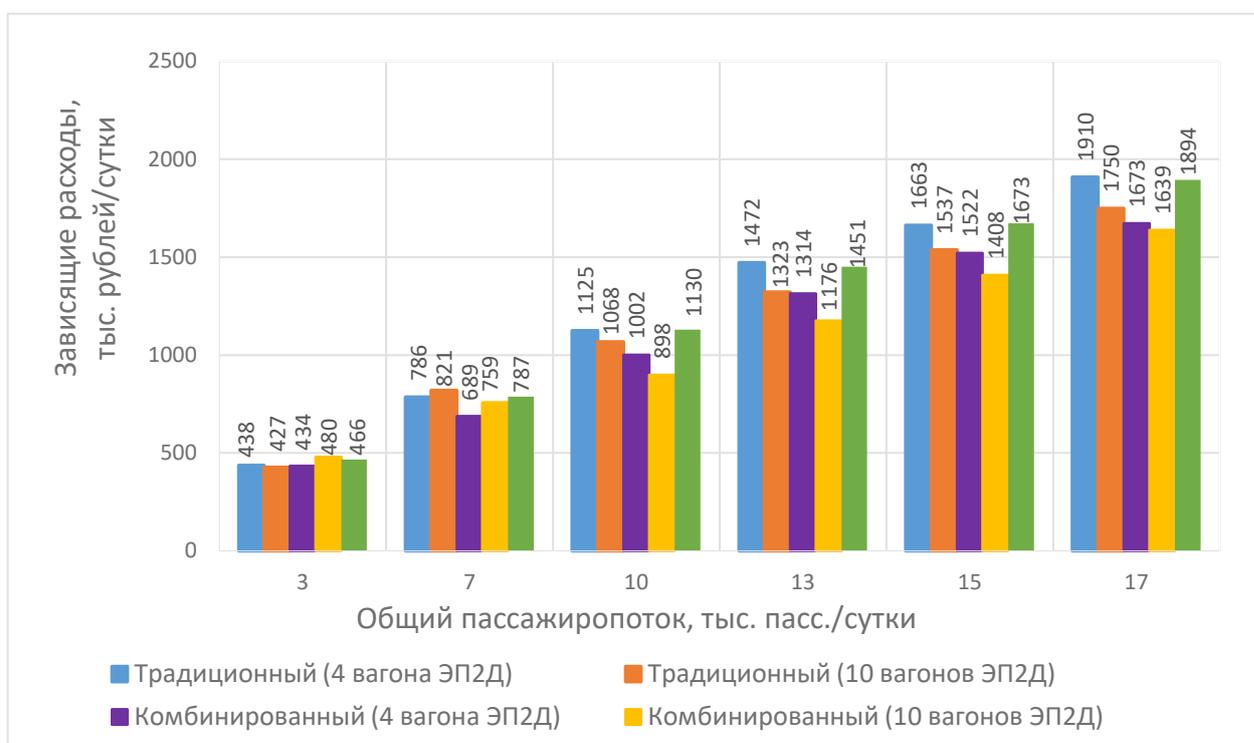


Рисунок Б.14 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 7)

**Вариант 8:**  $l_{\text{жд}} = 12$  км,  $l_{\text{тр}} = 18$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,5$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,4$ .

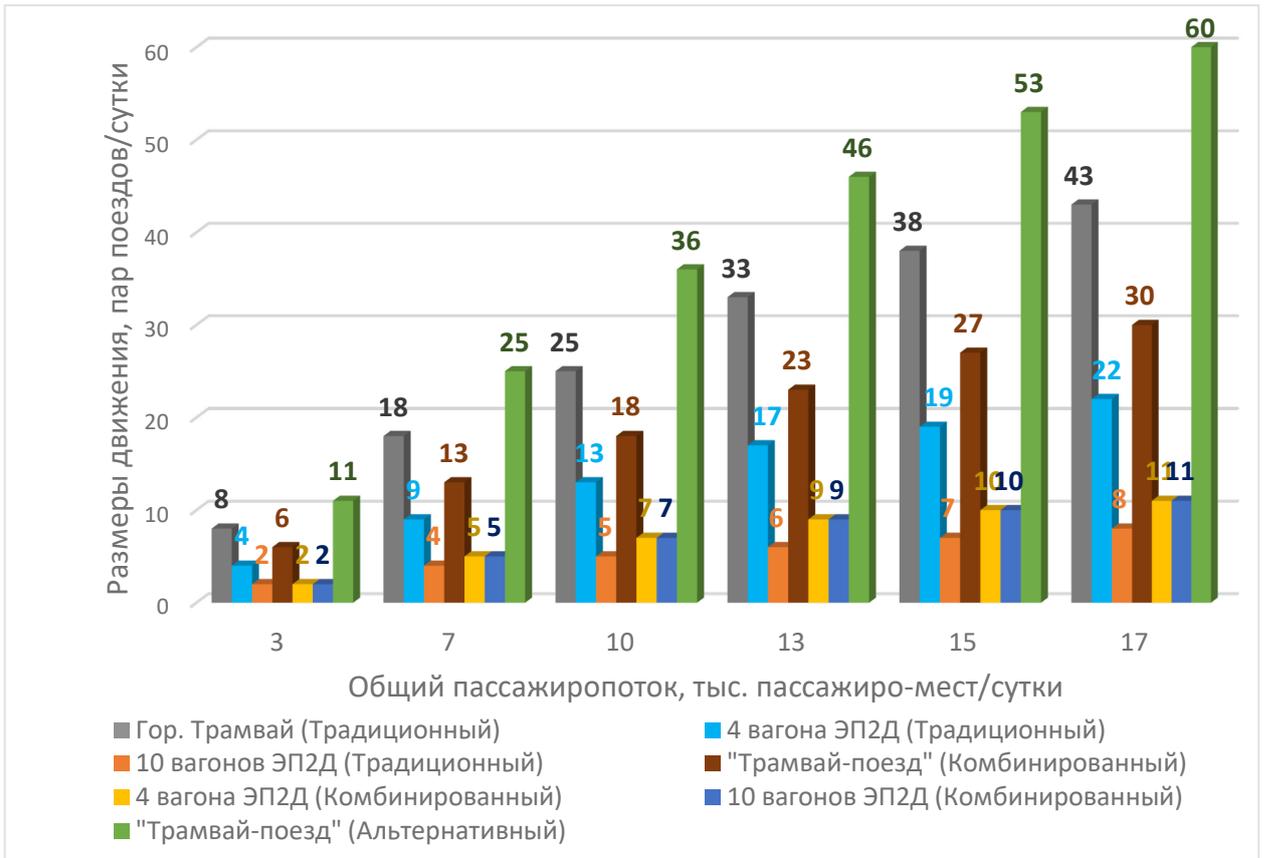


Рисунок Б.15 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 8)

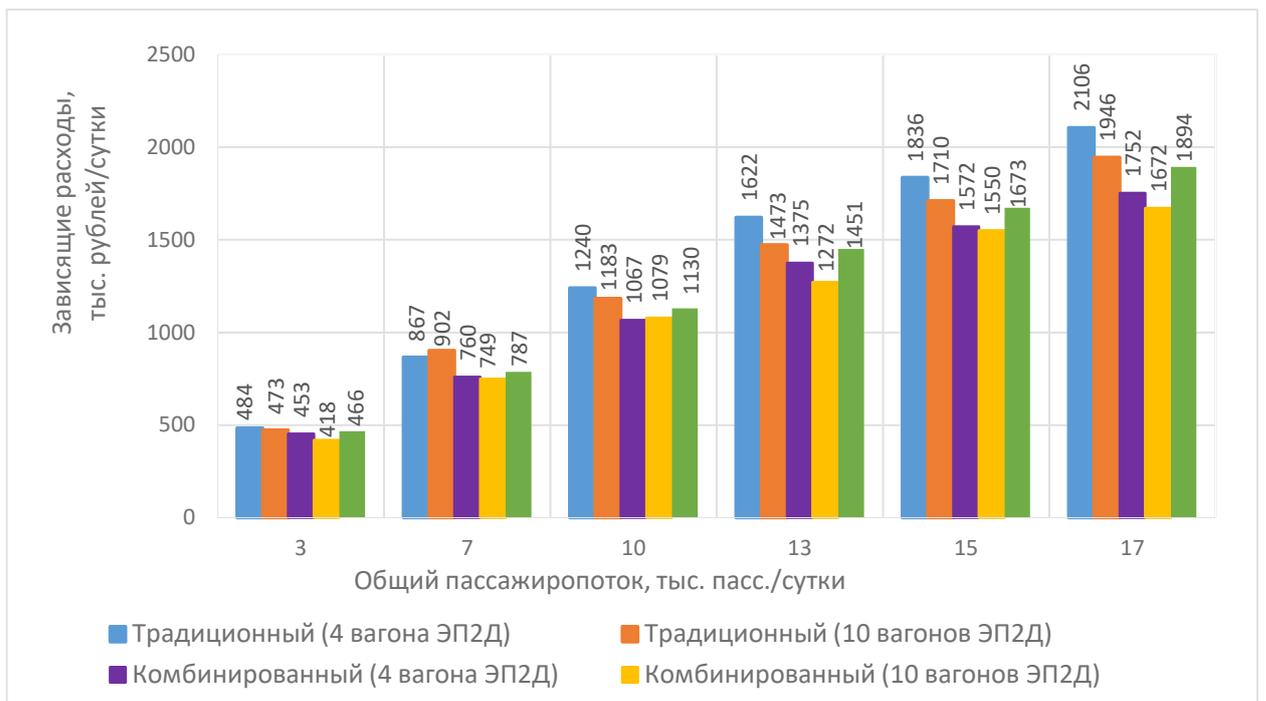


Рисунок Б.16 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 8)

**Вариант 9:**  $l_{\text{жд}} = 12$  км,  $l_{\text{тр}} = 18$  км,  $\sigma_{\text{пер}} = 0,8$ ,  $\gamma_{\text{жд}} = 0,4$ .

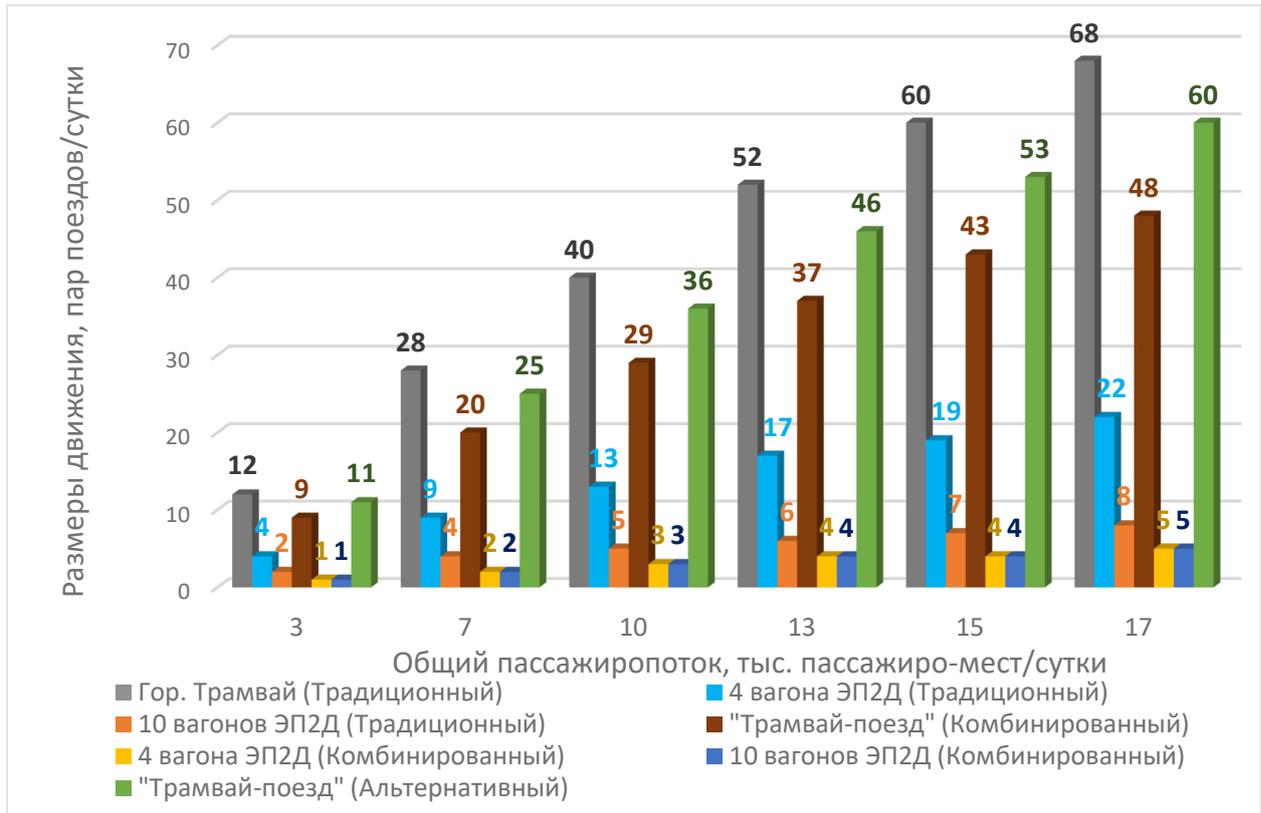


Рисунок Б.17 – Потребные размеры движения поездов по вариантам технологий перевозки пассажиров, пар поездов/сутки (вариант 9)

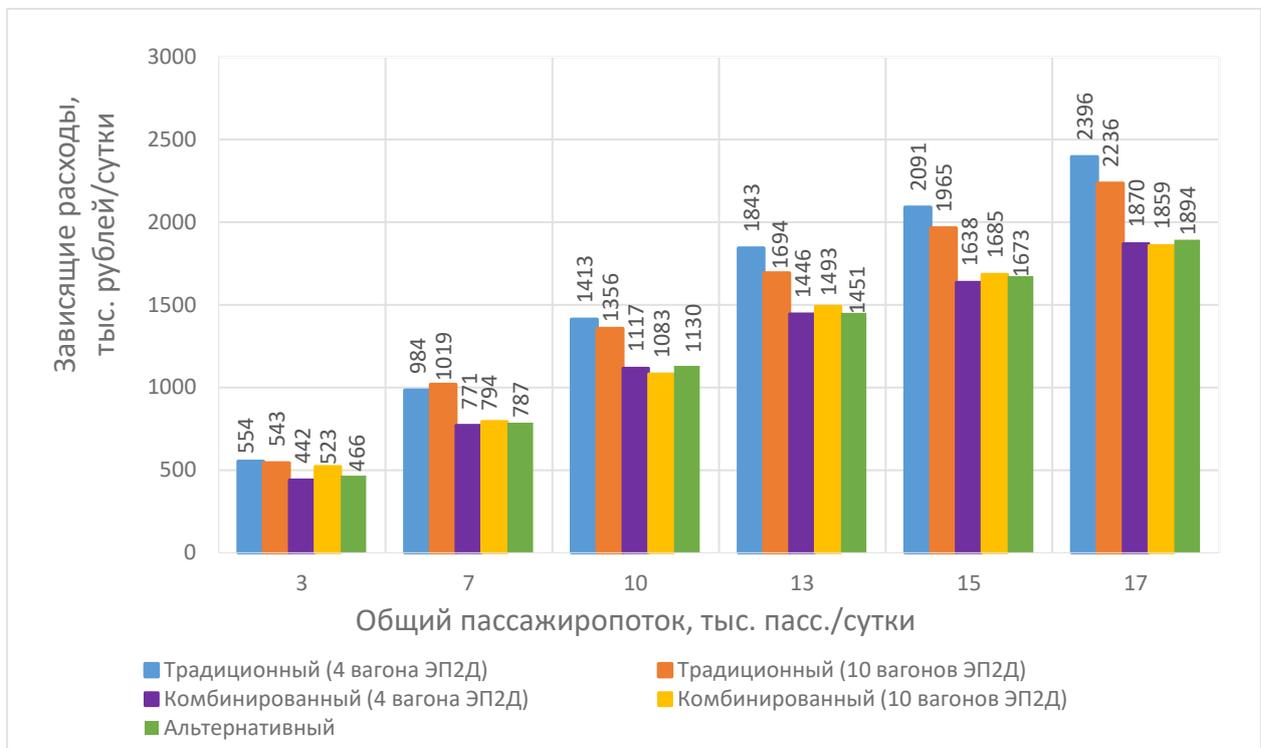


Рисунок Б.18 – Сравнение зависящих затрат по вариантам технологий перевозки пассажиров (вариант 9)