

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

Дубровская Татьяна Алексеевна

Обоснование проектных решений при реконструкции железных
дорог для скоростного движения пассажирских поездов
в Республике Беларусь

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Миронов Виктор Степанович

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	4
1	ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ	11
1.1	История внедрения высоких скоростей движения пассажирских поездов	11
1.2	Особенности проектирования железных дорог для скоростного В Республике Беларусь.....	17
1.3	Использование подвижного состава различного типа при введении скоростного движения поездов.....	27
1.4	Постановка задачи исследования.....	37
2	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ НА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ	39
2.1	Обоснование параметров плана железной дороги	39
2.1.1	Радиусы круговых кривых.....	39
2.1.2	Длины переходных кривых и прямых вставок.....	52
2.2	Габаритное уширение междупутья.....	59
2.3	Технико-экономическое обоснование внедрения скоростного движения при различном типе подвижного состава	64
2.3.1	Общая и сравнительная эффективность проектных решений.....	64
2.3.2	Экономическое обоснование увеличения непогашенного ускорения в кривых.....	67
2.4	Стоимость пассажиро-часа.....	82
2.5	Выводы по главе 2.....	87
3	ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	89
3.1	Классификация задач по принятию решений в проектах железных до- рог.....	89

3.2	Факторы неопределенности при обосновании решений для скоростного движения.....	94
3.3	Критерии принятия решений в условиях неопределенности.....	95
3.4	Алгоритм принятия решений в условиях неопределенности.....	100
3.5	Методика расчета интегрального вероятностного критерия.....	107
3.6	Выводы по главе 3.....	112
4	ПРИМЕР ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	113
4.1	Исходные данные.....	113
4.2	Формирование матриц частных критериев и риска.....	118
4.3	Принятие решений в условиях неопределенности с использованием различных общих критериев.....	120
4.3.1	Классические критерии принятия решений в условиях неопределенности и риска.....	121
4.3.2	Определение интегрального вероятностного критерия.....	126
4.4	Выводы по главе 4.....	130
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	132
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
	ПРИЛОЖЕНИЕ	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Интеграция Белорусской железной дороги в международную систему транспортных коридоров, соединяющих Россию и страны Запада, страны Прибалтики с Украиной и выход к Черному морю, а также обеспечение мобильности населения страны и ускорение доставки пассажиров из областных центров в столицу Республики, обуславливают необходимость повышения скоростей движения поездов. Эту задачу можно осуществить строительством новых либо путем развития и модернизации существующих магистральных железнодорожных линий.

В настоящее время в мировой практике решение проблемы повышения скоростей движения осуществляется по двум направлениям:

- строительство новых высокоскоростных магистралей со скоростями движения до 300-400 км/ч;
- реконструкция существующих линий со скоростями до 200-250 км/ч.

При проведении реконструктивных мероприятий наиболее капиталоемким является реконструкция плана линии. Объем реконструкции плана можно существенно сократить за счет использования специального подвижного состава. Кроме того, при обосновании проектных решений по выбору рациональных параметров реконструкции железных дорог под скоростное движение большое значение приобретает необходимость учета частичной неопределенности исходных данных об условиях реконструкции и эксплуатации дороги.

Необходимость увеличения скорости движения на всех видах транспорта с целью ускорения перевозок пассажиров и грузов predetermined требованиями повышения эффективности производства и производительности труда. Государственная программа развития транспорта Республики Беларусь на 2016 - 2020 годы в области железных дорог, направленная на решение этих и других задач, предусматривает приобретение и производство тягового и моторвагонного по-

движного состава, дальнейшую электрификацию железнодорожных линий, развитие скоростного межрегионального пассажирского сообщения и прежде всего повышение скоростей движения во II международном транспортном коридоре Восток – Запад (Москва – Минск – Берлин).

Существующая средняя ходовая скорость по всему коридору составляет примерно 95 км/ч, максимальная 140 км/ч. Только на отдельном участке, станция Лесная – станция Доманово максимальная скорость движения поездов составляет 160 км/ч. Таким образом, задача повышения скорости движения поездов до 160-200 км/ч на всем коридоре актуальна.

Кроме этого, начиная с декабря 2019-го, планируется запуск подвижного состава ОАО РЖД «Ласточка» (5+5, номер 729/736, круглогодично/ежедневно) по направлению Москва (РФ) – Орша (РБ) с дальнейшим продлением маршрута до г. Минска, что подтверждает еще большую необходимость в исследовании данного транспортного коридора.

Степень разработанности темы исследования. Анализ реконструкции существующих железнодорожных линий под скоростное движение посвящены работы Г.З. Верцмана, Г.М. Шахунянца, А.И. Иоаннисяна, В.А. Лазаряна, И.В. Турбина, В.О. Певзнера, В.С. Миронова, В.А. Подвербного, Г.Л. Аккермана, В. А. Копыленко, Л. З. Прасова, Е. С. Свинцова, С.В. Шкурникова, Д.Н. Кургана, Н.Б. Кургана и др.

Изученный автором опыт внедрения скоростного движения в различных странах мира, с учетом особенностей Республики Беларусь, показал, что в имеющихся публикациях и практической работе имеется ряд вопросов, обусловленных современными условиями эксплуатации.

Однако, в этих методиках недостаточно обоснованы некоторые слагаемые критерия эффективности, а также не учтены факторы неопределенности исходной информации.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка методики обоснования технических параметров и средств оснащения линии, переустраиваемой под скоростное движение пассажирских поездов, в условиях частичной

неопределенности исходной информации для железных дорог Республики Беларусь.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- выполнен анализ тенденций развития скоростного движения в мировой практике, в том числе – с использованием различных типов подвижного состава;

- проведено технико-экономическое обоснование использования нового подвижного состава, способного реализовывать более высокие скорости при непогашенном ускорении, равном $0,9 \text{ м/с}^2$ (на примере Белорусской железной дороги);

- разработан алгоритм методики выбора радиуса круговых кривых в плане для реконструкции дорог с учетом использования различного типа подвижного состава;

- определена структура денежного критерия, определяющего наиболее эффективный вариант комплекса технических параметров при реконструкции железных дорог для скоростного движения;

- выполнен анализ способов определения стоимости пассажиро-часа;

- выполнен анализ факторов частичной неопределенности, присущих исходной информации, необходимой для разработки проектов реконструкции железных дорог под скоростное движение пассажирских поездов;

- разработана методика обоснования параметров реконструкции железных дорог под скоростное движение, учитывающая неопределенность исходной информации;

- методика апробирована на участке Красное-Минск-Брест II транспортного коридора.

Объектом исследования является железная дорога как сложная многофункциональная техническая система.

Предметом исследования является выбор и обоснование проектных решений при реконструкции железных дорог для скоростного движения пассажирских поездов с учетом неопределенности исходной информации.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- выполнен анализ методики выбора рациональных параметров плана линии при повышении скоростей движения на существующих линиях;
- исследована и обоснована эффективность применения норматива непогашенного ускорения $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$ на Белорусской железной дороге (подтверждена актом внедрения);
- получена аналитическая зависимость для определения радиусов кривых в условиях смешанного грузового и пассажирского движения при различном типе подвижного состава;
- разработан алгоритм определения рекомендуемого радиуса и возвышения наружного рельса с учетом индивидуальных условий эксплуатации каждой кривой;
- установлена структура доходов и затрат для определения сравнительной и общей эффективности решений при реконструкции линий для скоростного движения пассажирских поездов;
- исследована стоимость пассажира-часа, используемая при обосновании технических параметров реконструкции и эффективности внедрения скоростного движения; предложена новая методика расчета стоимости времени нахождения пассажиров в пути;
- разработана методика обоснования параметров реконструкции железных дорог под скоростное движение, учитывающая неопределенность исходной информации; методика апробирована на одном из участков Белорусской железной дороги.

Теоретическая и практическая значимость. Показана возможность реализации скоростного движения пассажирских поездов на существующих линиях при смешанных грузовых и пассажирских перевозках. Предложен наиболее эффективный способ сокращения времени хода для Белорусской железной дороги: применение подвижного состава с наклоном кузова или увеличение нормативного значения непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$ с использованием современного подвижного состава, что подтверждено актом внедрения Службой пути Белорусской железной дороги.

Предложен алгоритм принятия решений в условиях частичной неопределенности исходной информации, обоснованный на базе участков Красное – Минск, Минск – Брест Белорусской железной дороги. Для каждого участка предложен свой вариант комплекса технических параметров для введения скоростного движения.

Алгоритмы реализации разработанных методик проектирования можно использовать в практике проектирования железных дорог, переустраиваемых под скоростное движение пассажирских поездов, а также при разработке автоматизированных систем проектирования.

Потенциальными потребителями работы являются Белорусская железная дорога, проектные организации, а также научно-исследовательские институты, осуществляющие разработку проектов и исследования по реконструкции железных дорог для скоростного движения.

Результаты исследования могут быть использованы в учебном процессе при подготовке инженеров путей сообщения.

Методология и методы исследования. При анализе задач исследования и разработки способов их решения использован системный подход.

Определение зависимостей радиусов кривых от скоростей движения поездов выполнено с применением основных положений теоретической механики.

Определение общего критерия для выбора решения в условиях неопределенности и риска базируется на основных принципах теории игр и принятия решений.

При обосновании проектных решений применены методы выбора оптимальных решений, разработанные и используемые в практике изысканий и проектирования железных дорог.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритм методики выбора радиуса круговых кривых в плане для реконструкции дорог с учетом использования различного типа подвижного состава;

- анализ обоснования эффективности применения увеличенного норматива непогашенного ускорения $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$, учитывающие особенности работы Белорусской железной дороги;

- методики расчета стоимости пассажиро-часа при увеличении скоростей движения на основании сравнения скоростных и пассажирских поездов, курсирующих на реконструируемом участке, и с использованием проектных данных (величина капвложений, эксплуатационных расходов и сокращение времени нахождения пассажиров в пути);

- методика выбора параметров реконструкции железных дорог для скоростного движения с учетом частичной неопределенности исходной информации.

Степень достоверности и апробации результатов. Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на заседаниях кафедр «Изыскания и проектирование железных дорог» и «Проектирование и строительство железных дорог» РУТ (МГУПС (МИИТ)) – 2010 – 2014 гг., 2019 г.; кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» ПГУПС – 2013 г.; кафедры «Изыскания и проектирование дорог» БелГУТ (БИИЖТ) – 2013-2018 гг.; научно-практических конференциях «Неделя науки» 2011 г, 2013 г. (МГУПС (МИИТ)); научно-методической конференции «Путь XXI века» (ПГУПС) 2013г.; ХLI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Железнодорожный транспорт: современные проблемы науки» (ДЕТУТ, Киев), 2012 г.; VI международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортных систем в условиях реформирования железнодорожного транспорта: управление, экономика и технология» (Киев), 2013 г.; III международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса» (БелГУТ (БИИЖТ), г. Гомель), 2013 г.; VI международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (БелГУТ (БИИЖТ), г. Гомель), 2013 г., VII международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (БелГУТ (БИИЖТ), г. Гомель), 2015 г., VIII международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (БелГУТ

(БИИЖТ), г. Гомель), 2017 г., X международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (БелГУТ (БИИЖТ), г. Гомель), 2018 г., девятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (ИрГУПС 2018), а также вошли в состав научно-исследовательской работы кафедры «Изыскания и проектирование дорог» (БелГУТ (БИИЖТ), г. Гомель) за 2012 – 2017 гг.

Основные результаты работы приняты для дальнейшего изучения и внедрения Службой пути Белорусской железной дороги, а также внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета транспорта для студентов строительных специальностей.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 3 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 158 страниц машинописного текста, в том числе 43 рисунка, 32 таблицы, 1 приложение. Список литературы содержит 127 наименований.

1 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

1.1 История внедрения высоких скоростей движения пассажирских поездов

Повышение скорости движения всегда было одной из главных задач железных дорог. Необходимость увеличения скорости движения на всех видах транспорта с целью ускорения доставки пассажиров и грузов вызывается требованиями повышения эффективности общественного производства и производительности труда.

Вместе с этим, с возрастанием скоростей движения грузовых поездов увеличивается возможная пропускная и провозная способности железнодорожной линии.

В пассажирском движении повышение скорости поездов увеличивает фонд рабочего времени, времени для отдыха, способствует развитию государственных и культурных связей. В грузовом движении в результате повышения скоростей определенная часть грузовой массы передаётся из сферы обращения в сферу потребления, а высвобожденные вагоны направляются для дополнительной погрузки.

Обладая значительными преимуществами по сравнению с другими видами транспорта (экономичность, экологическая чистота, высокий уровень безопасности и комфорта), скоростные железные дороги получают всё большее распространение.

Исследования показали [12], что реконструкция существующих железнодорожных линий со смешанным движением грузовых и пассажирских поездов позволяет поднять скорости до 200 км/ч. Для достижения более высоких скоростей целесообразно сооружение специализированных высокоскоростных магистралей. По прогнозам скоростное движение в ближайшем будущем охватит значительно более широкий сектор пассажирских перевозок, чем высокоскоростное, так как

его организация не связана со строительством новых линий, хотя и потребует существенных затрат на реконструкцию существующих железных дорог.

Динамика последовательного увеличения скоростей хорошо прослеживается в истории развития железных дорог мира. В 1829 г. паровоз Rocket достиг скорости 85 км/ч. В 1890 г., во Франции, паровоз Crampton достиг 144 км/ч с массой поезда 157 т. Немецкий электропоезд на участке Цоссен – Мариенфельд в 1903 г. впервые превысил рубеж скорости 200 км/ч, развив скорость 210 км/ч. В США, до второй мировой войны был установлен рекорд скорости 180 км/ч, но в феврале 1954 г., во Франции, была зарегистрирована скорость 243 км/ч, а в 1955 г. здесь же была установлена скорость 331 км/ч при локомотивной тяге. В 1959 г. в Японии реализованы экспериментальные поездки со скоростями до 256 км/ч. Рекорды скорости, установленные во Франции, были улучшены там же: 26 февраля 1981 г. – поезд TGV достиг скорости 380 км/ч. Затем в мае 1988 г. экспериментальный поезд "Интерсити - экспресс" (ICE) в ФРГ, поднял рекорд скорости для железнодорожного транспорта до 406,9 км/ч. Во Франции, во время испытательного рейса сверхскоростного экспресса "TGV - Atlantic" в 1990 г. зафиксирована скорость 515,3 км/ч. Опытный электропоезд из серии TGV, создан специально для установления рекорда скорости. Этот уровень не является пределом. Поезд V150 3 апреля 2007 года, на не открывшейся магистрали LGV Est между Страсбургом и Парижем разогнался до скорости 574,8 км/ч, тем самым побив рекорд 1990 года. Но это были рекордные поездки, цель которых заключалась в том, чтобы показать технические возможности новых по своему времени локомотивов.

В настоящее время в мировой практике решение проблемы повышения скоростей движения осуществляется по двум направлениям:

- строительство новых высокоскоростных магистралей со скоростями движения до 300 и более км/ч;
- реконструкция существующих линий для скоростей до 200-250 км/ч.

Тенденция, направленная на строительство новых железнодорожных магистралей, предусматривает:

- строительство изолированных от существующей сети специализированных высокоскоростных пассажирских магистралей;
- строительство высокоскоростных магистралей, имеющих выход на существующую сеть железных дорог;
- строительство скоростных магистралей для пассажирского движения, совмещенного с грузовыми перевозками.

Реконструкция существующих линий в зависимости от уровня повышения скорости осуществляется двумя способами:

- частичное изменения трассы линии, усовершенствование технического их оснащения устройствами АТС, электрификацией и других при уровне скорости до 160 км/ч;
- коренное изменение трассы линии, увеличение числа путей на существующих линиях при скоростях от 160 до 200 км/ч и более.

Проблемы повышения скоростей движения в каждой стране решается с учетом конкретной ситуации, сложившейся на дорогах. Так, в странах Западной Европы, а также в Японии и Китае по большей части проектируются высокоскоростные магистрали со скоростями свыше 200 км/ч. Тем более что на сегодняшний день Китай является мировым лидером по протяженности высокоскоростных магистралей.

В Казахстане, начиная с 2004 г и по сегодняшний день, для реализации высоких скоростей пассажирских поездов эксплуатируется подвижной состав с наклоном кузова «Talgo Pendular» [119]. Максимальная скорость около 150 км/ч. Таким образом, расстояние почти в 2000 км от Петропавловска до Алматы поезд преодолевает за 19 часов, совершая в пути лишь 5 коротких остановок.

ВСМ в Российской Федерации станут стартом для развития отечественного среднего и малого бизнеса, а также источником развития социального и экономического потенциала территории. Создание ВСМ поможет переключить часть пассажиропотока с автомобильного и авиационного транспорта на железнодорожный, и, в свою очередь, повысит мобильность населения.

Высокоскоростной транспорт наиболее безопасен для окружающей среды. Массовое использование ВСМ поможет разгрузить автомобильные дороги.

Скоростное движение впервые появилось в Российской Федерации в 2009 году на направлении Москва – Санкт-Петербург, где стали курсировать со скоростью до 200 км/ч поезда «Сапсан». В 2010 году Питер и Хельсинки связал подвижной состав «Аллегро». Предполагается также строительство и эксплуатация ВСМ, на которых скорость может достигать до 400 км/ч.

В России была разработана программа по повышению скоростей движения на железнодорожном транспорте на период до 2030 года.

ВСМ евразийского масштаба. ВСМ евразийского масштаба включает в себя направление из Пекина в Москву через Казань. Здесь планируется осуществлять, помимо пассажирских перевозок, высокоскоростные грузовые перевозки, от которых будет зависеть окупаемость всего проекта. При этом время в пути между двумя крайними точками сократится с 6 до 2 суток.

ВСМ Москва – Пекин под названием «Шелковый путь» соединит между собой все главные рынки Европы и Азии.

Начало скоростному и высокоскоростному движению в Центральной Азии уже положено. Однако интегрированный в экономический пояс Шелкового пути Транс-Евразийский пояс «Razvitie» подразумевает и европейскую составляющую. Руководство ОАО «РЖД» заявило о возможности организации нового высокоскоростного маршрута Минск – Москва – Астана - Алма-Ата через территорию России, Беларуси и Казахстана.

Проблеме повышения скоростей движения на железнодорожном транспорте в странах бывшего СССР посвящено большое число исследований советских ученых: С.В. Амелина, В.И. Ангелейко, Н.И. Бещевой, В.Н. Веденисова, Н.Ф. Вериги, Б.А. Волкова, Н.А. Воробьева, Г.З. Верцмана, А.В. Гавриленкова, О.П. Ершкова, С.С. Жаброва, А.И. Иоаннисяна, В. О. Певзнера, С.О. Исмагуловой, И.И. Кантора, А.Д. Каретникова, В.Ю.Козлова, Н.В. Колодяжного, В.А. Копыленко, Ф.П. Кочнева, В.А. Лазаряна, В.С. Миронова, Б.Э. Пейсахзона, Г.С. Переселенкова, С.П. Першина, В.А. Подвербного, Л.З. Прасова, Е.А. Рыжик, Е.С.

Свинцова, Е.А. Сотникова, И.В. Турбина, Г.И. Черномордика, А.Д. Чернюгова, С.В. Шкурникова, Г.М. Шахунянца и многих других по широкому кругу вопросов. Эти вопросы касались плана и профиля для линий с большими скоростями движения, устройства и содержания пути на прямых участках и в кривых, подготовки пути к высоким скоростям, продольной динамики поездов, выбора веса и скорости пассажирских поездов, установление оптимального уровня средних скоростей в пассажирском и грузовом движении, организации движения высокоскоростных поездов и др. Ниже приводится анализ некоторых исследований по проблемам повышения скоростей движения.

Во второй половине 30-х годов профессор Б.Н. Веденисов на основе экспериментальных данных предложил условия укладки переходных кривых при высоких скоростях движения [6].

Примерно в это же время профессором Г.М. Шахунянцем были рассмотрены вопросы устройства и содержания пути на прямых и кривых участках с учетом особенностей ходовых частей подвижного состава при обычных скоростях и сверхскоростном транспорте [113, 114].

Профессор Черномордик Г.И. предлагает решение проблемы повышения скоростей движения путем создания новых пассажирских локомотивов большей мощности с жесткой тяговой характеристикой, мало изменяющейся от трудности профиля. При этих условиях ходовое время для продольных профилей разной трудности будет примерно одинаковое с небольшим разрывом между максимальной и минимальной скоростями [112].

В.Ю. Козлов [51] в своих работах исследует возможность применения подвижного состава с управляемым наклоном кузова для прохождения кривых, имеющих недостаточный радиус. Такой тип подвижного состава применяется в Германии, Италии, Великобритании.

Вопросу выбора радиуса круговых кривых с целью повышения скоростей движения поездов посвящены исследования О.П. Ершкова, А.И. Иоаннисяна, С.П. Першина и др., в результате которых установлено, что для обеспечения требований, предъявляемых к пассажирскому движению (нормальное взаимодей-

стве пути и подвижного состава и комфортность движения) необходимо соблюдение двух принципов установления минимального радиуса кривой [32, 33, 43]:

- равенство вертикальных силовых воздействий на наружную и внутреннюю рельсовую нити;
- непревышение допустимого непогашенного поперечного ускорения.

Методикой определения оптимальной технической скорости движения поездов занимались во ВНИИЖТе под руководством Н.И. Бещевой [3], критерием выбора которой являлся минимум стоимости поездо-километра; путями повышения этой скорости – профессор Кочнев Ф.П., который определил два пути повышения указанной скорости [58, 59]: использование подвижного состава с большими величинами ускорения и замедления, а также высокие конструкционные скорости тяговых средств.

Профессор Певзнер В.О. занимается взаимодействием пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации. В частности, в работе [81] поднимается вопрос управления скоростями движения с точки зрения соотношения скоростей грузовых и пассажирских поездов.

Профессором Кочневым Ф.П. [58, 59] предложена экономико-математическая модель оптимизации массы и скорости движения пассажирских и грузовых поездов в условиях текущей эксплуатации ж.-д. транспорта на линиях со смешанным движением. Рассмотрены вопросы этапного повышения скоростей движения пассажирских поездов, условия перехода к строительству специализированных линий для высокоскоростного движения пассажирских поездов.

Миронов В.С. в своих исследованиях [69] занимался вопросами проектирования высокоскоростных линий в увязке с уровнем скорости движения, предполагаемого в эксплуатации и оптимизации этих скоростей в различных условиях.

Заслуга Н.В. Колодяжного [53] состоит в том, что он в своей работе обобщил научные достижения и практические результаты введения высоких скоростей.

Г.С. Переселенков [85] в качестве критерия развития железных дорог предложил использовать основной показатель развития и оценки систем – надежность.

Работы И.И. Кантора и В.А. Копыленко [54] посвящены анализу вопросов проектирования трассы (плана и продольного профиля) высокоскоростных дорог и подвижному составу для таких магистралей.

Эффективность скоростных магистралей подтверждается тем, что, составляя 0,76% протяженности сети железных дорог мира, они выполняют сопоставимые со всеми железными дорогами объемы пассажирской работы, причем объемы перевозок неуклонно растут. В 2008 г. по данным Международного союза железных дорог (МСЖД), на всех железных дорогах мира было выполнено 2093 млрд. пасс-км, из них на скоростных магистралях – 156,1 млрд. пасс-км, что составляет 7,4% общего объема пассажирской работы [47].

1.2 Особенности проектирования железных дорог для скоростного движения в Республике Беларусь

Беларусь имеет исключительно выгодное географическое положение в трансъевропейской системе и является связующим и кратчайшим путем между Востоком и Западом. Благодаря этому вклад в валовый внутренний продукт добавленной стоимости транспорта и связи в 2016 г. составил 9,0%. Этим обуславливается его определяющая роль в экономике республики.

Транспортные услуги осуществляются железнодорожным, автомобильным, воздушным, речным и трубопроводным видами транспорта. Кроме того, хорошо развит городской электрический транспорт (трамвай, троллейбус, в Минске – городские электрички). Ведущее положение в транспортной системе республики занимает железнодорожный транспорт.

Белорусская железная дорога – оператор белорусской сети железных дорог. Это государственное объединение, подчинённое Министерству транспорта и коммуникаций Беларуси. В его состав входит 101 организация, имеющая статус юридического лица, и 3 представительства.

Эксплуатационная длина Белорусской железной дороги (БелЖД) составляет 5,5 тыс. км. В структуре дороги 6 отделений – Минское, Барановичское, Брестское, Гомельское, Могилевское и Витебское. Наиболее значимые железнодорожные узлы – Минск, Молодечно, Орша, Барановичи, Гродно, Волковыск, Лида, Лунинец, Брест, Гомель, Жлобин, Калинковичи, Могилев, Осиповичи, Кричев, Витебск, Полоцк – обслуживают соответствующие центры республики, работая на 2 – 6 направлениях.

Территорию Республики Беларусь пересекают два трансъевропейских транспортных коридора, определенные по международной классификации под номером 2 (Запад – Восток) и под номером 9 (Север-Юг) (рисунок 1.1). Транспортный коридор № 9 соединяет Финляндию, Литву, Россию, Беларусь, Украину, Молдову, Румынию, Болгарию и Грецию, пересекает территорию республики с севера на юг и проходит в обход крупных промышленных центров Беларуси – Витебска, Могилева, Гомеля. Протяженность железнодорожных линий транспортного коридора №9 составляет: направление Терюха – Гомель – Витебск – Езерище (489 км); направление Гудогай – Молодечно – Минск – Жлобин (электрифицированный участок).



Рисунок 1.1 – Схема транспортных коридоров, проходящих по территории Республики Беларусь

Транспортный коридор №2 Берлин – Варшава – Минск – Москва – Нижний Новгород, соединяющий Германию, Польшу, Беларусь и Россию, определен Европейским Союзом как высший приоритет среди Критских коридоров в связи с большим значением проходящих по нему торговых потоков в сообщении Запад – Восток. В пределах Республики Беларусь железнодорожная линия пролегает по направлению Брест – Минск – Орша – Осиновка. Участок транспортного коридора №2 (Красное (Россия) – Осиновка (Беларусь) – Брест) является двухпутным, полностью электрифицированным и оснащенным устройствами автоматической блокировки, электрической и диспетчерской централизацией.

Максимальные скорости движения поездов на сегодняшний день в Республике Беларусь составляет около 100 км/ч – для грузовых поездов и 140 км/ч – для пассажирских. Следующим этапом является введение скоростного движения пассажирских поездов со скоростями 160 – 200 км/ч.

Удельный вес грузооборота Белорусской железной дороги в общем грузообороте всех видов транспорта республики в 2018 г. составил 56,7%, пассажирооборот – 35,6%. Основные транспортные потоки проходят в направлениях на восток – в Россию и страны Азиатского региона, на север – в порты Балтийского моря, на запад – в страны Европы и на юг – в страны Черноморского региона. Пограничная инфраструктура дороги на западных границах развита с учетом того, что здесь стыкуются железнодорожные линии с различной шириной колеи. Для обеспечения всего комплекса транспортных услуг дорога имеет на пограничных переходах необходимые обустройства, способные переработать всю номенклатуру перевозимых грузов. Основные перегрузочные мощности расположены в Брестском и Гродненском железнодорожном узлах.

Для успешной интеграции Белорусской железной дороги в мировой транспортный рынок необходимо развитие скоростного и высокоскоростного пассажирского движения, что позволит поднять качество предоставляемых транспортных услуг на более высокий уровень. Значительное внимание развитию скоростного движения уделено в «Государственной программе развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016-2020 гг.» [17].

Роль транспортных сообщений значительно увеличилась в связи с подписанием Таможенного союза Беларуси, России и Казахстана. Генеральный директор Российских железных дорог О. В. Белозёров особо подчеркнул актуальность организации скоростного пассажирского сообщения на направлении Москва–Минск–Брест.

Одним из приоритетных направлений интеграции Белорусской железной дороги в общеевропейскую транспортную сеть является ее сотрудничество с международными транспортными организациями – Советом по железнодорожному транспорту государств СНГ и стран Балтии, Межправительственной организацией сотрудничества железных дорог (ОСЖД), Международным Союзом железных дорог (МСЖД), Форумом Трейн Европ, Координационным советом по транссибирским перевозкам.

Особенностями условий внедрения скоростного движения в Республике Беларусь являются:

- 1) скоростное движение пассажирских поездов должно быть совмещено с грузовыми перевозками;
- 2) необходимость реализовывать высокие скорости движения на существующих линиях, план которых целесообразно, по возможности, сохранить;
- 3) Небольшие расстояния между областными центрами и столицей;
- 4) внедрение транзитного скоростного движения с выходом в западноевропейские страны (2-й транспортный коридор) сопряжено с необходимостью изменения ширины колеи на пограничных пунктах перехода;
- 5) необходима электрификация ряда направлений или другие способы усиления мощности линии.

Эффективность скоростного движения на территории Республики Беларусь вполне обоснована, так как расстояния и характер перевозок соответствует факторам, определяющим сферу рационального его применения:

– протяженность направлений, на которых наблюдается наибольшая интенсивность перевозок, соответствует равновеликим затратам времени в сравнении с воздушным транспортом;

- обслуживание скоростными поездами ряда относительно близко расположенных один от другого крупных населенных пунктов, обеспечивающих достаточно большое число пассажиров;

- перевозка большого количества пассажиров, совершающих деловые поездки, и другие факторы.

В настоящее время разрабатываются проекты осуществления скоростного движения в стране. Это планируется осуществить за счет:

- строительства новых путей;

- перевода грузовых поездов на параллельный путь.

Государственная программа развития железнодорожного транспорта Республики Беларусь на 2016 – 2020 гг. включает в себя:

- приобретение нового тягового и моторвагонного подвижного состава;

- приобретение вагонов (пассажирских – для фирменных поездов, обеспечения новыми вагонами поездов, следующих в прямом и местном сообщении в ночное время; грузовых – для замены выработавших технический ресурс вагонов, в том числе с тележками нового типа);

- увеличение протяженности участков по основным направлениям международных перевозок грузов;

- развитие скоростного межрегионального пассажирского сообщения (введение в обращение ускоренных дневных пассажирских поездов, сформированных из комфортабельного моторвагонного подвижного состава).

В настоящее время именно электрификация – один из важнейших инвестиционных проектов Белорусской железной дороги. Программой развития железнодорожного транспорта на 2016-2020 годы является дальнейшая электрификация железнодорожных ряда железнодорожных направлений: Жлобин – Калинковичи, Калинковичи – Гомель и другие.

Проекты по электрификации Белорусской железной дороги предусматривают современное, надежное и безопасное оборудование. Например, внедрение новейших систем управления, диагностики и удаленного мониторинга состояния

оборудования в ближайшем будущем позволит обеспечить работу тяговых подстанций без обслуживающего персонала.

При электрификации используется современная контактная подвеска. Это одно из условий увеличения скорости движения поездов до 200 км/ч. Применение новых технологий снижает эксплуатационные затраты и продлевает срок эксплуатации контактной сети.

Оптимизируется и система управления движением поездов. Внедрение современных технологий сигнализации и связи позволяет минимизировать влияние человеческого фактора на безопасность железнодорожного движения. Разработан проект строительства сети радиосвязи международного стандарта GSM-R. Его главное преимущество – высокое качество связи на высоких скоростях движения. Цифровая радиосвязь увеличивает скорость обработки поездов, повышая тем самым безопасность и эффективность международных грузовых и пассажирских перевозок.

Перспективным направлением на железной дороге является создание комплексной системы управления перевозочным процессом и транспортной логистики. Ее внедрение позволит оперативно планировать поездную работу, минимизировать диспетчерский персонал и автоматизировать управление движением поездов. Все это ведет к экономической эффективности проектов.

На многих объектах Белорусской железной дороги уже внедрена автоматизированная система оформления перевозочных документов.

Также апробируется возможность формировать, передавать и обрабатывать электронные накладные с использованием электронной цифровой подписи. В опытном режиме систему уже протестировали во внутривнутриреспубликанских перевозках. Сейчас аналогичные испытания проходят в формате международных перевозок с Россией.

В перспективе при помощи специализированных информационных систем грузоотправители могут сформировать электронный перевозочный документ, поставить на нем электронную подпись и передать его в Корпоративную информационную систему Белорусской железной дороги.

Одним из важных показателей развития дороги является приобретение и производство нового, более мощного подвижного состава. В Фаниполе под Минском с 2013 года находится предприятие концерна Stadler, где осуществляется производство современного подвижного состава для стран СНГ. Тяговый и подвижной состав, который здесь производится для Белорусской железной дороги, соответствует самым высоким мировым стандартам качества и безопасности.

Начиная с 2014 г. на региональных линиях курсируют комфортабельные пригородные составы швейцарской компании «Stadler» (рисунок 1.2).

На сегодняшний день перевозки между столицей и областным центром осуществляются современным 7-вагонным электропоездами серии ЭП^М INTERCITY (рисунок 1.3) со средней скоростью движения 100 км/ч. На отдельных участках скорость составляет 140 км/ч.



Рисунок 1.2 – Электропоезд Stadler



Рисунок 1.3 – Электропоезд ЭП^М

Развитие столицы республики города Минска и его пригорода ведет к тому, что с 2015 года для расширения возможности транспортного обслуживания и условий проезда пассажиров Белорусская железная дорога реализует новый формат перевозок – «наземное метро» (поезда ЭП^Г). С его помощью пассажиры получают возможность с минимальными затратами времени осуществлять передвижение с возможностью пересадки на другие виды городского транспорта (рисунок 1.4).

Кроме того, в 2019 году совместное предприятие Stadler получило техническое задание от Белорусской железной дороги на разработку нового подвижного состава ЭП^М способным реализовать допустимое непогашенное ускорение, равное $0,9 \text{ м/с}^2$.



Рисунок 1.4 – Электропоезд ЭП^Г

Помимо электропоездов, на магистрали ходят и современные одновагонные дизельные поезда ДП1, ДП3 (рисунок 1.5), а ко II Европейским играм было закуплено еще несколько составов ДП6. Эти составы польского производства. Вагон вместимостью 90 человек движется со скоростью до 120 км/ч. Поездка на таком поезде комфортабельна и экономична. Главным преимуществом данных составов является то, что расход топлива на одного человека втрое меньше, чем у прежнего поколения дизель-поездов.

Еще одна из перспектив Белорусской железной дороги – развитие международного скоростного пассажирского сообщения в направлении Москва – Брест – Берлин. Это совместная работа с российскими железными дорогами, которая предполагает использование современных вагонов компании «Talgo». С 2017 года

Российские железные дороги запустили по маршруту Москва – Брест – Берлин три пассажирских состава «Стриж». Вагоны оборудованы автоматическим устройством изменения ширины колеи 1520/1435 мм, что существенно сокращает время прохождения границы.



Рисунок 1.5 – Дизельный поезд ДПЗ

Обновление подвижного состава касается и грузовых перевозок. Уже приобретено 6 двухсекционных грузовых электровозов БКГ1 (рисунок 1.6), производства КНР, который может перевозить массу до 8000 т.

В связи с обновлением парка подвижного состава в Барановичах запущен специализированный комплекс по ремонту колесных пар.



Рисунок 1.6 – Грузовой электровоз БКГ-1

Сегодня Белорусская железная дорога – это более 5,5 тысячи километров пути, 20 крупных железнодорожных вокзалов, более 570 остановочных пунктов и 500 железнодорожных станций. Маршрутная сеть Белорусской магистрали охватывает более 2000 населенных пунктов. На железной дороге трудятся свыше 86 тысяч сотрудников. Это более 500 профессий и должностей.

Ежегодно Белорусская железная дорога перевозит 87 миллионов пассажиров и 131 миллион тонн грузов, из них в среднем каждая вторая тонна идет на экспорт. Обеспечивая более 70 процентов грузооборота и обслуживая около 40 процентов пассажиропотока, магистраль дает более двух процентов белорусского ВВП.

Первым этапом включения Минска в европейскую систему скоростных железнодорожных пассажирских сообщений явилась реконструкция железнодорожной магистрали Брест – Минск – Москва. Планируется также повышение скоростей по направлениям между областными центрами (таблица 1.1) [17].

Таблица 1.1 - Маршрутные скорости и времена хода между Минском и областными центрами

Участок	Длина, км	Вид тяги	Скорость, км/ч	Время в пути, час	
				Существующее	Примерное требуемое
Минск – Гомель	300	Электрическая	103,45	2 ч 54 мин	2 ч 47 мин
Минск – Могилев	286,1	Тепловозная	64,00	4 ч 28 мин	4 ч 00 мин
Минск – Брест	344,6	Электрическая	108,71	3 ч 10 мин	2 ч 51 мин
Минск – Гродно	359,9	Тепловозная	87,14	4 ч 08 мин	3ч 40 мин
Минск – Витебск	294,3	Тепловозная	80,26	3 ч 40 мин	3 ч 25 мин

Для обоснования возможности и целесообразности повышения скоростей движения на основном направлении Москва – Берлин проведен краткий анализ маршрутных скоростей и времени хода по каждой из дорог, по которой проходит магистраль (Российской железной дороге, Белорусской железной дороге, Польских железных дорогах и Немецкие железных дорогах). Из таблицы 1.2, видно, что Российские и Немецкие железные дороги значительно выигрывают по скорости у остальных. Следовательно, необходимо задуматься и над повышением скоростей на оставшейся части линии и, в частности, на линии граница РФ – Брест.

Таким образом, сделав данный анализ, можно отметить, что для того, чтобы уменьшить скорость нахождения пассажиров в пути и, таким образом, составить *конкуренцию* авиационному транспорту, ходовую скорость на участках Польской и Белорусской железной дорогах требуется значительно поднять.

Таблица 1.2 - Маршрутные скорости и времена хода по участкам линии Москва – Берлин

Участок	Длина, км	Время хода в одном направлении, t _x , мин	Маршрутная скорость, км/ч
Российские железные дороги			
Москва Бел.- Смоленск	419	287	87,66
Белорусская железная дорога			
Орша – Брест	557	501	66,71
Польские железные дороги			
Тересполь – Жепин	549	507	64,97
Немецкие железные дороги			
Франкфурт на Одере – Берлин	110	87	75,86

1.3 Использование подвижного состава различного типа при введении скоростного движения поездов

Внедрение скоростного движения пассажирских поездов, как показывает мировая практика, осуществляют в большинстве случаев на эксплуатируемых железнодорожных линиях. Эти линии были построены по нормам, обеспечивающим максимальные скорости движения до 100-120 км/ч. Поэтому для реализации скоростного движения (200-250 км/ч) необходима реконструкция ряда постоянных устройств. В том числе подлежит переустройству трасса железной дороги, к параметрам плана которой при скоростном движении предъявляют более высокие требования из условия комфортабельной езды пассажиров.

Подвижной состав с наклоном кузова. Использование вагонов с наклоном кузова позволяет реализовать при существующем плане более высокие скорости движения и сократить объемы переустройства трассы.

Поезда из вагонов с наклоняемыми кузовами впервые появились в 1970-х годах с целью повышения скорости движения на линиях с кривыми малого радиуса, но их дебют нельзя было назвать успешным. Поезд UAC TurboTrain, введенный в эксплуатацию в 1972 г., находился в обращении на железных дорогах США совсем короткое время. Его модификация в Канаде продержалась несколько дольше, обслуживая маршрут Монреаль – Торонто, но и она оказалась ненадежной. Всего неделю находился в постоянной эксплуатации британский поезд Advanced Passenger Train (APT). Основной причиной неудач с этими поездами была, по-видимому, слишком большая концентрация не отработанных должным образом технических новшеств.

Первым примером подвижного состава, в котором технология наклона кузовов в определенной мере оправдала себя, был шестивагонный электропоезд серии 381, введенный в эксплуатацию в Японии в 1973 г. на маршруте Нагано – Нагоя. Пассивный наклон кузовов вагонов на угол до 6° обеспечивался за счет возможности кузова поворачиваться вокруг продольной оси на роликах, установленных над пневматическими баллонами второй ступени рессорного подвешивания. Однако скоро возникла проблема симптома морской болезни (укачивания пассажиров), и замысел повышения скорости движения со 120 до 130 км/ч на линии колеи 1067 мм, проходящей в гористой местности, остался нереализованным.

Технологию наклона кузовов намеревались использовать прежде всего на поездах региональных сообщений. Для повышения скорости движения поездов на основных направлениях сети был выбран вариант строительства специализированных высокоскоростных магистралей без кривых малого радиуса, где необходимости в такой технологии нет. Однако не отказались и от альтернативного решения – реконструкции действующих линий под скоростное движение с использованием подвижного состава, в который интегрирована именно указанная технология, должным образом усовершенствованная.

Таким образом, появились поезда Talgo Pendular в Испании (1980 г.), LRC (модернизированный TurboTrain) в Канаде (1982 г.), ETR 450 Pendolino в Италии (1988 г.) и X2000 в Швеции (1990 г.) [38].

В 1990-х годах технология наклона кузовов вагонов достигла такого уровня развития, который позволил ей стать общепринятой и найти применение на железных дорогах около 15 стран, включая 10 стран Европы. Компании – изготовители подвижного состава включают системы наклона кузовов в конструкцию подвижного состава многих серий, предназначенного для обслуживания как региональных, так и дальних сообщений.

В коммерческую эксплуатацию на испанских поездах Talgo Pendular пассивные устройства наклона поступили в 1980 г. Новый подвижной состав этой серии с 1993 г. работает на железных дорогах Германии. Такие поезда нашли применение также в Испании (частично в международном сообщении), а также в США, Канаде и Казахстане. Поезда Talgo 350 и Talgo 250 могут двигаться со скоростью соответственно до 330 и 250 км/ч.

В Швеции в начале 1970-х годов была разработана собственная система наклона кузова. Ее испытания проводили на пригородных поездах в 1986 г. Поезда с активной системой наклона серии X2000 были заказаны компании ADtranz; они находятся в эксплуатации на скоростных линиях с 1990 г. В противоположность итальянским поездам здесь устройствами наклона кузова оборудованы лишь промежуточные немоторные вагоны, в концевых моторных вагонах системы наклона не установлены.

В Германии с начала 1990х годов эксплуатируются дизель-поезда серии VT 610 с такой же техникой наклона кузова, как на итальянских поездах Pendolino. Они были заказаны для региональных линий в областях Франкония и Верхний Пфальц, на которых в то время снизились объемы пассажирских перевозок. Поезда, оборудованные устройствами наклона кузова, способствовали явному сокращению времени поездки, что вызвало приток пассажиров. Компания ADtranz разработала технические средства наклона, приводимые в действие не гидравлическими цилиндрами, а электрическими серводвигателями. После дизель-поездов серии VT 611 последовала серия VT 612. Эти дизель-поезда эксплуатируются в большом количестве на региональных линиях DB.

Для поездов, вагоны которых оборудованы системами наклона, обеспечивающими прохождение кривых с повышенной скоростью, действуют специальные инструкции. В них оговаривается или скорость движения уровня ES, обу-

словленная реальным состоянием трассы, или параметры этой трассы, измененные с целью обеспечения заданной скорости движения (например, устранение мест ограничения скорости).

В настоящее время еще нет единых значений этих параметров, применимых для железнодорожных компаний европейской сети. Максимальная скорость движения поездов с вагонами, оборудованными активными системами наклона кузова, на железных дорогах Германии (DB), Австрии (ÖBB) и Чехии (CD), ограничена величиной, равной 160 км/ч. Однако это ограничение накладывается не системой наклона кузовов, а принятым в этих странах требованием, предусматривающим оборудование линий, на которых разрешено движение поездов со скоростью выше 160 км/ч, непрерывной автоматической локомотивной сигнализацией.

Системы наклона кузовов различаются по сложности и исполнению в зависимости от условий эксплуатации и запросов заказчиков. Пассивные системы наклона проще и дешевле. В этом случае кузов вагона подвешивается таким образом, что при входе в кривую центробежная сила естественным образом отклоняет его в наружную сторону на определенный угол по отношению к вертикали. Для обеспечения возможности наклона кузова его центр тяжести должен находиться ниже точек опирания. В Европе классическим примером такой системы является испанский поезд Talgo. Кузов здесь опирается на пневматические рессоры второй ступени подвешивания, расположенные на стойках, вертикально закрепленных на одноосных тележках, общих для двух смежных сочлененных вагонов, на уровне, близком к крыше. Сжатие баллона, находящегося с внутренней стороны кривой, позволяет кузову отклониться наружу (рисунок 1.7).

Пассивные системы скорее воспринимают, чем преобразуют действующие в кривой силы. Они позволяют обеспечить наклон кузова на небольшой угол, обычно 3- 4°, и могут компенсировать до 45 % поперечного ускорения (поезд Talgo). Однако больший угол наклона позволяет в большей мере повысить скорость прохождения кривых, но это достижимо только с помощью активных систем наклона. Уже активные системы наклона первого поколения существенно продвинули решение проблемы: у британского экспериментального электропоезда ART угол наклона доведен до 9°, а у итальянских поездов семейства Pendolino до 10,5°. Такие углы обеспечиваются применением системы домкратов с привод-

ными устройствами, воздействующими на кузов вагона и принудительно поворачивающими его относительно продольной оси. Перемещение кузова в поперечном направлении при этом происходит по определенной дуге так, чтобы он не выходил за пределы габарита подвижного состава. Для этого необходимо опирание кузова на тележки через качающиеся промежуточные элементы (рисунок 1.8).

Пассивная система наклона кузовов работает независимо, активная должна приспосабливаться к инфраструктуре. Более высокая скорость сокращает время прохода переходных кривых, но чем больше скорость, тем на больший угол следует наклонить кузов вагона. При мощных домкратах наклон кузова можно выполнить достаточно быстро, но при этом должен быть обеспечен требуемый уровень комфорта.

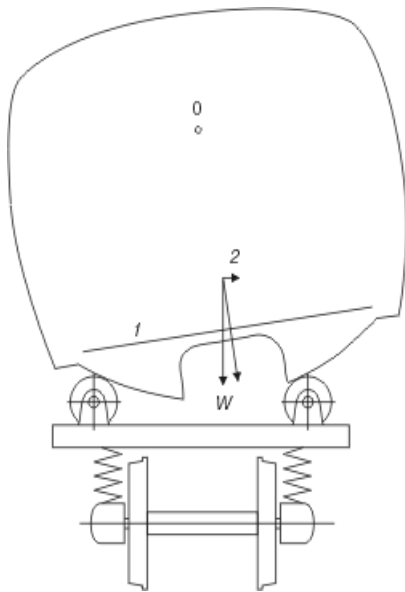


Рисунок 1.7 – Схема пассивной системы наклона кузова вагона:

1 – пол кузова; 2 – центробежная сила

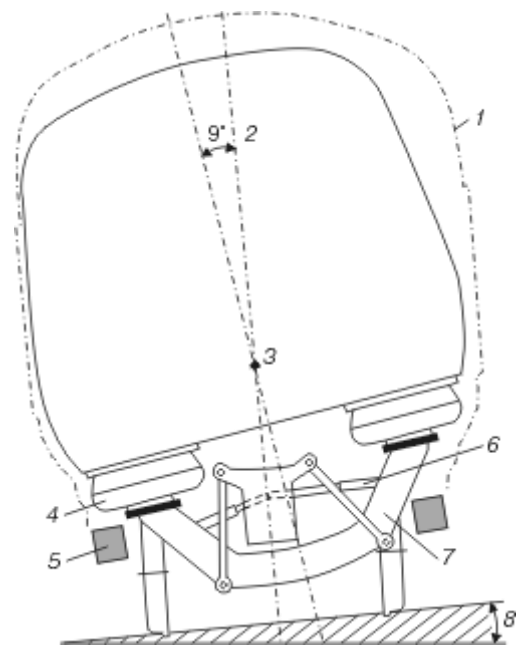


Рисунок 1.8 – Схема активной системы наклона кузова вагона: 1 – габарит подвижного состава; 2 – угол наклона; 3 – ось наклона; 4 – балон пневматической рессоры; 5 – рама тележки; 6 – домкрат наклона; 7 – поперечная балка тележки

Первоначально при разработке систем наклона кузовов вагонов исходили из принципа полной компенсации поперечного ускорения, и это было достигнуто. Однако оказалось, что при резком изменении положения кузова некоторые пас-

сажиры испытывали ощущение морской болезни. Это отмечалось уже в первых рейсах опытных поездов Pendolino в Италии, причем больше страдали пассажиры, сидящие спиной к направлению движения. Тогда конструкцию кресел изменили, и стало возможным поворачивать их так, чтобы пассажиры всегда могли сидеть лицом по ходу поезда. Это объясняют рассогласованием работы органов зрения и равновесия пассажиров, когда зрение при взгляде в окно дает ощущение наклона, а положение тела соответствует езде по горизонтали, из-за чего в головной мозг поступают противоречивые сигналы. Явление становилось менее заметным, если не смотреть в окно или в темное время суток, когда окружающий ландшафт не виден.

Выход был найден за счет того, что вместо полной компенсации поперечного ускорения ввели частичную компенсацию, т. е. оставили некоторый недостаток возвышения наружного рельса. В поездах из вагонов с наклоняемыми кузовами последней постройки остановились на компенсации 70-80 % поперечного ускорения. При этом сигналы, получаемые мозгом, становятся совместимыми. Кроме того, частичная компенсация позволяет несколько упростить технические решения систем наклона. Угол наклона можно уменьшить, за счет чего увеличить ширину кузова в пределах габарита подвижного состава. В переходных кривых становится ненужным излишнее возвышение наружного рельса, что улучшает уровень комфорта.

В России и странах СНГ также уже минимум четверть века занимаются данной проблемой многие ученые и испытательные предприятия железнодорожного транспорта. Например, ОАО «ВНИИЖТ» на своем экспериментальном кольце в г. Щербинке проводил испытания поездов с наклоном кузова [10].

Д.В. Ильин в своих работах рассматривает технологию наклона кузовов вагонов в кривых, в частности, расчет длин переходных кривых на участках обращения поездов с полуактивной системой принудительного наклона кузова [38].

В декабре 2010 г. введен в эксплуатацию электропоезд «Аллегро», курсирующий в настоящее время по маршруту Санкт-Петербург – Хельсинки. Вагоны электропоезда оборудованы системой принудительного наклона в кривых до 8°.

Начиная с 2017 г по II Трансъевропейскому коридору курсирует электропоезда ЭП20 с вагонами «Talго 250» («Стриж»).

Электропоезд ЭП20 с вагонами «Talго 250». Высокоскоростной поезд «Стриж» (рисунок 1.9) является адаптированным к условиям стран СНГ проектом испанского поезда Talго (Тальго). Пассажирский поезд «Стриж» формируется из вагонов, оборудованных системой автоматического изменения ширины колесных пар с колеи стандарта (1520 мм) на европейский (1435 мм).



Рисунок 1.9 – Электропоезд «Стриж» (Talго)

Возможность экономии времени заключается не только в уникальной системе изменения ширины колесных пар, но и в высокой максимальной скорости поездов. Она составляет 200 км/ч. Кроме того, вагоны Talго оборудованы системой наклона кузова, которая дает экономию 20-30% времени только за счет большей скорости прохождения кривых малого радиуса.

На поезде «Стриж» из Москвы в Минск можно доехать за 7 часов 50 минут, из Москвы в Варшаву — за 14 часов 33 минуты. Путь из Минска в Варшаву занимает 6 часов 29 минут.

Испанская компания Patentes Talго S.L. осуществила поставку семи поездов в Россию. В вагонном депо Москва-Киевская была проведена реконструкция, где три из шести путей депо стали предназначены исключительно для обслуживания

высокоскоростных поездов Talgo. На двух путях установлены эстакады со специальным освещением. Диагностическое оборудование позволяет выявлять дефекты в подвижном составе. В помещении депо смонтирована вытяжная система, которая позволяет безопасно выводить выхлопные газы из технических вагонов поезда. Так как был закуплен только вагонный состав поезда Talgo, то в качестве локомотива используются электровозы ЭП20.

Электровоз ЭП20 эксплуатируется на Московской и Северо-Кавказской железной дороге, а также частично на территории Республики Беларусь (участок Красное-Минск).

Электропоезд ЭП^м «Stadler» 19 ноября 2011 года состоялось открытие регулярного движения электропоездов региональных линий по маршрутам Брест – Барановичи и Барановичи – Минск, 24 декабря 2011 года – по маршруту Минск–Орша (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Электропоезд «Stadler»

Двери электропоезда имеют проем шириной 1300 мм, что в сочетании с одноуровневыми посадочными платформами высотой 550 мм (европейский стандарт) позволяет быстро осуществить посадку и высадку пассажиров и сократить длительность стоянок на остановочных пунктах.

Для облегчения посадки и высадки пассажиров с платформ высотой 200 мм, которыми оборудовано подавляющее количество станций Белорусской железной дороги, предусмотрены специальные выдвижные ступеньки.

Около каждой входной двери поезда имеется зона подогрева пола, препятствующая скоплению снега и льда и предотвращающая возможные случаи травматизма пассажиров в зимнее время. Все входные двери оборудованы тепловыми завесами, позволяющими предотвратить потери теплого воздуха при посадке и высадке, экономя тем самым электроэнергию на отопление состава.

Электропоезд оснащен системами кондиционирования воздуха и отопления, адаптированными к климатическим условиям Беларуси, позволяющими поддерживать комфортную температуру внутри салонов и в кабине машиниста. Мощность отопительной системы в зимний период способна обеспечить температуру в салонах до $+20^{\circ}\text{C}$, при температуре наружного воздуха – до -30°C .

Вагоны имеют тройные стеклопакеты с тонировкой, тепло- и солнцезащитным покрытием, обеспечивающим высокий коэффициент теплоизоляции при сохранении высокой светопропускной способности.

В пассажирских салонах смонтировано несколько дисплеев, на которые выводится информация о маршруте следования поезда, температуре наружного воздуха, текущем времени. С помощью этих же дисплеев осуществляется трансляция различных видеозаписей.

Электропоезд серии ЭС1 «Ласточка». Всего в РФ эксплуатируется 9 электропоездов ЭС1 «Ласточка» исполнения «Премиум». Электропоезда ЭС1 «Ласточка» исполнения «Премиум» эксплуатируются на полигонах Октябрьской и Московской железных дорог, а именно Санкт-Петербург – Петрозаводск, Москва – Курск (рисунок 1.11).

Особенным преимуществом ЭС1 является возможность эксплуатации при допуске непогашенном ускорении $0,9 \text{ м/с}^2$, что значительно увеличивает скорость прохождения кривых, а, следовательно, уменьшает время нахождения в пути.



Рисунок 1.11 – Электропоезд ЭС2Г «Ласточка»

Сравнительные характеристики подвижных составов приводятся в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сравнительная характеристики подвижного состава для скоростного движения

Характеристики \ Поезда	ЭП ^М «Stadler»	ЭС1 «Ласточка»	ЭП20 «Стриж (Talgo)»
Конструктивная скорость, км/ч	160	160	200
Максимальная скорость в эксплуатации, км/ч	138	140	179
Допускаемая величина непогашенного ускорения, $a_{нп}$, м/с ²	0,7	0,9	1,1
Вид тяги	электрическая	электрическая	электрическая
Род тока	Переменный/ постоянный	Переменный/ постоянный	Переменный/ постоянный
Число вагонов в составе, шт	4	5	9
Пассажиро вместимость, чел	260	346	257
Тип торможения	Рекуперативное	Реостатное /Рекуперативное	Реостатное
Длина вагона, мм	18800	26200	20000
Длина поезда, м	75,2	130	225
Материал вагона	Алюминиевый сплав	Алюминиевый композитный сплав	Алюминиевый композитный сплав
Масса, т	278	380	245
Масса подвижного состава на 1-го пассажира, т	1,07	1,08	0,95

1.4 Постановка задачи исследования

Анализ теории и опыта эксплуатации пассажирского транспорта в различных странах мира показывает устойчивую тенденцию увеличения скоростей движения поездов. При этом можно выделить два варианта внедрения высоких скоростей:

- реализация высокоскоростного движения на новых специализированных магистралях;
- введение скоростного движения на существующих линиях со смешанными грузовыми и пассажирскими перевозками.

При переходе на скоростное движение пассажирских поездов существующие линии подлежат реконструкции постоянных устройств. Кроме того, имеет место внедрение модернизированного или специального подвижного состава для пассажирского движения.

В составе переустройства постоянных сооружений наиболее капиталоемким мероприятием является реконструкция плана линии для обеспечения комфортабельной езды пассажиров. Объем реконструкции плана можно существенно сократить за счет использования специального подвижного состава с наклоном кузова вагонов (ЭП20 «Talgo») либо применение подвижного состава, способного реализовывать допустимое непогашенное ускорение в кривых $0,9 \text{ м/с}^2$ с условием обеспечения безопасности и комфортабельности езды пассажиров (ЭС2Г «Ласточка», а в дальнейшем новые модели «Stadler»).

Исследована возможность повышения скоростей движения современного подвижного состава на участке Белорусской железной дороги без переустройства пути за счет реализации в кривых участках пути повышенных значений непогашенных ускорений.

В связи с увеличением сѐма грузовых поездов пассажирскими мощность существующих линий оказывается недостаточной. Необходимы меры по увеличению пропускной и провозной способности существующей железной дороги.

При обосновании проектных решений по выбору наиболее рациональных параметров реконструкции железных дорог под скоростное движение большое значение, особенно в рыночных условиях, приобретает необходимость учета частичной неопределенности исходных данных об условиях строительства и эксплуатации дороги.

В этой связи, в качестве задачи исследования необходимо:

- провести технико-экономическое обоснование инвестиций в использование нового подвижного состава, способного реализовывать более высокие скорости;

- разработать методику выбора радиуса круговых кривых в плане для реконструкции дорог с учетом использования различного типа подвижного состава (на примере Белорусской железной дороги);

- определить структуру денежного критерия, соответствующую наиболее эффективному варианту комплекса конкретных параметров при реконструкции железных дорог для скоростного движения;

- разработать методики расчета стоимости пассажира-часа при выполнении сравнительной технико-экономической оценки обращающегося и нового подвижного состава;

- разработать методику выбора параметров реконструкции железных дорог для скоростного движения с учетом частичной неопределенности исходной информации.

2 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ НА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

2.1 Обоснование параметров плана железной дороги

К параметрам плана трассы железных дорог для скоростного пассажирского движения предъявляются повышенные требования. В частности, это касается трех элементов плана: круговых и переходных кривых, прямых вставок между смежными кривыми.

2.1.1 Радиусы круговых кривых

Величина радиуса круговых кривых обуславливает безопасность и плавность движения, комфортабельность поездки и самочувствие пассажиров, а также износ верхнего строения пути и подвижного состава и другие технико-экономические показатели.

При движении экипажа по кривой на него действует центробежная сила, направленная по радиусу от центра кривой.

Эта сила прижимает экипаж к наружной нити, затрудняет его поворот и увеличивает вертикальное давление на наружный рельс. В результате возрастает износ наружного рельса.

Центробежная сила действует на пассажиров, ухудшая комфортабельность езды. Эти условия и определяют величину радиусов круговых кривых.

Обеспечение равномерного износа рельсовых нитей.

Для равномерного износа рельсов необходимо обеспечить одинаковое вертикальное воздействие на обе нити рельсов. С этой целью устраивают возвышение

наружного рельса h . На рисунке 2.1 показана расчетная схема определения величины возвышения из условия одинакового давления на обе нити рельсов [112].

Из равенства суммы моментов

$$(I \cos \beta - G \sin \beta)a = 0,5(E_B - E_H)S,$$

где I – центробежная сила; β – угол наклона вагона, обусловленный возвышением наружного рельса; G – вес вагона; a – расстояние от уровня головок рельсов до центра тяжести, м; E_H , E_B – нормальные реакции наружного и внутреннего рельса в кривой; S – расстояние между точками опоры колес на рельсы.

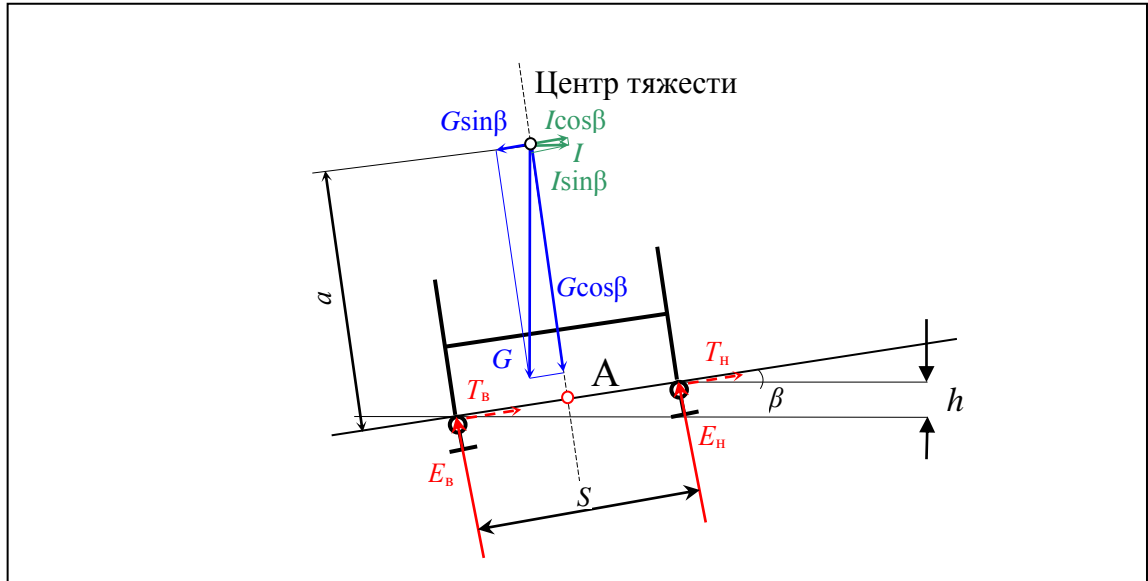


Рисунок 2.1 – Схема расчета возвышения для обеспечения одинакового износа рельсов при обычном подвижном составе

Допущения: $\cos \beta \approx 1$; $\sin \beta = \operatorname{tg} \beta$. Центробежная сила определяется по формуле

$$I = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R}.$$

Тогда

$$\left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S}\right) = 0,5(E_B - E_H)S; \quad E_B - E_H = \left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S}\right) / (0,5S) = 0;$$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - \frac{h}{S} = \frac{v^2}{R} - \frac{g \cdot h}{S} = 0,$$

где v – скорость движения поезда в м/с.

Наряду с этим, необходимо внести ряд поправок, учитывающих влияние продольных сил, эксцентриситетов расположения колесных пар в колее и др.

В окончательном виде возвышение для уравнивания сил воздействия на наружную и внутреннюю нити рельсов рекомендуется определять по формуле

$$h = \frac{1,6 \cdot v^2}{g \cdot R} = \frac{1,6 \cdot 1000 \cdot v^2}{3,6 \cdot 3,6 \cdot 9,81 \cdot R} = \frac{12,5 \cdot V_{\text{ср}}^2 \cdot K}{R}, \text{ мм} \quad (2.1)^1$$

где K – коэффициент, учитывающий названные выше поправки; $V_{\text{ср}}$ – средневзвешенная по пропущенному тоннажу скорость движения потока поездов, км/ч; для скоростного движения $K=1,2$.

Подвижной состав с наклоном кузова. При использовании подвижного состава с наклоном кузова Talgo во время движения по кривому участку пути появляется дополнительный угол α (рисунок 2.2), вследствие чего может иметь место смещение центра тяжести. Здесь имеет место пассивная система наклона кузова, где движущим механизмом выступает центробежная сила. Вагон отклоняется не внутрь. Допустимое значение угла наклона – 3,5 градуса. Преимуществом пассивной системы является ее стоимость. Дополнительное оборудование (датчики, элементы управления) тут не используется. Кроме того, пассивный принцип наклона позволяет обеспечить большой комфорт поездки [14].

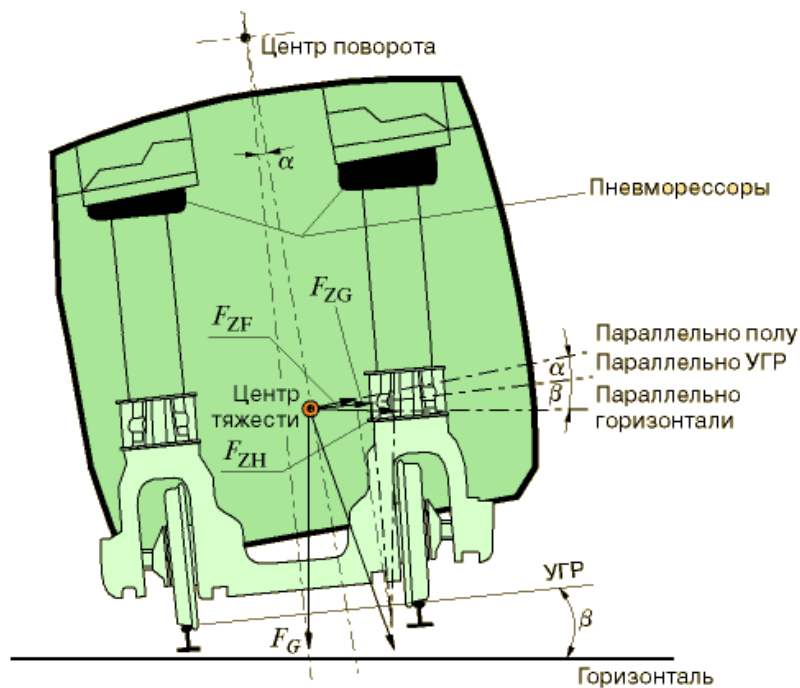


Рисунок 2.2 – Кинематика системы наклона кузова в поезде Talgo:

F_{ZF} — поперечная сила, действующая параллельно полу вагона; F_{ZG} — то же, параллельно уровню головки рельсов; F_{ZH} — то же, параллельно горизонтали; F_G — сила тяжести

Схема приложения сил в этом случае показана на рисунке 2.3.

¹ В действующих нормативных документах коэффициент, увязывающий размерности величин равен 12,5, точное значение -12,585. Округление в меньшую сторону в некоторой степени компенсирует допущение $\cos\beta=1$.

Уравнение моментов относительно точки А (пересечение оси пути и линии уровня головки рельсов)

$$(I \cos \beta - G \sin \beta)a + (G \cos \beta + I \sin \beta)e = 0,5(E_B - E_H)S; \quad I = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R};$$

$$\left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S}\right)a + \left(G + \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{S}\right)e = 0,5(E_B - E_H)S;$$

$$E_B - E_H = \left[\left(\frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - G \frac{h}{S}\right)a + \left(G + \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{S}\right)e\right] / (0,5S) = 0;$$

$$\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{v^2}{R} - \frac{h}{S}\right)a + \left(1 + \frac{1}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{S}\right)e = 0;$$

$$\left(\frac{1}{9,81} \cdot \frac{v^2}{R} - \frac{h}{1,6}\right)a + \left(1 + \frac{1}{9,81} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \frac{h}{1,6}\right)e = 0;$$

$$h = \frac{1,6(a \cdot v^2 + e \cdot g \cdot R)}{a \cdot g \cdot R - v^2 \cdot e}, \text{ м} = \frac{1,6(a \cdot v^2 + e \cdot g \cdot R)}{a \cdot g \cdot R - v^2 \cdot e}, \text{ м};$$

$$h = \frac{1,6 \cdot 1000(a \cdot V^2 / (3,6 \cdot 3,6) + e \cdot 9,81 \cdot R)}{a \cdot 9,81 \cdot R - V^2 / (3,6 \cdot 3,6) \cdot e} = \frac{1600 \cdot (a \cdot V^2 / 12,96 + e \cdot 9,81 \cdot R)}{a \cdot 9,81 \cdot R - V^2 \cdot e / 12,96} =$$

$$= \frac{123,456 \cdot a \cdot V^2 + 15696 \cdot e \cdot R}{9,81 \cdot a \cdot R - V^2 \cdot e / 12,96} = \frac{12,585 \cdot a \cdot V^2 + 1600 \cdot e \cdot R}{a \cdot R - 0,00787 \cdot V^2 \cdot e};$$

$$h = \frac{12,585 \cdot a \cdot V^2 + 1600R \cdot e / a}{R - 0,00787 \cdot V^2 \cdot e / a}, \text{ мм} \quad (2.2)$$

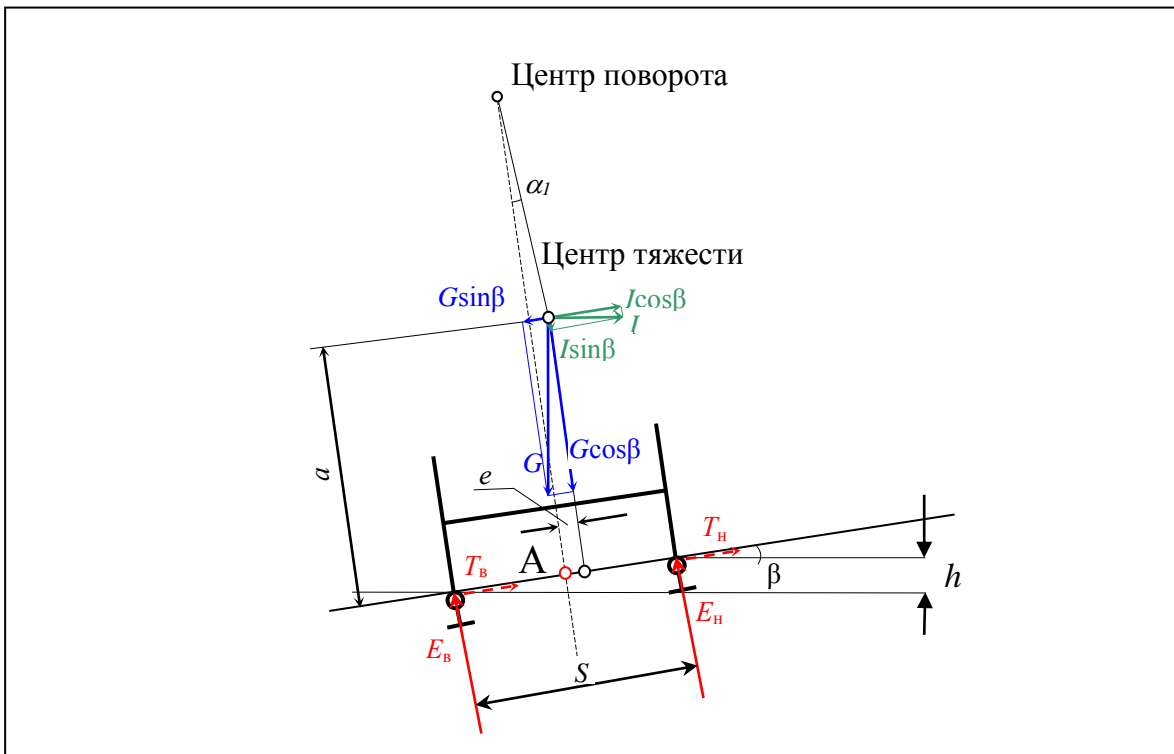


Рисунок 2.3 – Схема расчета возвышения для обеспечения одинакового износа рельсов при подвижном составе с наклоном кузова

где e – смещение центра тяжести вагона из-за наклона кузова, м;

α_1 – угол отклонения центра тяжести вагона относительно центра поворота (см. рисунок 2.3) при движении по кривой.

Пробные расчеты по формуле (2.2) показали, что составляющей $0,00787V^2e/a$ можно пренебречь. Тогда, при средневзвешенной скорости поездов V_{cp} , формула приобретает следующий вид:

$$h = \frac{12,585 \cdot K \cdot V_{cp}^2}{R} \pm 1600 \cdot \frac{e}{a}, \text{ мм} \quad (2.3)$$

Знак второго слагаемого формулы зависит от направления смещения центра тяжести: «+» - от центра кривой, «-» - к центру кривой.

Во многих вагонах с принудительным наклоном кузова поворот предусмотрен вокруг центра тяжести при $e=0$. При этом рекомендуемый радиус кривой по условию равномерного износа будет равен

$$R = \frac{12,585 \cdot V_{cp}^2 \cdot K}{h \pm 1600e/a}, \text{ м} \quad (2.4)$$

Обеспечение комфортабельной езды пассажиров.

Возвышение, обеспечивающее комфортабельную езду пассажиров при обычном подвижном составе, определяют по формуле

$$h = 12,5 \frac{V_{max}^2}{R} - a_n \frac{S}{g}, \quad (2.5)$$

Если за возвышение принимать его максимальную величину (для железных дорог Республики Беларусь $h=150$ мм), при $a_n = 1,0$ м/с², $S = 1600$ мм, $g = 9,81$ м/с², то из формулы (2.5) можно определить максимально допускаемую по условиям комфортабельности скорость движения (V_{max}) и рекомендуемый радиус кривых

$$V_{max} = 4,295\sqrt{R}, \quad (2.6)$$

$$R = 0.054V_{max}^2. \quad (2.7)$$

Расчеты по формуле (2.6) показывают, что для реализации скоростей порядка 160 – 200 км/ч необходимы радиусы круговых кривых 1500-2500 м. Рассматривая отдельные линии, можно убедиться в том, что увеличение скоростей до вышеупомянутого уровня может потребовать значительной реконструкции плана железнодорожного пути.

На рисунке 2.4 приведена схема действия сил на пассажира при проследовании кривого участка пути подвижным составом с наклоном кузова.

При движении в кривой на пассажира в вагоне с наклоном кузова действуют следующие силы:

$G_1 \sin(\alpha + \beta)$ - составляющая веса пассажира, направленная к центру кривой;

$I \cos(\alpha + \beta)$ - составляющая центробежной силы, направленная от центра кривой, равная $\frac{G_1 \cdot v_{\max}^2}{g \cdot R} \cdot \cos(\alpha + \beta)$.

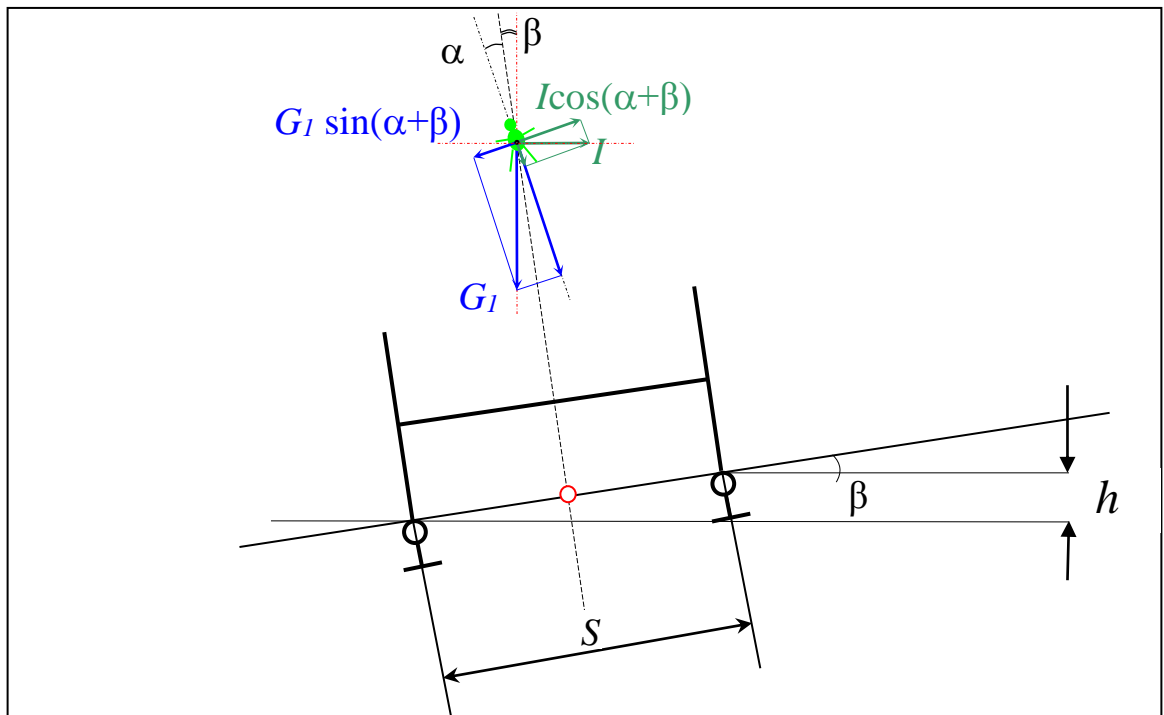


Рисунок 2.4 – Схема к расчету радиуса по условию комфортабельности пассажиров

Баланс сил, действующих на пассажира:

$$\frac{G_1 \cdot v_{\max}^2}{g \cdot R} \cos(\alpha + \beta) - G_1 \sin(\alpha + \beta) = \frac{G_1}{g} \cdot a_{\text{ин}} \cdot \cos(\alpha + \beta).$$

$\frac{G_1}{g} \cdot a_{\text{ин}} \cdot \cos(\alpha + \beta)$ – непогашенная центробежная сила.

После преобразований получаем

$$R_{\min} = \frac{v_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + g \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \beta)} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + g \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \beta)}.$$

Таким образом, точные формулы для определения минимального радиуса, обеспечивающего комфортабельность пассажиров, имеют следующий вид:

подвижной состав с наклоном кузова

$$R_{\min} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 9,81 \cdot \operatorname{tg}(\pi \cdot \alpha^\circ / 180 + \arcsin(h/S))}; \quad (2.8)$$

$$\text{при } h=150 \text{ мм } R_{\min} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 9,81 \cdot \operatorname{tg}(\pi \cdot \alpha^\circ / 180 + 0,09389)};$$

обычный подвижной состав

$$R_{\min} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 9,81 \cdot \operatorname{tg}(\arcsin(h/S))}; \quad (2.9)$$

$$\text{при } h=150 \text{ мм } R_{\min \text{ пс}} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 9,81 \cdot \operatorname{tg}(0,09389)}.$$

Приближенные формулы:

подвижной состав с наклоном кузова

$$R_{\min} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 9,81 \cdot \sin(\pi \cdot \alpha^\circ / 180 + \arcsin(h/S))}; \quad (2.10)$$

$$\text{при } h=150 \text{ мм } R_{\min \text{ пс}} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 9,81 \cdot \sin(\pi \cdot \beta / 180 + 0,09389)};$$

обычный подвижной состав

$$R_{\min} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 9,81 \cdot h/S}; \quad (2.11)$$

$$\text{при } h=150 \text{ мм } R_{\min} = \frac{0.0772V_{\max}^2}{a_{\text{ин}} + 0,9197}.$$

Расчет возвышения наружного рельса при заданном радиусе по условию обеспечения комфортабельной езды выполняется по формуле

$$h = 1600 \sin \left[\left(\arctg \left(\frac{0,0772 V_{\max}^2}{gR} - \frac{a_{\text{нп}}}{g} \right) - \frac{\pi \alpha^\circ}{180} \right) \right]. \quad (2.12)$$

На рисунке 2.5 приведены зависимость радиуса кривой от максимальной скорости движения пассажирских поездов по условию обеспечения комфортабельной езды. Расчеты выполнены при $h = 150$ мм, $a_{\text{нп}} = 1,0$ м/с² и $\alpha = 3,5^\circ$ для различного подвижного состава по точным и приближенным формулам.

Анализ результатов позволяет отметить, что точные и приближенные формулы дают примерно один и тот же результат.

Использование вагонов с наклоном кузова существенно уменьшает требуемую величину радиуса круговой кривой. В рассмотренном примере при $V_{\max} = 200$ км/ч требуемая величина радиуса уменьшилась на 40-45%.

На рисунке 2.6 показано влияние на величину необходимого радиуса нормативного непогашенного ускорения. При увеличении $a_{\text{нп}}$ от 0,5 до 1 м/с² требуемый радиус по условию комфорта уменьшается на 26 % - при обычном подвижном составе и на 17 % - при подвижном составе с наклоном кузова.

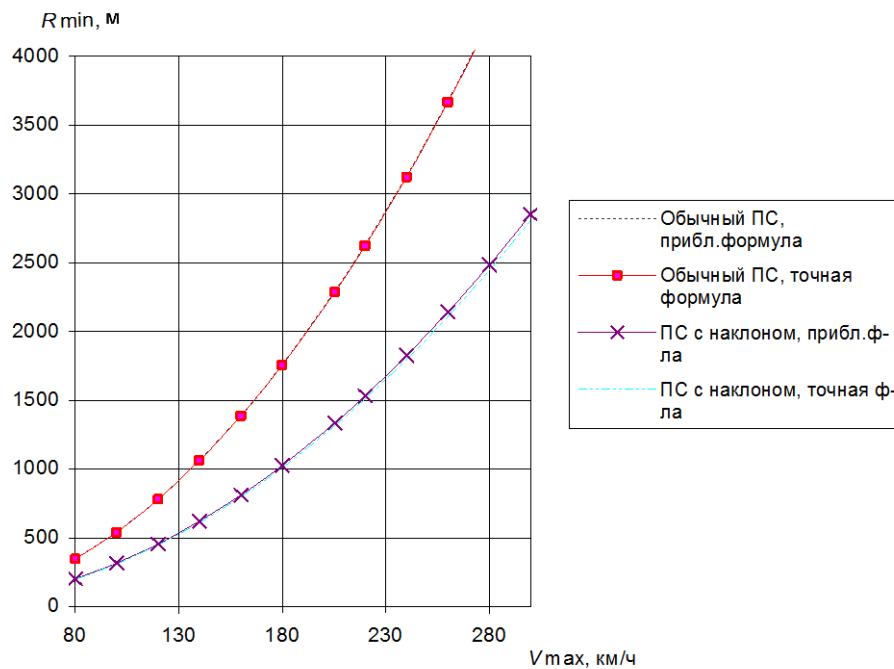


Рисунок 2.5 – График зависимости минимально необходимого радиуса по комфортабельности езды от максимальной скорости R_{\min}

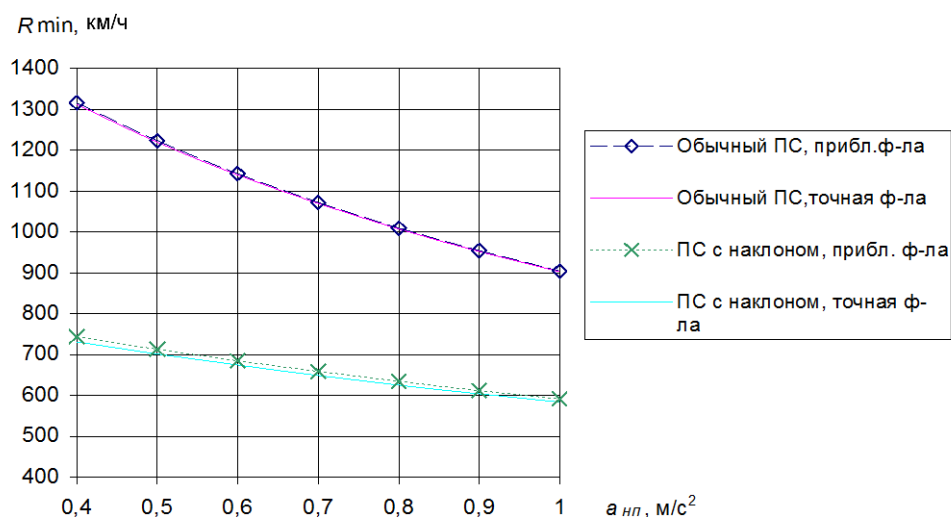


Рисунок 2.6 – График зависимости R_{\min} от непогашенного ускорения ($V_{\max\text{ПС}} = 200$ км/ч; $h = 150$ мм; $\alpha = 3,5^\circ$)

Максимально-допустимая скорость движения по кривой из формулы (3.7) при $h=150$ мм и $a_{нп}=1,1$ м/с² равна

$$V_{\max} = \sqrt{R(6.477 + 127.073\text{tg}(0.017453\alpha^\circ + 0.09388))}.$$

Для обычного подвижного состава $V_{\max} = 4,295\sqrt{R}$,

Для вагонов с наклоном кузова при $\alpha=3,5^\circ$ $V_{\max} = 5,661\sqrt{R}$

Анализ зависимости максимально-возможной скорости при обеспечении комфорта пассажиров (рисунок 2.7) показывает, что использование вагонов с наклоном кузова позволяет на существующей трассе заметно увеличить скорости движения. Для условий примера скорости возрастут на 20-25%.

Подвижной состав с локомотивом ЭС2Г «Ласточка». «Ласточка» подвижной состав, созданный компанией Siemens AG специально для Российских железных дорог. Начиная с 2015 года до 2020г. ООО «Уральские локомотивы» производят и поставляют для ОАО «РЖД» 1200 вагонов электропоездов в различных модификациях (для пригородного, городского и межрегионального сообщений). В настоящее время базовым проектом по разработке и производству электропоездов для пассажирских перевозок, реализуемым в настоящее время в ООО «Уральские локомотивы», является электропоезд ЭС2Г «Ласточка».

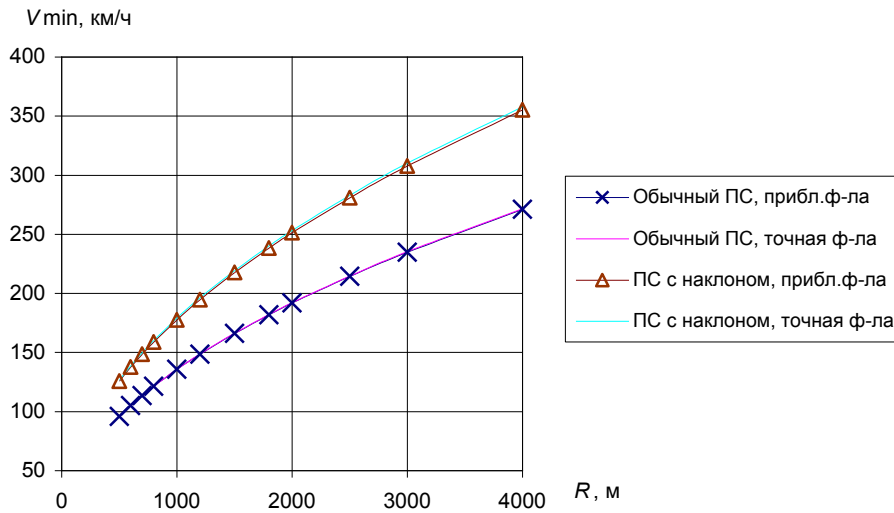


Рисунок 2.7 – График зависимости $V_{\min}(R)$ при $a_{\text{нп}}=1,1 \text{ м/с}^2$; $h = 150 \text{ мм}$; $\alpha = 3,5^\circ$

Основной особенностью ЭС2Г является увеличение допустимого непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$.

Экспериментальными исследованиями установлено, что длительное и повторное воздействие непогашенного центростремительного ускорения, величиной до $0,9 \text{ м/с}^2$, включительно, большинство людей переносит удовлетворительно [27]. Согласно исследованиям ВНИИЖТа, ощущения укачивания, подташнивания и головокружения у пассажиров при поперечном непогашенном ускорении $0,9 \text{ м/с}^2$ увеличивается на 0,05 усл. единицы и находится в допуске. Непогашенное центростремительное ускорение, равное 1 м/с^2 , переносится удовлетворительно при немногочисленных и непродолжительных воздействиях. Так как и общее функциональное состояние и работоспособность локомотивных бригад при комплексном воздействии шума, вибрации и непогашенного ускорения $0,9 \text{ м/с}^2$ находится в оптимальных пределах допуска.

Таким образом, увеличение непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$ не окажет существенного влияния на организм пассажиров, но может существенно сэкономить время в пути за счет более быстрого прохождения кривых².

Исходя из вышесказанного, чтобы рассмотреть, как влияет изменение величины непогашенного ускорения в кривых до $0,9 \text{ м/с}^2$ на скорость прохождения и радиус кривой формулу (2.5) преобразуем с учетом $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$

² Аналогичным образом можно производить расчет и для нового подвижного состава «Stadler» с допустимым непогашенным ускорением $0,9 \text{ м/с}^2$.

$$h = 12,5 \frac{V_{\max}^2}{R} - 147. \quad (2.13)$$

Следовательно, после всех преобразований, исходя из того, что возвышение наружного рельса максимальное ($h = 150$ мм), скорость прохождения кривой электропоездом «Ласточка» будет иметь вид:

$$V_{\max} = 4,87\sqrt{R}. \quad (2.14)$$

Рассчитаем, как изменится скорость прохождения криволинейных участков при использовании различного типа подвижного состава (таблица 2.1, рисунок 2.8).

Таблица 2.1 – Скорость прохождения кривых различным типом подвижного состава

Радиус, м	Скорость, км/ч		
	Обычный подвижной состав	ЭП20 с вагонами «Talго»	ЭС2Г «Ласточка»
400	92,00	112,00	97,40
450	97,58	118,79	103,31
500	102,86	125,22	108,90
550	107,88	131,33	114,21
600	112,68	137,17	119,29
650	117,28	142,77	124,16
700	121,70	148,16	128,85
1000	145,46	177,09	154,00
1200	159,35	193,99	168,70
2000	205,72	250,44	217,79
2500	230,00	280,00	243,50
3000	251,95	306,72	266,74

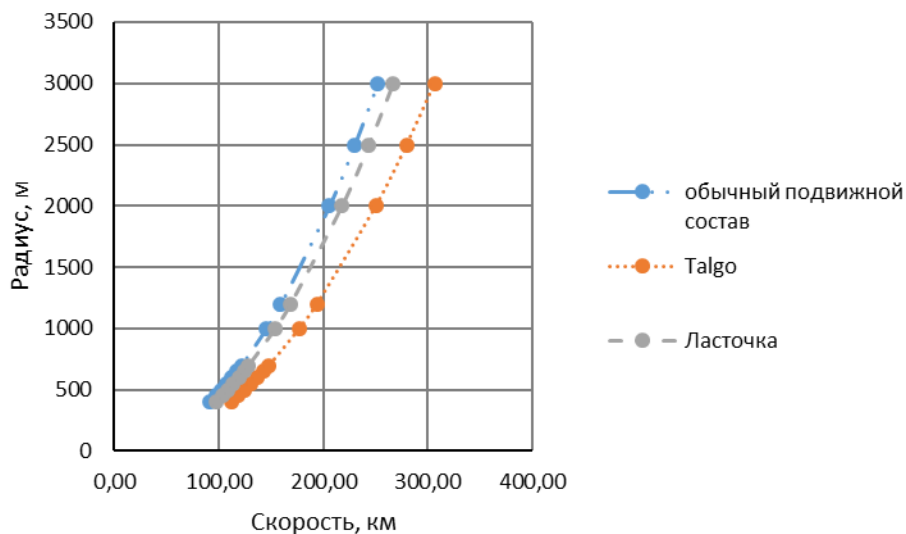


Рисунок 2.8 – Зависимость скорости прохождения кривых от радиуса при различном типе подвижного состава

Определение рекомендуемых радиусов круговых кривых для реконструкции плана при введении скоростного движения пассажирских поездов.

Определение величин радиусов кривых выполняется для каждой кривой реконструируемого участка с учетом скоростей проследования её поездами разных категорий и размеров движения.

Порядок расчетов рекомендуемой величины радиуса $R_{рек}$ показан в виде блок-схемы алгоритма на рисунке 2.9.

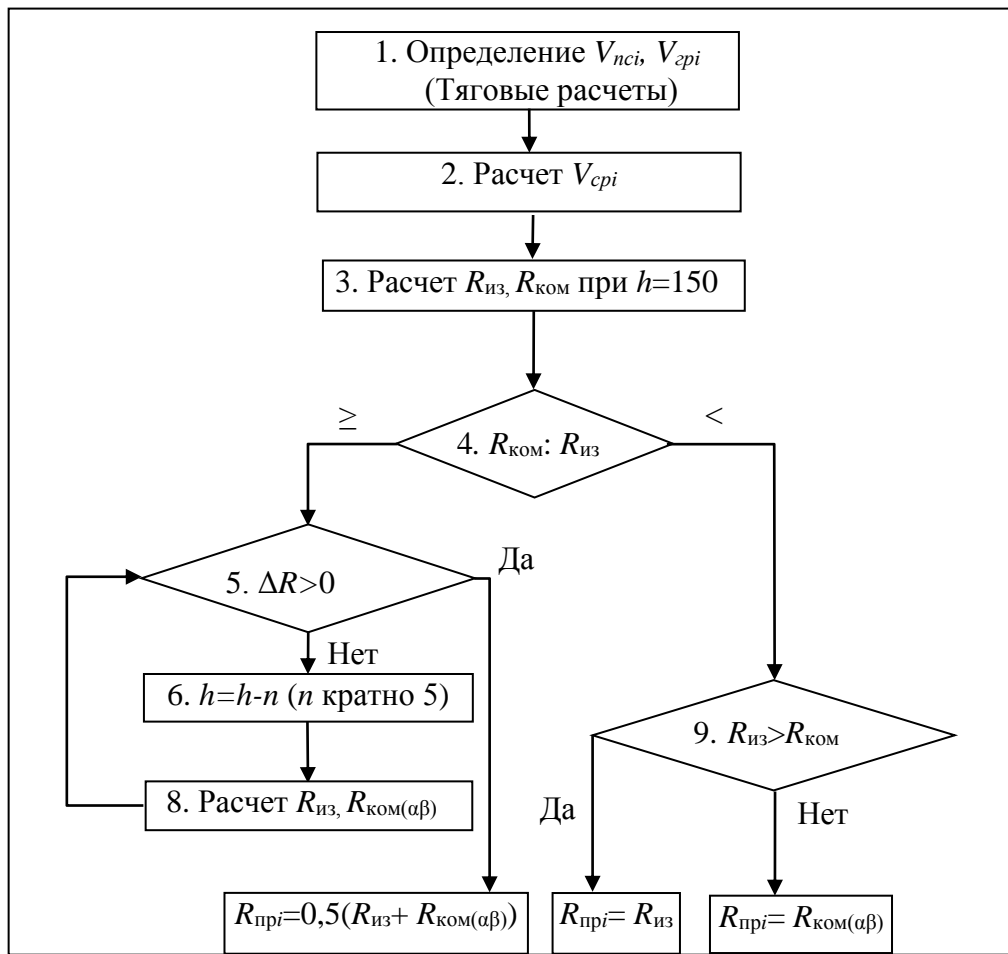


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритма определения нормативных радиусов кривых

Предварительно необходимо выполнить тяговые расчеты для всех видов поездов и установить скорости движения по каждой из кривых (блок 1).

С использованием данных тяговых расчетов и заданных на 10-й год размеров перевозок вычисляется средневзвешенная скорость движения поездопотока $V_{ср}$ (блок 2).

В блоке 3 выполняется расчет радиуса кривой по условию одинакового износа рельсов ($R_{из}$ – формула 2.4) и комфортабельной езды пассажиров ($R_{ком}$ – формула 2.7) при максимальном возвышении 150 мм.

В блоке 4 выполняется сравнение радиусов, полученных по равномерному износу и по комфортабельности. На рисунке 2.10 показана зависимость $R_{из}$ и $R_{ком}$ от возвышения наружного рельса.

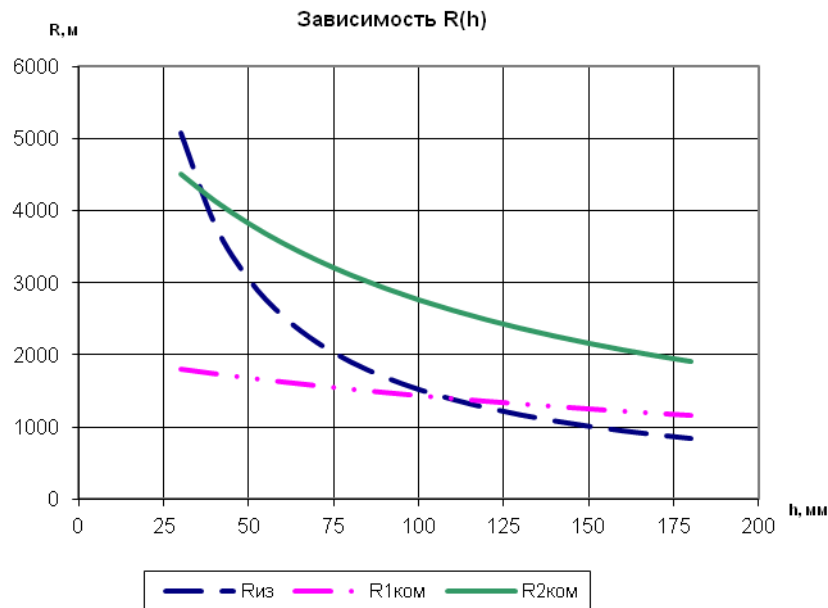


Рисунок 2.10 – График зависимости величины радиуса кривой от возвышения наружного рельса: $R_{из}$ – радиус по условию одинакового износа рельсов; $R_{1ком}$ – радиус по условию комфортной езды пассажиров в вагонах с наклоном кузова; $R_{2ком}$ – радиус по условию комфортной езды пассажиров в обычных вагонах.

В этом случае необходимо принимать больший из радиусов $R_{из}$ и $R_{ком}$ при $h=150$ мм. При этом, если $R_{из} > R_{ком}$, то при проектном значении радиуса, равном $R_{из}$, будет обеспечено равномерное давление на рельсы и непогашенное ускорение меньше нормативного значения.

Если $R_{ком} > R_{из}$, то будут обеспечены комфортабельные условия, а давление на внутренний рельс и его износ будут большими.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет определять величины радиуса кривой с учетом условий её эксплуатации – скоростей движения и размеров перевозок. Алгоритм реализован в электронных таблицах Excel. На рисунке 2.11 приведен пример расчетов.

В первой таблице приводятся характеристики условий эксплуатации реконструируемой железной дороги: размеры грузового движения по рассматриваемому пути $\Gamma_{нт}$; число пар пассажирских поездов $n_{пс}$; масса пассажирского поезда $Q_{пс}$; непогашенное ускорение $a_{нп}$; угол наклона кузова вагона α° (для обычного подвижного состава $\alpha^\circ=0$).

Таблица 3.1 - Общие характеристики линии

Грузонапряженность $\Gamma_{нт}$, млн ткм нетто/км в год	$n_{пс}$, п. п./сут.	$Q_{пс}$, Т	$a_{нп}$, м/с ²	α°
45,066	25	651	0,5	6

Таблица 3.2 - Расчет радиуса и возвышения наружного рельса (вагоны с наклоном кузова)

№ кривой	$V_{пс}$, км/ч	$V_{гр}$, км/ч	$V_{ср}$, км/ч	$R_{из}$, м	$R_{ком}$, м	$R_{рек}$, м	h , мм
1	200	86	100	1012	1246	1394	108
2	150	90	97	934	702	934	150

Рисунок 2.11 – Определение радиуса в таблицах Excel

Во второй таблице заданы скорости движения пассажирских ($V_{пс}$) и грузовых ($V_{гр}$) поездов по каждой кривой, полученные в результате тяговых расчетов. В последних двух колонках приведены результаты определения рекомендуемого радиуса $R_{рек}$ и соответствующего ему возвышения наружного рельса h .

2.1.2 Длины переходных кривых и прямых вставок

Переходные кривые необходимы для обеспечения плавного перехода подвижного состава из прямого участка пути в кривые или из кривой одного радиуса или возвышения в кривую другого радиуса или возвышения.

В пределах переходных кривых устраиваются совмещенный отвод кривизны, возвышения наружного рельса и уширения колеи.

Переходные кривые в плане представляет собой кривую переменного радиуса, уменьшающегося от ∞ (бесконечно большого) до радиуса круговой кривой с уменьшением кривизны пропорционально изменению длины. Кривая, обладающая таким свойством, представляет собой радиоидальную спираль, уравнение которой выражается в виде ряда

$$y = \frac{x^3}{6C} \left(1 + \frac{2x^4}{35C^2} + \frac{293x^8}{237000C^4} + \dots \right), \quad (2.15)$$

где C – параметр переходной кривой ($C=LR$),

l – длина дуги.

Такие переходные кривые могут использоваться и на линиях с высокими скоростями движения пассажирских поездов.

Экипаж при входе в переходную кривую начинает направляться наружной рельсовой нитью в средней части переходной кривой, где кривизна становится более $(1/650) - (1/750)$ м. «Эффективная длина» переходной кривой намного меньше ее фактической длины.

Уровень комфорта пассажиров при движении поезда в переходных кривых можно оценить исходя из трех факторов: поперечного ускорения, скорости изменения ускорения и скорости поворота тела вокруг продольной оси вагона. Величина некомпенсированного поперечного ускорения в переходных кривых больше, чем в круговых, и мало зависит от применения технологии наклона кузова вагона, но скорость изменения ускорения в таком случае выше, поскольку выше и скорость движения поезда.

Известно, что увеличение угла наклона кузова вагона уменьшает величину поперечного ускорения при движении в кривых, но скорость поворота тела при этом возрастает. Так, при угле наклона кузова равном 9° , и угле недостатка вышения наружного рельса, равном 6° , т.е. при указанных типичных условиях, скорость поворота тела в 3 раза выше, чем без наклона кузова. Насколько значительна эта разница, зависит от продолжительности нахождения вагона на переходной кривой.

Для типичного случая прохождения переходной кривой за 3 с комфорт стоящих пассажиров в вагонах с наклонными кузовами существенно ухудшается, и поэтому повышение скорости движения поезда из таких вагонов по сравнению с поездом из обычных вагонов при условии сохранения того же уровня комфорта ограничено 25%. Если переходные кривые короче и поезд проходит их, к примеру, за 2 с, возможность повышения скорости поезда из вагонов с наклоняемыми кузовами еще больше уменьшается [47].

В противоположность явлениям, возникающим при движении поезда в переходных кривых, которые можно рассматривать для каждой кривой в отдельности, головокружение имеет кумулятивный характер и обостряется в зависимости от индивидуальных показателей здоровья пассажиров, хотя полного представления об этих зависимостях еще нет. Ясно только, что эффект головокружения накапливается и углубляется при большом числе следующих друг за другом кривых малого радиуса с короткими переходными кривыми. В связи с этим необходимо уточнить долю поперечного ускорения, подлежащую компенсации, и вести в систему управления механизмом наклона кузова вагона алгоритм оптимизации угла наклона в каждой кривой.

Однако длины переходных кривых при существующем состоянии железнодорожных линий не всегда соответствуют требованиям исследований и СП. При применении подвижного состава с наклоном кузова ($3,5^\circ$), который позволяет увеличить скорость движения на направлениях с большим количеством кривых без их переустройства, теоретически можно повысить скорость в кривых с малыми возвышениями наружного рельса на величину более 25 %. Но, с другой стороны, необходимо снижать скорость движения из-за превышения непогашенного ускорения кузова и скорости его изменения при преодолении переходной кривой. Этот факт может привести к тому, что система принудительного наклона не в полной мере себя оправдывает и увеличение скорости прохождения кривых может оказаться менее 20 %.

Одним из путей решения данной проблемы является переустройство пути, которое будет заключаться в установлении необходимой длины переходной кри-

вой до уровня, при котором время ее прохождения будет не меньше времени, складывающегося из времени на обнаружение начала кривого участка пути (времени нарастания непогашенного ускорения кузова вагона до порогового значения) и времени срабатывания механизма наклона (приведения кузова в наклонное положение).

Длина переходной кривой, необходимая для приведения кузова в наклонное положение, зависит не только от возвышения наружного рельса в круговой кривой (по стандартным методикам расчета), но и от порогового значения непогашенного ускорения и угла наклона кузова вагона (от постоянных величин для механизма наклона), а также радиуса круговой кривой и принятого допустимого значения непогашенного ускорения.

В профиле переходная кривая в обычных условиях представляет собой наклонную линию с однообразным уклоном $i = h/l_{\text{пер}}$.

На дорогах Германии, Франции, Японии и других стран используется криволинейный отвод возвышения наружной нити, преимущество которого в наибольшей мере проявляется при высокоскоростном движении поездов.

Длины переходных кривых для подвижного состава с наклоном кузова частично регламентируются в [86]. При длине прямых вставок 25 м и менее, а также при их отсутствии:

- при наличии переходных кривых и прямой вставки (для обратных кривых и кривых одного направления): $[a_{\text{нп}}] = 0,7 \text{ м/с}^2$; $[\psi] = 0,3 \text{ м/с}^3$;
- при наличии переходных кривых и отсутствии прямой вставки:
 - для обратных кривых: $[a_{\text{нп}}] = 0,7 \text{ м/с}^2$; $[\psi] = 0,6 \text{ м/с}^3$;
 - для кривых одного направления: $[a_{\text{нп}}] = 0,7 \text{ м/с}^2$; $[\psi] = 0,3 \text{ м/с}^3$;
- при отсутствии переходных кривых и наличии или отсутствии прямой вставки: $[a_{\text{нп}}] = 0,4 \text{ м/с}^2$; $[\psi] = 0,3 \text{ м/с}^3$.

Приведенные нормативы $[a_{\text{нп}}]$ и $[\psi]$ относятся ко всем типам подвижного состава, включая скоростной и высокоскоростной подвижной состав, в том числе электропоезда «Talgo» и «Ласточка». При этом электропоезд «Talgo» должен эксплуатироваться по таким сопряжениям кривых в режиме без наклона кузова;

для скоростных электропоездов с наклоном кузова («Тальго») при длине прямых вставок более 25 м и в несопряженных кривых:

– при наличии переходных кривых и прямых вставок длиной 26-50 м:

$$[a_{\text{нп}}]=0,7 \text{ м/с}^2; [\psi]=0,6 \text{ м/с}^3;$$

в этом случае электропоезд «Talго» должен эксплуатироваться в режиме без наклона кузова;

– при наличии переходных кривых и прямых вставок длиной более 50 м:

$[a_{\text{нп}}]=1,5 \text{ м/с}^2; [\psi]=0,9 \text{ м/с}^3$; в этом случае электропоезд «Talго» может эксплуатироваться в режиме с наклоном кузова;

– при отсутствии переходных кривых независимо от длины прямой вставки:

$[a_{\text{нп}}]=0,4 \text{ м/с}^2; [\psi]=0,3 \text{ м/с}^3$; в этом случае электропоезд «Talго» должен эксплуатироваться в режиме без наклона кузова.

Длины переходных кривых принимаются исходя из условия:

1) обеспечение безопасности от схода колеса с рельсов при отводе возвышения;

2) отсутствия у пассажиров неприятных ощущений при входе и следовании по переходной кривой.

Предотвращение схода колес с рельсов внутренней нити при заклиненном вписывании экипажа и прямолинейном отводе возвышения гарантируется [113] соотношением

$$k_{\text{min}} > iL_{\text{max}},$$

где k_{min} – наименьший свес гребня колеса; L_{max} – наибольшая длина жесткой базы; i – уклон отвода возвышения.

При $k_{\text{min}} = 30$ мм и $L_{\text{max}} = 4,6$ м критический уклон равен 0,0065. Обычно принимается $i = i_1 \leq 1\text{‰}$. При заданном h_0 длина переходной кривой

$$l_{\text{пер}} = h_0/i_1.$$

По второму ограничению исследованиями установлены [113] следующие критерии выбора длины переходных кривых:

$$\max\left(\frac{dh}{dt}\right) \leq f \text{ и } \max\left(\frac{da_{\text{н}}}{dt}\right) \leq \Psi, \quad (2.16)$$

где a_n – горизонтальное непогашенное ускорение, м/с²; Ψ – допустимое значение приращения непогашенных горизонтальных ускорений; f – допустимое значение скорости подъема колеса по наружному рельсу.

Из условий (2.14) следует

$$l_{nep} \geq \frac{h_0 v_{max}}{f} \quad \text{и} \quad l_{nep} \geq \frac{a_n}{\Psi}. \quad (2.17)$$

Значения Ψ в зарубежной практике принимаются от 0,3 до 1,0 м/с³.

При изменении скорости от 100 до 250 км/ч f возрастает до 50 мм/сек. При $V_{max} = 200$ км/ч расчетное значение f принимается равным 42 мм/с.

Для вагонов с наклоном кузова длина переходных кривых, исходя из отсутствия у пассажиров неприятных ощущений при входе и следовании по переходной кривой (2.15), определяется с учетом дополнительного угла наклона:

$$l_{nep} \geq \frac{(h_0 + S \sin \alpha) v_{max}}{f} \quad \text{и} \quad l_{nep} \geq \frac{a_n}{\Psi}. \quad (2.18)$$

Если за возвышение принимать величину $h = 50, 100$ и 150 мм, при $f = 42$ мм/с, $S = 1600$ мм, $\alpha = 0^\circ \div 3,5^\circ$, то из формулы (2.16) можно определить максимальную длину переходной кривой с учетом использования подвижного состава с наклоном кузова (таблице 2.2). На рисунке 2.12 показан график зависимости длины переходной кривой от скорости при различном угле наклона подвижного состава.

Таблица 2.2 – Длина переходной кривой для вагонов с наклоном кузова, м

V, км/ч	h=50 мм		h=100 мм		h=150 мм	
	$\beta=0^\circ$	$\beta=3,5^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=3,5^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=3,5^\circ$
80	26	78	53	105	79	131
100	33	98	60	131	99	164
120	40	117	79	157	119	197
140	46	137	93	183	139	230
160	53	157	106	210	159	262
180	60	176	119	236	179	295
200	66	196	132	262	198	328

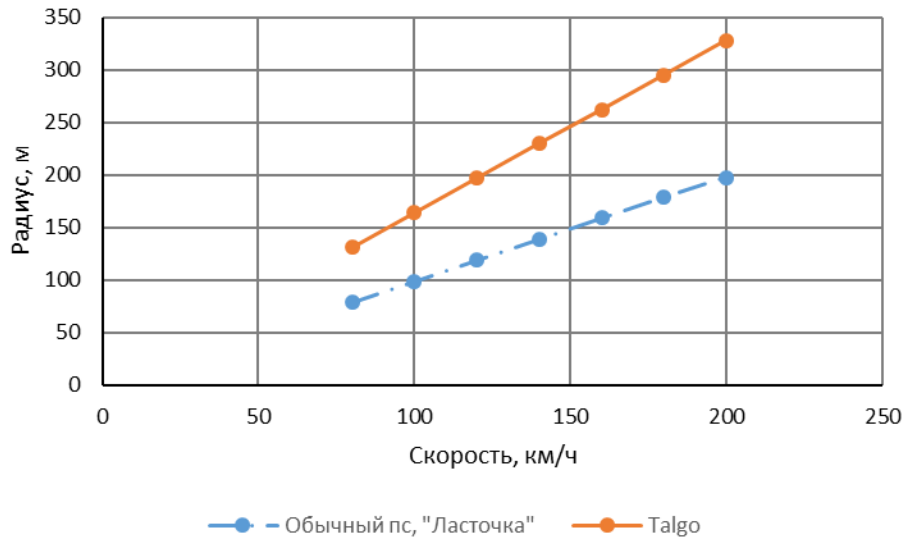


Рисунок 2.12 – Зависимость длины переходной кривой от скорости при различном угле наклона подвижного состава ($h = 150$ мм)

Рассмотрев результаты расчета длины переходной кривой при использовании обычного подвижного состава и подвижного состава с наклоном кузова приходим к выводу, что ее длину необходимо существенно увеличивать (в 2 – 3 раза) для сохранения уровня комфортабельности езды пассажиров при движении поезда в переходных кривых.

Прямые вставки проектируются как между кривыми, направленными в одну сторону, так и между кривыми, направленными в разные стороны [36]. Длины прямых вставок между смежными кривыми должны обеспечивать затухание колебаний экипажа, вызванное проследованием его по кривой. Полное затухание возможно при длине вставки

$$d_{\text{вст}} = \frac{vq}{3,6q_1}, \quad (2.19)$$

где v – скорость экипажа, м/с; q – частота затухания колебаний боковой качки, Гц; q_1 – собственная частота колебаний экипажа, Гц.

При подготовке существующих железных дорог для высоких скоростей движения и при сооружении новых линий стремятся иметь прямые вставки большей длины, чем полученной по формуле (2.19).

Длина прямой вставки регламентируется нормами [104]. На скоростных железных дорогах и на линиях I категории рекомендуется длину прямой вставки

независимо от направления сопрягаемых кривых принимать равной 150 м. В трудных условиях на дорогах 1 категории необходимо обеспечить длину прямой вставки не менее 50-75 м, на скоростных линиях – не менее 100 м.

В других странах: в Японии длина вставки для скоростных и высокоскоростных линий принимается 100 – 150 м; в Чехии и Дании $d_{\text{вст}} = 0,5V_{\text{max}}$; в Германии $d_{\text{вст}} = 0,2V_{\text{max}}$.

2.2 Габаритное уширение междупутья

Подвижной состав, сооружения и устройства на железных дорогах проектируются с учетом требований соответствующих габаритов. На прямых участках перегонов расстояние между осями первого и второго путей не менее 4,10 м. На кривых участках расстояние между осями увеличивают в зависимости от радиуса кривой в соответствии с инструкцией по применению габаритов приближения строений, приведенной в [16], т.е. устраивают габаритное уширение.

Расстояние в свету между поездами, идущими одновременно по соседним путям, не должно быть меньше аналогичного на прямой. В кривой это расстояние уменьшается, так как концы экипажей смещаются наружу, а середина – внутрь (рисунок 2.13). На кривых, в которых возвышение упорной нити наружного пути h_n больше возвышения упорной нити внутреннего пути $h_{\text{вн}}$ (т. е. $h_n > h_{\text{вн}}$), это невыгодное положение экипажей еще больше уменьшает расстояние в свету (рисунок 2.14).

Сближение экипажей происходит и в вертикальной плоскости (если возвышение наружного рельса внешней кривой больше, чем внутренней). В этой связи на кривых двухпутных участках междупутные расстояния увеличиваются на величину $\Delta_{\text{г}}$ (габаритное уширение) из условия прохода двухосного вагона (принятого за расчетный) длиной 24 м с направляющей базой 17 м с той же степенью безопасности движения, что и на прямых участках пути в соответствии с радиу-

сом кривой и возвышением наружного рельса. Такое увеличение междупутного расстояния преследует цель – обеспечение безопасности движения в момент одновременного прохода по кривой поездов разного направления.

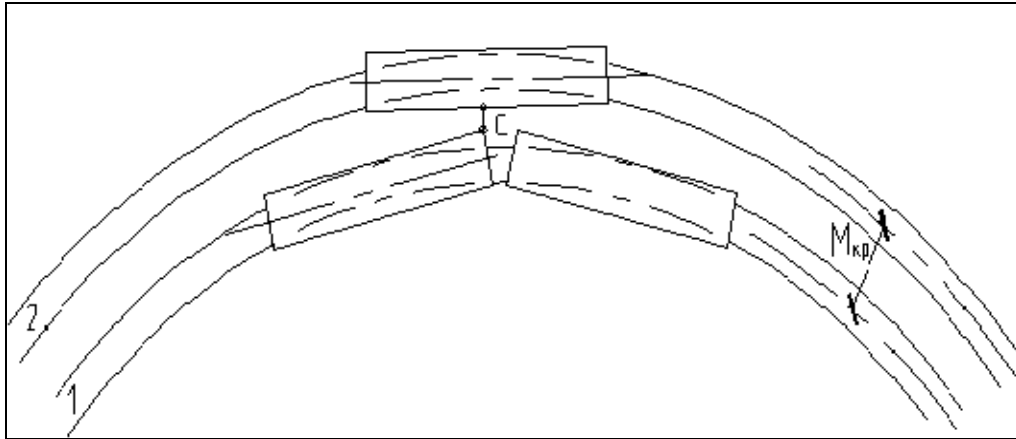
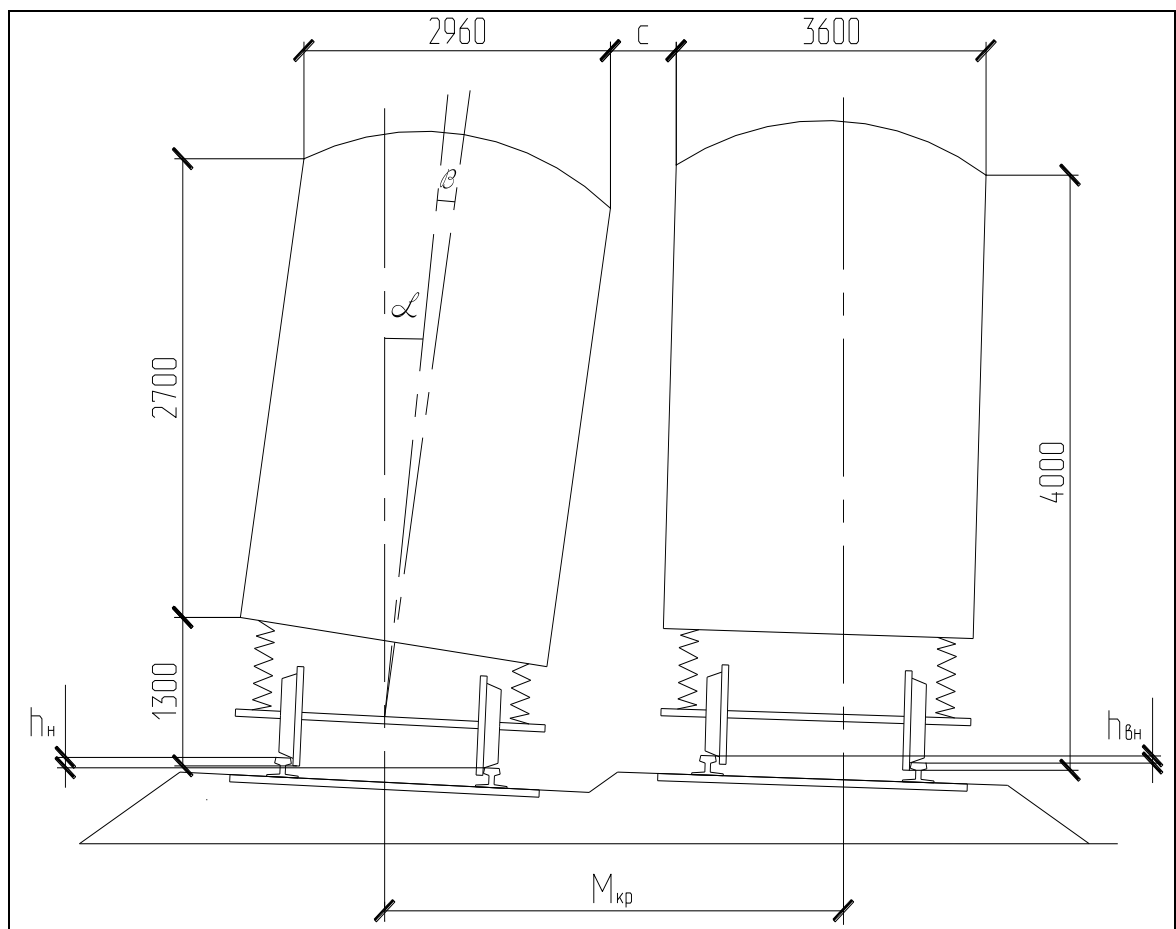


Рисунок 2.13 – Положение экипажей в двух соседних концентрических кривых



Вагон с наклоном кузова

Грузовой вагон

Рисунок 2.14 – Невыгодное положение подвижного состава в кривой на двухпутном участке

Междупутное расстояние – это расстояние между осями рядом расположенных путей. Размеры междупутных расстояний определены габаритом приближения строений (габаритом С, [16]).

Численное значение уширения междупутных расстояний в кривых зависит от длины экипажа, радиуса кривой и разницы возвышений ($h_n - h_{вн}$) упорных рельсовых нитей наружного и внутреннего путей.

Минимально необходимое расстояние между осями путей в кривых в эксплуатационных условиях определяются по формуле

$$M_{кр} = M_{пр} + d_m + \Delta d_m, \quad (2.20)$$

где $M_{пр}$ – установленное междупутье на прямом участке пути (на перегоне 4100 мм), мм; d_m – уширение междупутья, мм; Δd_m – дополнительное уширение междупутья, мм, для случая, когда $h_n > h_{вн}$.

Уширение междупутий d_m в кривых приведены в таблице 2.3 [44].

Дополнительное уширение междупутья $\Delta d_m = 0$, при $h_n \leq h_{вн}$; $\Delta d_m = 2,5 (h_n - h_{вн})$ при $h_n > h_{вн}$.

Таблица 2.3 – Величина габаритного уширения в кривых

Радиус кривой, м	При величине h_n , мм					
	100 и менее	110	120	130	140	150
4000	20	–	–	–	–	–
3000	25	–	–	–	–	–
2500	30	–	–	–	–	–
2000	35	–	–	–	–	–
1800	40	–	–	–	–	–
1700	45	45	–	–	–	–
1600	45	45	45	–	–	–
1500	50	50	50	50	50	–
1400	50	55	60	60	60	60
1300	55	60	70	80	80	80
1200	60	65	75	85	95	105
1100	65	70	80	90	100	110
1000	70	75	85	100	110	115
900	80	85	95	105	115	125
800	90	95	105	115	125	135
700	105	110	120	130	140	150
600	120	125	135	145	155	165
500	145	150	160	170	180	190
400	180	185	195	205	215	225
300	240	245	255	265	275	285

Внедрение технологии наклона кузовов вагонов оказывает влияние не только на конструкцию и технические характеристики подвижного состава, но и на всю железнодорожную инфраструктуру: путь, искусственные сооружения, габаритные уширения в кривых, системы сигнализации и управления движением поездов.

Особенно важны аспекты безопасности при вписывании подвижного состава с наклоном кузова в габаритные ограничения в пределах кривых. Вагоны при дополнительном наклоне кузова остаются в пределах габаритных ограничений при движении в любом направлении. Особенно невыгодным положением является, когда в кривой одновременно находятся вагон с наклоном кузова (на внешнем пути) и рядом проходящий грузовой вагон с габаритами погрузки второй степени, который пропускается по железной дороге на льготных условиях (на внутреннем пути) (см. рисунок 2.14).

В таких случаях производится увеличение междупутных расстояний не только на величину дополнительного уширения междупутья Δ_{cy} , но еще и на расстояние, получающееся при дополнительном наклоне кузова на n -ую величину градусов (для вагонов с наклоном кузова Talgo максимальный угол равен $3,5^\circ$). Таким образом, дополнительное уширение в кривых, связанное с наклоном кузова

$$\Delta_{cy \text{ доп}} = M_{кр} - [(Ш_{г} - \Delta h) + (0,5Ш_{в} + H)], \quad (2.21)$$

где $Ш_{г}$ – ширина габарита, мм;

Δh – величина отклонения вагона в кривой, мм;

$Ш_{в}$ – ширина вагона, мм;

H – величина суммарного отклонения тележки, связанного с возвышением наружного рельса в кривых и отклонения вагона из-за дополнительного наклона кузова, мм.

Так, например, при существующем радиусе $R_c = 1000$ м и возвышении наружного рельса $h = 100$ мм, в кривой необходимо уширение междупутья $\Delta_{cy} = 70$ мм.

При этом кривая, радиусом 1000 м может пропустить скорость 140 км/ч. Однако, поезд с дополнительным наклоном кузова в 3,5 град. может пройти ту же кривую со скоростью 165 км/ч. В данном случае увеличивается междупутье на величину $\Delta_{\text{гу доп}} = 70 + 380 = 450$ мм.

В таблице 2.4 приведены суммарная величина увеличения междупутных расстояний на величину дополнительного уширения междупутья $\Delta_{\text{гу}}$ в кривой и дополнительного габаритного уширения междупутных расстояний $\Delta_{\text{гу доп}}$ при дополнительном угле наклона подвижного состава ($3,5^\circ$) – $(\Delta_{\text{гу}} + \Delta_{\text{гу доп}})$.

Таким образом, введения подвижного состава с наклоном кузова на существующие железнодорожные линии приводит к необходимости увеличения междупутий на величину $\Delta_{\text{гу доп}}$, связанную с безопасностью вписывания в габариты при прохождении кривой двухпутного участка подвижных составов с наклоном кузова разного направления.

Таблица 2.4 – Величина дополнительного габаритного уширения в кривых для прохождения вагона с наклоном кузова

Радиус кривой, м	<i>h</i> , мм		
	100 и менее	120	150
4000	20+372	–	–
3000	25+372	–	–
2500	30+375	–	–
2000	35+368	–	–
1800	40+368	–	–
1700	45+369	–	–
1600	45+371	45+360	–
1500	50+373	50+363	–
1400	50+377	60+368	60+369
1300	55+367	70+374	80+377
1200	60+363	75+355	105+359
1100	65+370	80+364	110+371
1000	70+380	85+376	115+355
900	80+363	95+360	125+375
800	90+379	105+378	135+361
700	105+366	120+367	150+352
600	120+355	135+358	165+346
500	145+348	160+355	190+346
400	180+349	195+360	225+357
300	240+363	255+368	285+368

2.3 Технико-экономическое обоснование внедрения скоростного движения при различном типе подвижного состава

2.3.1 Общая и сравнительная эффективность проектных решений

Оценка эффективности инвестиционных решений помогает выбрать наиболее эффективный проект с минимумом рисков и потерь.

Методы оценки инвестиционных проектов не во всех случаях едины, так как различны масштабы затрат, сроки их полезного использования, а также полезность результатов.

В настоящее время существует две основные группы методов оценки эффективности инвестиционных проектов, не учитывающие дисконтирование (методы, основанные на расчете сроков окупаемости инвестиций; на определении нормы прибыли на капитал; на расчете разности между суммой доходов и инвестиционными издержками и т.д.) и включающие дисконтирование [78]. Методы, не учитывающие дисконтирование, относятся к статистическим методам оценки эффективности инвестиций. Они опираются на проектные, плановые и фактические данные о затратах и результатах, обусловленные реализацией инвестиционных проектов. При использовании этих методов в отдельных случаях прибегают к такому статистическому методу, как расчет среднегодовых данных о затратах и результатах (доходах) за весь срок использования инвестиционного проекта. Данный прием используется в тех ситуациях, когда затраты и результаты неравномерно распределяются по годам применения инвестиционного проекта.

В результате такого методического приема не в полной мере учитывается временной аспект стоимости денег, факторы, связанные с инфляцией и риском. Одновременно с этим усложняется процесс проведения сравнительного анализа проектных и фактических данных по годам использования инвестиционного про-

екта [78]. Поэтому статистические методы оценки, не учитывающие дисконтирование, наиболее рационально применять в тех случаях, когда затраты и результаты равномерно распределены по годам реализации инвестиционных проектов, а срок их окупаемости охватывает небольшой промежуток времени – до пяти лет.

Наиболее обобщенную оценку эффективности вложения средств в развитие дает экономическая эффективность, которая учитывает все стоимостные и технико-экономические факторы целесообразности капитальных вложений.

В качестве денежных критериев при выборе проектных решений в затратной его части используются: капитальные вложения K_t (инвестиционные затраты), эксплуатационные расходы C_t и другие, составляющие в совокупности затраты Z_t [36].

Капитальные вложения включают: стоимость реконструкции железной дороги, стоимость обновления подвижного состава, стоимость груза, находящегося в процессе перевозки.

В эксплуатационные расходы входят: расходы на заработную плату, на электрическую энергию и дизельное топливо, на ремонт технических устройств.

Затраты Z_t охватывают расходование всех денежных средств на реконструкцию железной дороги за некоторый период времени T . Функция затрат Z_t представляет собой распределение капитальных вложений и эксплуатационных расходов во времени.

Доходная часть R_t представляет собой выручку от основной деятельности, реализации материальных ценностей, внереализационных операций (арендная плата от сдачи имущества в аренду, долевое участие в совместном предприятии и т.д.) и операций, непосредственно не связанных с производством работ и оказания услуг.

К показателям общей экономической эффективности проектных решений относят: чистый дисконтированный доход, индекс доходности, внутреннюю норму доходности, срок окупаемости инвестиций.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) представляет собой суммы разностей эксплуатационного эффекта и инвестиционных вложений за расчетный период, приведенных к единому (обычно начальному) году

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_p} (R_t - Z_t) \eta_t, \quad (2.22)$$

где η_t – коэффициент дисконтирования;

T_p – расчетный период (горизонт расчета), год.

Коэффициент дисконтирования или коэффициент приведения разновременных стоимостных показателей при постоянной норме дисконта E равен

$$\eta_t = \frac{1}{(1 + E)^t}.$$

При установлении нормы дисконта E необходимо различать расчеты общественной и коммерческой эффективности инвестиций. Для расчета общественной эффективности используется социальная норма дисконта, устанавливаемая централизованно государственными органами; расчет коммерческой эффективности инвестиций осуществляется с использованием коммерческой нормы дисконта, равной приемлемой для инвесторов норме дохода на капитал.

Если $\text{ЧДД} > 0$, то инвестиционный проект признается экономически эффективным.

С использованием изложенных принципов определяется также индекс доходности и внутренняя норма доходности.

Срок окупаемости инвестиций (T_0) представляет собой временной период от начала реализации инвестиционного проекта до того момента, когда ЧДД становится и остается неотрицательным. Это соответствует равенству

$$\sum_{t=0}^{T_0} \mathcal{E}_t \cdot \eta_t = \sum_{t=0}^{T_0} K_t \cdot \eta_t. \quad (2.23)$$

Полученный T_0 сравнивают с приемлемым для инвестора сроком возврата вложений (T_n). Когда $T_0 \leq T_n$, инвестиционный проект признается экономически эффективным.

2.3.2 Экономическое обоснование увеличения непогашенного ускорения в кривых

В качестве одного из основных критериев определения скорости движения в кривых является непогашенное ускорение – $a_{нп}$, м/с^2 . Для пассажирских поездов $a_{нп}$ принято равным $0,7 \text{ м/с}^2$. Этот критерий является характеристикой плавности хода и условием комфортабельности езды. Поднять скорость в кривых можно следующими способами:

- увеличив возвышение наружного рельса;
- увеличив существующий радиус кривых;
- повысив норму непогашенного ускорения и т.д.

Первый и второй варианты требуют удлинения переходных кривых и переукладки пути, что дорого и не всегда возможно осуществить. В частности, это трудно сделать на линиях с интенсивными грузоперевозками [27].

Третий из предложенных вариантов решения проблемы может быть реализованным при использовании специального подвижного состава, у которого в допуске к эксплуатации будет иметь место разрешение эксплуатироваться с непогашенным ускорением большим, чем $0,7 \text{ м/с}^2$. На сегодняшний день таким разрешением обладает подвижной состав ЭС2Г «Ласточка» ($a_{нп} = 0,9 \text{ м/с}^2$) и ЭП20 «Talго» ($a_{нп} = 1,0 \text{ м/с}^2$), курсирующие на территории Российской Федерации.

Данный подвижной состав («Ласточка» или «Стриж (Talго)») за счет увеличения допускового непогашенного ускорения $0,9 \text{ м/с}^2$ и до $1,4 \text{ м/с}^2$ соответственно позволяют сократить время пассажиров в пути в среднем на 15-20%. При этом, как показали исследования АО ВНИИЖТ, длительное и повторное воздействие непогашенного центробежного ускорения величиной до $0,9 \text{ м/с}^2$ включительно

большинство людей переносит удовлетворительно. Непогашенное центробежное ускорение, равное 1 м/с^2 , переносится удовлетворительно при многократных и непродолжительных воздействиях.

В 2019 г. между Белорусской железной дорогой и компанией «Stadler», работающей на территории Республики Беларусь, подписан договор о производстве 10 подвижных составов ЭП^М «Stadler» с допускаемой величиной непогашенного ускорения $0,9 \text{ м/с}^2$. Такая конструкция вагона имеет свои динамические особенности, которые можно изучать согласно алгоритма, приведенного на рисунке 2.15.

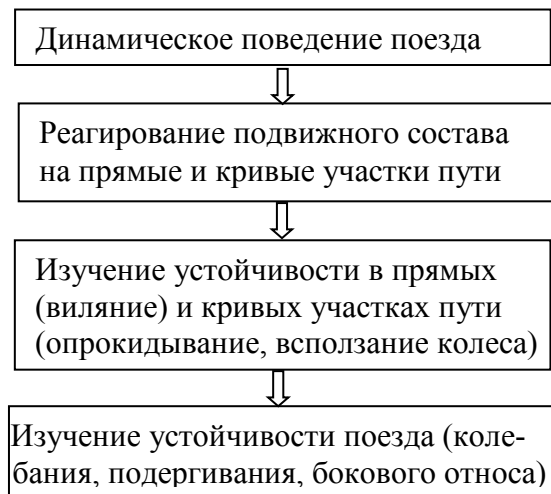


Рисунок 2.15 – Модель динамического поведения поезда

Для выбора наиболее целесообразного варианта увеличения скоростей на существующих линиях (реконструкция плана линии либо смена подвижного состава) произведены технико-экономические расчеты на участке Белорусской железной дороги, относящейся II Трансъевропейскому коридору (Красное–Минск–Брест) [107].

Расчет увеличения радиусов существующих кривых. В составе работ, необходимых для переустройства линии под скоростное движение, можно выделить реконструкцию устройств и сооружений, стоимость которой существенно влияет на общие затраты по внедрению скоростного движения. К ним можно отнести: реконструкцию земляного полотна, замену верхнего строения пути и другие виды работ.

Земляное полотно. Земляное полотно представляет собой комплекс грунтовых сооружений, получаемых в результате обработки земной поверхности и предназначенных для укладки верхнего строения пути, обеспечения устойчивости

пути и защиты его от воздействия атмосферных и грунтовых вод. Земляное полотно должно быть прочным, устойчивым и долговечным, требующим минимума расходов на его устройство, содержание и ремонт и обеспечивающим возможность широкой механизации работ. Выполнение указанных требований достигается правильным выбором грунтов для насыпей и их тщательным уплотнением при постройке и реконструкции, приданием земляному полотну очертаний, способствующих надежному отводу воды, укреплением откосов насыпей и выемок.

До введения скоростного движения устраняются все дефекты и деформации земляного полотна, проводится при необходимости его усиление или капитальный ремонт, включая обустройства. Все противодеформационные сооружения освидетельствуются, ремонтируются, восстанавливаются или заменяются в соответствии с проектом. При переустройстве круговых кривых под скоростное движение существующие радиусы R_c уплачиваются со смещением внутрь кривой, т.е. увеличиваются до проектного значения $R_{пр}$. В результате изменяется длина существующей кривой K_c (рисунок 2.16). Произвести эти действия не всегда возможно, так как железнодорожная линия уже существует, и реконструкция выполняется в стесненных условиях. Следовательно, любая отсыпка нового земляного полотна в кривой автоматически вызывает передвижение опор контактной сети, что является дорогостоящим мероприятием, особенно на станциях или разъездах. В пределах городской застройки изменение плана линии повлечет за собой снос каких-то строений, частичное или полное изменение инфраструктуры, что может вызывать недовольство населения, а также требует больших финансовых вложений.

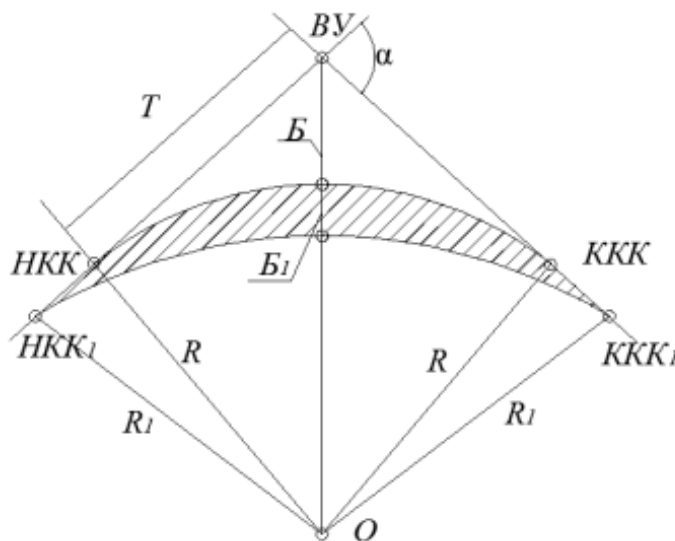


Рисунок 2.16 – Смещение оси пути при увеличении радиуса кривой

В связи с увеличением радиусов на некоторых кривых (при сдвиге до 2 м) производится досыпка земляного полотна, при больших сдвигках – производится отсыпка новой насыпи полностью или частично (рисунок 2.17).

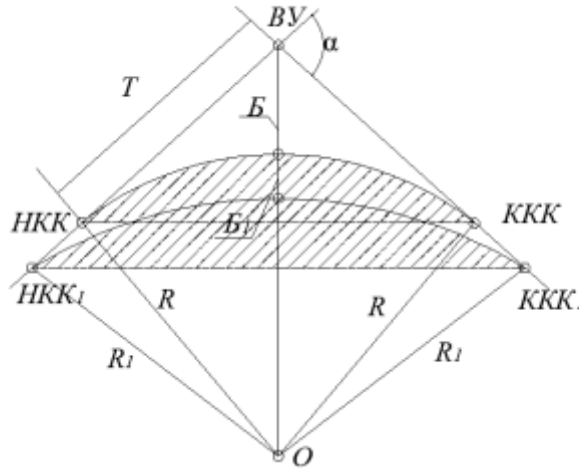


Рисунок 2.17 – Смещение оси пути при увеличении радиуса кривой с выносом на новый путь

Верхнее строение пути. При переустройстве плана линии вслед за изменением земляного полотна производится переукладка верхнего строения пути. При этом используются как старогондние, так и новые материалы. Стоимость переустройства верхнего строения пути напрямую зависит от изменения длины криволинейного участка пути $\Delta K = K_{\text{пр}} - K_{\text{с}}$.

Повышения скоростей движения при применении специального подвижного состава. Как отмечалось в п. 1.3, повысить скорости движения можно за счет применения специального подвижного состава, который может с безусловным соблюдением плавности, безопасности и комфортабельности езды пассажиров обеспечить более высокие скорости на существующих радиусах только за счет увеличения допускаемого непогашенного ускорения в кривых до $0,9 \text{ м/с}^2$.

За счет повышения непогашенного ускорения сокращается время хода, что, в свою очередь, позволяет сократить количество составов в обороте. При этом также отсутствуют затраты на уположение кривых. К расходам в данном случае можно отнести только затраты на приобретение нового подвижного состава.

Таблица 2.6 – Характеристика плана линии Красное – Минск –Брест

Наименование участка	Длина участка, км	Протяженность кривых радиусами, км							
		общая	>1900	1899-1600	1599-1200	1199-900	899-680	679-500	150
Красное – Орша	48,8	10,8	6,5	0,8	0,8	1,6	0,6	0,5	-
		22,1	13,3	1,6	1,6	3,3	1,2	1,1	-
Орша – Борисов	132,5	41,0	17,6	0,9	3,1	7,3	5,6	6,5	-
		30,9	13,3	0,7	2,3	5,5	4,2	4,9	-
Борисов – Минск	78,7	26,7	5,3	0,9	1,9	7,3	2,3	8,4	0,6
		33,9	6,7	1,1	2,4	9,3	2,9	10,7	0,8
Минск – Барановичи	141,4	40,1	4,9	2,0	1,6	9,9	5,0	16,5	0,2
		28,4	3,5	1,4	1,1	7,0	3,5	11,7	0,2
Барановичи-Бережа-Каргузская	103,1	14,2	4,4	1,0	2,6	4,4	0,8	1,0	-
		13,8	4,3	1,0	2,5	4,3	0,8	1,0	-
Бережа-Каргузская - Брест	98,6	4,3	3,8	-	0,3	-	-	0,2	-
		4,4	3,9	-	0,3	-	-	0,2	-
Красное – Брест	603,1	137,1	42,5	5,6	10,3	30,5	14,3	33,1	0,8
		22,7	7,0	0,9	1,7	5,1	2,4	5,5	0,1

Для сравнения двух вариантов (закупка нового подвижного состава или реконструкция существующего пути) и выбора наиболее экономически рационального из них можно использовать сравнительную эффективность. Для этого приводится расчет стоимости переустройства участка II транспортного коридора (ст. Красное – ст. Брест), который имеет самый большой процент кривых малых радиусов на участке.

Варианты:

- 1) Расчет стоимости переустройства существующих радиусов кривых для пропуска поездов с более высокими скоростями;
- 2) Стоимость закупки нового подвижного состава с допускаемой величиной непогашенного ускорения $0,9 \text{ м/с}^2$.

Для расчета стоимости переустройства производится анализ всех криволинейных участков пути, из которых выбираются кривые, радиусом до 2000 м, так как радиусы свыше 2000 м могут пропустить скорости больше 200 км/ч. Для них производится расчет стоимости переустройства каждой в отдельности и определяется необходимость выноса трассы на новый путь (приложение А).

На определение объемов работ и строительную стоимость реконструкции оказывают влияние инженерно-геологические условия полосы отвода. Реконструируемый участок находится на территории г. Минска, Минской и Могилевской областей. Климат умеренно континентальный, в геологическом строении полого-наклонная, категория по рельефу местности I [109]. В зоне реконструкции практически все земли освоены человеком и существующей полосы отвода недостаточно для размещения криволинейных участков большего радиуса. К тому же, практически весь грунт, необходимый для отсыпки нового земляного полотна в полосе отвода будет привозной. Кроме того, развитая существующая инфраструктура (опоры контактной сети и сама контактная сеть, здания и сооружения и так далее) не всегда позволяет произвести увеличение радиусов. Анализ линии приводит к тому, что около 35 % кривых переустраивать невозможно. Если увеличивать зону полосы отвода, переносить существующие строения, то это, в свою очередь, приведет к еще большему увеличению строительной стоимости реконструкции.

С учетом расчетов, приведенных в приложении А, стоимость реконструкции криволинейных участков существующей железнодорожной линии Минск – Брест примерно равен 42 миллиона белорусских рублей (около 1,4 миллиарда российских рублей).

Рассмотрен альтернативный вариант повышения скоростей на существующих линиях - выбор нового подвижного состава с увеличенным допуском норматива непогашенного ускорения (новые модели «Stadler», ЭС2Г «Ласточка», ЭП20 «Стриж» (Talgo)). В связи с производством подвижного состава компании «Stadler» на территории Республики Беларусь, его стоимость составляет порядка 20 миллионов белорусских рублей (около 625 миллионов российских рублей) и

это самый выгодный вариант выбора подвижного состава с увеличенным непогашенным ускорением $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$.

Кроме того, тяговые расчеты (таблица 2.7) показали, что время нахождения в пути подвижного состава с допуском непогашенным ускорением $0,9 \text{ м/с}^2$ сокращается по сравнению с обычным подвижным составом практически на 13%.

Таблица 2.7 – Время прохождения криволинейных участков пути при применении различного подвижного состава (участок ст. Красное– Минск–Брест Бел.ж.д. 603,1 км)

Наименование участка	План линии		Тип подвижного состава		
	Прямые, км	Кривые, км	ЭП ^М «Stadler» ($a_{\text{нп}}=0,7 \text{ м/с}^2$)	ЭП20 «Talgo» ($a_{\text{нп}}=0,9 \text{ м/с}^2$)	ЭС2Г «Ласточка», («Stadler») ($a_{\text{нп}}=0,9 \text{ м/с}^2$)
Красное – Минск	181,50	78,50	88 мин	80 мин	81 мин
Минск – Брест	286,40	58,60	40 мин	38 мин	36 мин
			127 мин	118 мин	117 мин

В 2019 году на базе данных исследований, а также собственных разработок, Белорусская железная дорога поставила задачу перед компанией «Stadler» на разработку новой модели подвижного состава с усиленными динамическими свойствами для дальнейшей экспериментальной проверки и возможности эксплуатации подвижного состава ЭП^М «Stadler» с $a_{\text{нп}}=0,9 \text{ м/с}^2$.

Так как новый вид подвижного состава «Stadler» с допуском непогашенным ускорением $0,9 \text{ м/с}^2$ будет выпущен только после 2021 г., дальнейшее рассмотрение проводится на примере ЭС2Г «Ласточка», т.к. механизм работы улучшенного состава «Stadler» и ЭС2Г «Ласточка» планируется аналогичным.

Структура показателя критерия эффективности реконструкции линии для скоростного движения пассажирских поездов.

Технико-экономическое обоснование целесообразности технического совершенствования отраслевого развития, требующего инвестиционных вложений, основывается на системе показателей, которые можно объединить в две группы: натуральные и стоимостные показатели.

Натуральные показатели характеризуют технические или технологические достоинства и преимущества проектного решения. Это могут быть технические параметры проекта: руководящий уклон, длина приемо-отправочных путей, весо-

вая норма, мощность железной дороги и т.д., или параметры, имеющие важное эксплуатационное значение: скорость, расход электроэнергии, расходы по содержанию постоянных устройств и другое. Определяющее значение для выбора проекта, в который будут вкладываться инвестиции, имеют стоимостные показатели.

К стоимостным показателям, обычно рассматриваемым при экономическом обосновании капитальных вложений относятся: суммы инвестиций или капитальных вложений, требуемых для реализации проектного решения; годовые текущие издержки, возникающие в процессе внедрения проекта и затем его реализации; приведенные строительно-эксплуатационные расходы; доходы или прибыль, получаемые от внедрения проекта.

В состав суммы капитальных вложений или единовременных затрат входят инвестиции в их денежном эквиваленте. Текущие издержки или эксплуатационные расходы включают все виды затрат, связанных с эксплуатацией вновь вводимых или реконструируемых инвестиционных объектов. В отличие от капитальных вложений, текущие затраты рассчитываются обычно за годовой период эксплуатации.

Рассматриваемая задача – внедрение скоростного движения – относится к государственному уровню и устанавливается общественная эффективность инвестиций. Поэтому в качестве основной части *результата* от увеличения скоростей движения пассажирских поездов будет дополнительная плата пассажиров за сокращение времени поездки

$$C_{\text{пас-ч}} = 365n_{\text{пас}} \cdot m \cdot \alpha_{\text{зап}} \cdot \Delta T \cdot e_{\text{пас-ч}} \cdot 10^{-6}, \text{ млн. руб./год}, \quad (2.24)$$

где $n_{\text{пас}}$ – количество скоростных пассажирских поездов в сутки;

m – вместимость поезда, чел.;

$\alpha_{\text{зап}}$ – коэффициент использования вместимости поезда в долях единицы;

$e_{\text{пас-ч}}$ – стоимость пассажиро-часа в руб.;

ΔT – сокращение времени нахождения пассажиров в пути (в оба направления), час.

При сравнении вариантов проектных решений, например, по выбору вида подвижного состава для скоростных поездов можно использовать стоимость времени нахождения пассажиров в пути – как затратную часть критерия

$$C'_{\text{пас-ч}} = 365 \cdot n_{\text{пас}} \cdot m \cdot \alpha_{\text{зап}} \cdot (T' + T'') \cdot e_{\text{пас-ч}} \cdot 10^{-6}, \text{ млн. руб./год}, \quad (2.25)$$

где $T' + T''$ - время нахождения пассажиров в пути в направлении «туда» и «обратно» в час.

В состав затрат входят капиталовложения в реконструкцию дороги ($K_{\text{рек}}$) и на приобретение подвижного состава ($K_{\text{пс}}$)

$$Z_t = K_{\text{рек}} + K_{\text{пс}}. \quad (2.26)$$

Кроме того, в связи с использованием нового подвижного состава в пассажирском движении и модернизацией технического состояния дороги, после реконструкции изменятся эксплуатационные расходы как в пассажирском, так и грузовом движении. В частности, реализация более высоких скоростей требует больших затрат энергоресурсов, а улучшение плана трассы позволит уменьшить расходы на содержание пути в кривых. Уменьшение времени оборота подвижного состава влияет на потребность в локомотивных бригадах. Также следует учитывать дополнительные эксплуатационные издержки, связанные с дополнительным простоем поездов из-за увеличения съема грузовых поездов скоростными пассажирскими. Поэтому в состав показателя критерия эффективности внедрения скоростного движения необходимо включить разность эксплуатационных расходов, вызванную переустройством и заменой подвижного состава ($\pm \Delta C_t$).

Замена подвижного состава предопределяет высвобождение используемых пассажирских вагонов и локомотивов. Поэтому необходимо учитывать его возвратную стоимость ($K_{\text{пс(возв.)}}$).

Так как проект социальный и имеет большое значение для народного хозяйства, то могут иметь место единовременные дотации государства (D).

Таким образом, с учетом изложенного, составляющие результата, полученного за счет эксплуатации объекта, определяются по формулам

$$R_t = C_{\text{пас-ч}} + D + K_{\text{пс(возв.)}} \pm \Delta C_t. \quad (2.27)$$

Общая экономическая эффективность использования подвижного состава ЭС2Г «Ласточка» (ЭПМ «Stadler» с допускаемым непогашенным ускорением $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$).

Применительно к реконструкции железной дороги с целью внедрения скоростного движения пассажирских поездов чистый дисконтированный доход (ЧДД) определяется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (C_{\text{п-ч}} + Д + K_{\text{пс(возв.)}} \pm \Delta C_t - K_{\text{рек}} - K_{\text{пс}}) \frac{1}{(1+E)^t}. \quad (2.28)$$

В формуле (2.28) $C_{\text{п-ч}}$, $Д$ и $K_{\text{пс(возв.)}}$ соответственно стоимость нахождения пассажира в пути, дотации государства (т.к. проект социальный) и возврат денежных средств от продажи существующего подвижного состава при замене на новый улучшенный. Сумма этих трех составляющих и будет являться доходной частью ЧДД. Стоимость нахождения пассажира в пути определяется по формуле (2.26). Расчет стоимости времени нахождения пассажиров в пути с учетом использования подвижного состава «Ласточка» на участке Красное – Минск – Брест (603, 1 км) согласно тяговых расчетов составляет $T' = 370,24$ мин (направление «туда») и в обратном направлении $T'' = 381,03$ мин.

При этом, уменьшая время нахождения в пути за счет увеличения скорости можно взимать дополнительную плату за сокращение времени поездки увеличив стоимость пассажиро-часа $e_{\text{п-ч}}$. Существующую стоимость пассажиро-часа будем увеличивать соответственно в 1,5 и 2 раза ($e_{\text{п-ч суц}} = 6,6$ бел.руб.).

Стоимость от продажи существующего подвижного состава, который применяется на участке составит примерно 40 миллионов белорусских рублей (согласно данным компании «Stadler», выпускающей свои подвижные составы на территории Беларуси).

Дотации государства в данном случае будут незначительные около 2 миллионов белорусских рублей.

Эксплуатационные расходы являются затратной частью ЧДД. К ним относятся расходы, зависящие от работы подвижного состава, расходы, не зависящие от работы подвижного состава, а также расходы на содержание постоянных устройств. С учетом единичных ставок и норм Республики Беларусь для участка Красное – Минск – Брест эксплуатационные расходы ΔC_t 62,25 миллиона белорусских рублей на 1 поезд в сутки.

Затраты на реконструкцию практически отсутствуют, так как закупается новый улучшенный подвижной состав с увеличенной скоростью прохождения кривых.

Стоимость закупки подвижного состава может быть различной. Применительно к «Ласточке» стоимость закупки 10 единиц составляет примерно 200 миллионов белорусских рублей.

Согласно приведенных выше расценок расчет ЧДД приводится в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Расчет ЧДД при использовании подвижного состава «Ласточка»

Годы	Затратная часть, Z_t , млн. бел. руб.			Доходная часть, R_t , млн. бел. руб.			Коэффициент приведения во времени	ЧДД, млн. бел. руб.
	ΔC_t	$K_{рек}$	$K_{пс}$	$C_{п-ч}$	D	$K_{пс(возв.)}$		
$e_{п-ч(сущ)} = 6,6$ бел.руб.								
1	62,25	2	200	166,99	1	40	0,50	-47,63
2	68,48	-	0		-	-	0,25	50,88
3	75,32	-	0		-	-	0,13	142,54
$e_{п-ч} = 9,9$ бел.руб.								
1	62,25	2	200	235,30	1	40	0,50	-13,48
2	68,48	-	0		-	-	0,25	153,35
3	75,32	-	0		-	-	0,13	313,32
$e_{п-ч} = 13,2$ бел.руб.								
1	62,25	2	200	333,97	1	40	0,50	35,86
2	68,48	-	0		-	-	0,25	301,36
3	75,32	-	0		-	-	0,13	560,00

Общий показатель ЧДД при различных стоимостях пассажиро-часа приводятся на рисунке 2.18.

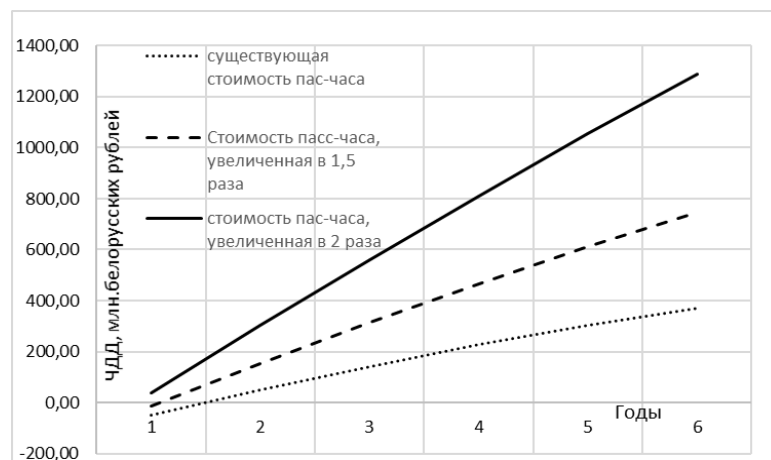


Рисунок 2.18 – Общий показатель ЧДД при различной стоимости пассажиро-часа:

1 – при стоимости пас-часа, увеличенной в 2 раза; 2 – при стоимости пас-часа, увеличенной в 1,5 раза; 3 – при существующей стоимости пас-часа (6,6 бел.руб.)

Сроки окупаемости при различной стоимости пассажиро-часа в зависимости от размера движения представлены в таблице 2.9 и на рисунке 2.19.

Таблица 2.9 – Сроки окупаемости при различной стоимости пассажиро-часа

Срок окупаемости ($T_{ок}$), годы	Стоимость пассажиро-часа, бел.руб.
1,5	6,6
1	9,9
0,5	13,2

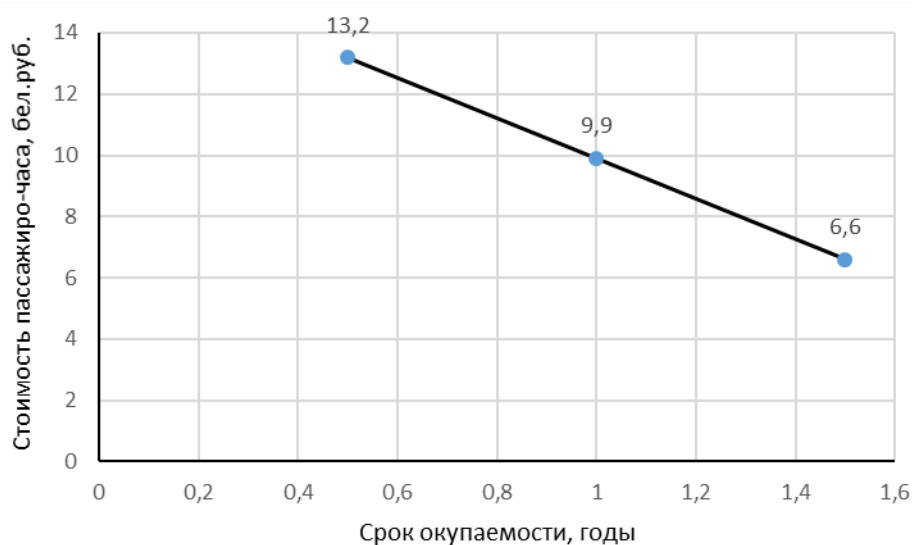


Рисунок 2.19 – Срок окупаемости введения скоростного движения при различной стоимости пас-ч

Из рисунков видно, что при существующей стоимости пассажиро-часа ЧДД станет положительным через 1,5 года и проект будет считаться выгодным. При увеличении стоимости пассажиро-часа в 1,5раза проект окупиться через полгода. При увеличении стоимости в 2 раза, проект начнет окупаться практически сразу. Так как проект социальный, сокращение времени хода на 10 минут на участке в 603,1 км при существующей стоимости пассажиро-часа, а следовательно, и при существующей стоимости билетов будет самым оптимальным вариантом. При этом срок окупаемости 1,5 года является меньше нормативного.

Объемы переустройства трассы при использовании различного подвижного состава пассажирских поездов

Для определения изменений капиталовложений при использовании подвижного состава с наклоном кузова рассмотрены участки разной сложности плана, характеризуемые величиной среднего радиуса кривых

$$R_{\text{cp}} = 180 \frac{\sum_1^n K_i}{\pi \cdot \sum_1^n \alpha_i^{\circ}}, \quad (2.29)$$

где K_i , α_i° – длина и угол поворота i -той кривой,
 n – число кривых.

Определение необходимой длины переустройства сделано для 2-х вариантов: при использовании обычного пассажирского состава и при применении вагонов с наклоном кузова.

Выполнен приближенный расчет длины переустройства в км (L_1 и L_2) и в процентах от общей протяженности трассы (Δ_1 и Δ_2). Результаты расчетов приведены в таблице 2.10 и на рисунках 2.20 и 2.21.

Таблица 2.10 – Приближенная стоимость переустройства трассы существующей линии при введении скоростного движения пассажирских поездов из обычных вагонов и вагонов с наклоном кузова

№ участка	Длина, км	Длина кривых на участке		Сумма углов поворота (град/град/км)		Средний радиус, м	Длина переустраиваемого участка			
		км	%	Всего, град.	В среднем на 1 км(град/км)		для обычного состава		для вагонов с наклоном кузова	
							L_1 , км	Δ_1 , %	L_2 , км	Δ_2 , %
1	100	41,015	41	2360,13	23,60	996	47,313	47	36,404	36
2	100	35,700	36	2015,38	20,15	1015	33,768	33	16,787	17
3	100	26,078	26	1146,85	11,47	1303	30,699	31	15,369	15
4	100	17,964	18	762,88	7,63	1329	24,345	24	12,35	12

Примечание: участки взяты на направлении Красное – Минск – Брест Бел жел. Дор.

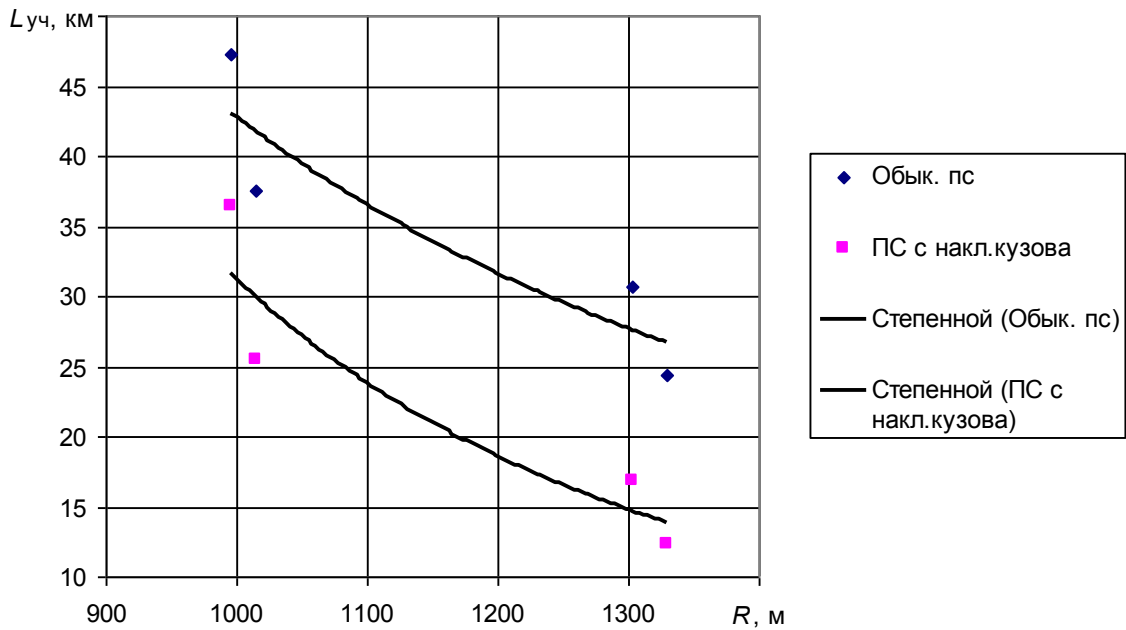


Рисунок 2.20 – Зависимость длины переустраиваемого участка от среднего радиуса на участке

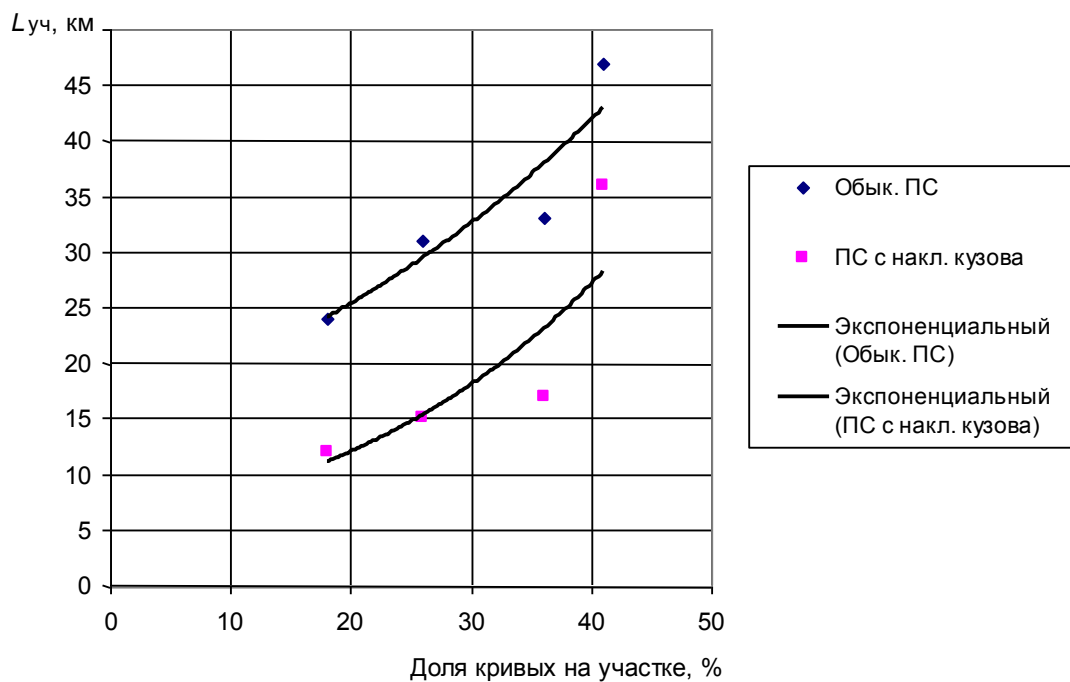


Рисунок 2.21 – Зависимость длины переустраиваемого участка от доли кривых на участке

2.4 Стоимость пассажиро-часа

Эффект увеличения скорости движения выражается количеством сэкономленного времени пассажиров в пути (пассажиро-часами), а в денежном выражении – стоимостью сэкономленных пассажиро-часов.

В связи с этим необходима методика определения стоимости пассажиро-часа. Сложность определения этой стоимости связана с тем, что учету подлежит разнородный по социальному составу и целям поездки пассажиропоток. Существует несколько методов оценки пассажиро-часа, базирующихся на разных исходных предпосылках.

В условиях плановой экономики в СССР для расчета стоимости пассажиро-часа, $e_{п-ч}$, использовалась формула [59]

$$e_{п-ч} = \frac{\alpha}{720} / (\varphi \cdot C_{нд} + \varepsilon \cdot C_{зп}) + 30C_c,$$

где $C_{нд}$ – месячная доля абсолютного размера национального дохода, приходящегося на 1 работника производительной сферы;

$C_{зп}$ – средняя месячная зарплата работников непроизводительной сферы;

C_c – средняя величина суточных, выплачиваемых пассажирам, совершающим деловые поездки;

α , φ , ε – коэффициенты, учитывающие структуру пассажиропотока.

Стоимость одного пассажиро-часа для Республики Беларусь по приведенной методике находится в пределах 6,6 белорусских рублей. Расчёты сделаны из предположения обращения на линии «дневных» поездов (вагоны оборудованы местами для сидения) и, в другом варианте поездов, сформированных из плацкартных и спальных вагонов дальнего следования («ночные» поезда).

Другим вариантом методики предлагается принимать за стоимость пассажиро-часа оценку 1 человеко-часа занятого населения.

На железнодорожном транспорте используется тарифная стоимость перевозки пассажиров во всех видах сообщения (городские, пригородные, международные). Регулируемые тарифы по своему уровню очень часто ниже себестоимости перевозок (убыточность пассажирских перевозок), поэтому недостающие доходы компенсируют органы государственной власти.

Тариф на проезд в поездах устанавливается на 1-го пассажира. При этом тарифы являются едиными на всей территории города или целого региона. Пересмотр тарифов проводится эпизодически в увязке с инфляцией в стране.

Как отмечалось выше, особенностью тарифов на проезд в поездах городского, пригородного и междугородного сообщения является то, что они практически во всех регионах России не покрывают текущих затрат, которые несут пассажирские перевозки. Более того, при их установлении не закладываются средства на социальное и производственное развитие. При их утверждении органы государственного управления руководствуются главным образом социальными интересами большей части населения.

Тарифы на перевозку пассажиров во всех видах сообщений в разных регионах страны отличаются друг от друга. Это объясняется не только тем, что текущие затраты на проезд в разных регионах неодинаковы, но и социальной политикой, которой придерживаются органы власти в регионах.

В качестве исходной базы для установления тарифов на перевозку пассажиров принимают нормативную себестоимость по видам перевозок (городские, пригородные), объём дохода на покрытие затрат с учётом выделенных из бюджета дотаций, размеры перевозок пассажиров и пассажирооборот.

Полная стоимость железнодорожного билета – величина многосоставная, включающая несколько подструктур. Постоянно изменяются составные величины, из которых складываются железнодорожные билеты. Сейчас в полную стоимость билетов на поезда дальнего следования входят: непосредственно цена билета на поезд (плата за использование инфраструктуры самой железной дороги); стоимость плацкарты (плата за «бронирование» места в нужном поезде); комиссионный сбор (при покупке проездного документа раньше, чем за 9 суток до

предполагаемой поездки. Различны также стоимости билетов при оформлении на станции формирования и промежуточных станциях. Имеют место еще ряд условий, определяющих плату за проезд.

Цена билетов на поезд зависит также и от сезона. В летний период цены существенно выше, чем осенью или зимой.

В исследовании рассмотрена методика расчета базовой стоимости железнодорожного билета на любой поезд формирования РЖД как по внутрироссийским маршрутам, так и на поезда, следующие в Беларусь. Вычисляемая базовая стоимость не учитывает дополнительные услуги фирменных поездов (питание и прочее), сервисные сборы и VIP классы.

Принцип формирования базовой (тарифной) стоимости билета – зонный, длина одной зоны увеличивается в зависимости от общего расстояния.

Каждая зона имеет длину и границы. Также для расчета используются следующие данные: расстояние, дата поездки (для определения сезонного коэффициента); род вагона и категория. В результате расчетов получается базовая стоимость билета (без услуг и сервисных сборов)

$$P = (L_a + L_{\pi})P_{1\text{км}} \cdot M \cdot K_s,$$

где L_{π} – расчетное расстояние, км;

L_a – добавочное расстояние, зависящее от категории вагона, км;

$P_{1\text{км}}$ – стоимость одного километра, исходя из типа, категории поезда и вагона;

M – межгосударственный коэффициент;

K_s – сезонный коэффициент, определяемый исходя из даты поездки.

Также можно предположить использование при определении стоимости пассажиро-часа разницы в тарифной стоимости времени проезда по параллельным маршрутам с учетом распределения пассажиров между этими маршрутами. Исследования железнодорожных и авиационных маршрутов позволяют выявить зависимость стоимости пассажиро-часа от дальности маршрута и количества сэкономленного времени. Так, если рассмотреть стоимость билета пассажирского

и скорого поездов, то заметна существенная разница, так же как и заметна разница во времени нахождения в пути.

Рассмотрев некоторые направления железнодорожных линий, можно получить среднюю оценку времени пассажиров. По данным расчетов на некоторых направлениях (таблице 2.11) она составила около 6,6 бел. руб.

Таблица 2.11 – Определение средней стоимости времени пассажиров в пути

Направление	Стоимость проезда в пассажирском поезде, бел. руб.		Время в пути, час	Стоимость проезда в скором (скоростном) поезде, бел. руб.		Время в пути, час
	купе	плацкарт		купе	плацкарт	
Москва-С.Петербург	188,60	101,74	8,39	«Сапсан»		3,33
				240,66	119,10	
Минск-Киев	122,68	68,38	11,41	107,14	75,62	10,39
Москва-Минск	141,60	70,56	9,58	«Talgo»		8,48
				156,04	84,16	
Москва-Брест	159,06	84,68	14,41	«Talgo»		91,04
				179,96	102,40	
Гомель-Минск	16,58	12,54	7,30	«Stadler»		2,54
				20,0		
Средняя стоимость пассажира-часа				6,6 бел.руб.		

В Республике Беларусь стоимость проезда в пассажирском либо в скором пассажирском поезде определяется исходя из тарифного пояса, расстояния, типа вагона по специальным таблицам, в которых приводится стоимость в швейцарских франках на 1 километр пути (таблице 2.12). Путем умножения тарифа на длину участка следования получают базовую стоимость билета.

Таблица 2.12 – Стоимость билета в пассажирском и скором поезде (в швейцарских франках)

Номер тарифного пояса	Расстояние в км от – до	Пассажирский поезд			
		жесткий вагон, места для сидения	жесткий вагон, спальные места	жесткий вагон, 4-х местные купе, спальные места	мягкий вагон, 2-х местные купе (СВ)
01	1 – 10	1,10	1,20	1,80	3,63
02	11 – 20	1,18	1,30	1,95	3,88
03	21 – 30	1,25	1,38	2,08	4,15
...
37	1301 – 1400	10,28	12,88	19,38	38,83

В формировании стоимости пассажира-часа, а, следовательно, и стоимости билета совсем недавно стал использоваться принцип «динамического ценообразования». Суть его в том, что отбирается перечень направлений проведением маркетинговых опросов и согласования с государственными регулирующими органами. На каждом направлении действуют тарифные планы, сформированные для сезона, дня недели и объемов перевозок. При этом в некоторых случаях, минимальный тариф в вагонах купе будет лишь незначительно превышать тарифы, действующие в плацкартных вагонах. В первый день продаж (за 45 дней до отправления поезда) пассажиру гарантированно доступен минимально возможный тариф для данного поезда.

Далее, по мере заполнения мест в вагонах поезда и в случае высокого спроса на конкретную дату, тариф увеличивается.

В этом и заключается принцип «динамического ценообразования». Чем выше спрос и меньше мест, тем выше цена на билеты. Однако, в случае низкого спроса, а также при наличии в свободной продаже на рынке более низких тарифов конкурентов, продажа по низким тарифам может продолжаться вплоть до даты отправления.

Анализируя результаты расчетов по различным методикам, можно отметить, что стоимость пассажира-часов, а также стоимость билета получаются приблизительно одинаковыми. Разница колеблется в пределах $\pm 5-10\%$.

Оценка стоимости пассажира-часа по затратам на увеличение скоростей движения пассажирских поездов.

Для целей сравнения вариантов и принятия проектных решений в проектах строительства и реконструкции железных дорог в данном исследовании предлагается использовать при определении стоимости пассажира-часа строительные и эксплуатационные затраты, необходимые для реализации скоростного движения пассажирских поездов.

Предположим, что на реконструкцию линии для увеличения скоростей движения затрачено $K_{рек.}$, на приобретение подвижного состава с учетом возврата от продажи существовавшего подвижного состава – $(K_{пс.} - K_{пс(воз.)})$.

При этом общие эксплуатационные затраты изменились на $\pm \Delta C$.

Пусть пассажиры, сэконобившие в пути за счет внедрения скоростного движения ΔT часов, платят за это в период нормативного срока окупаемости T_H .

Тогда

$$[K_{\text{рек}} + (K_{\text{пс}} - K_{\text{пс(воз.)}})]/T_H + \Delta C(1 + P_{\text{ср.}}) = 730n_{\text{пас}} \cdot m \cdot \alpha_{\text{зап}} \cdot \Delta T \cdot e_{\text{пас-ч}}. \quad (2.30)$$

Из этого выражения, с учетом средней прибыли $P_{\text{ср.}}$, можно определить фактическую стоимость пассажиро-часа сэкономленного времени

$$e_{\text{пас-ч}} = \frac{K_{\text{рек}} + (K_{\text{пс}} - K_{\text{пс(воз.)}}) \pm \Delta C \cdot (1 + P_{\text{ср.}}) \cdot T_H}{730n_{\text{пас}} \cdot m \cdot \alpha_{\text{зап}} \cdot \Delta T \cdot T_H}, \quad (2.31)$$

где $P_{\text{ср.}}$ - средняя прибыль в отрасли.

Анализируя затраты на реконструкцию линии под скоростное движение, а также изменение времени нахождения пассажира в пути, можно сказать, что стоимость проезда в скоростном поезде увеличится примерно на 20-25%. При этом в увеличение стоимости входят:

- стоимость реконструкции пути для повышения скорости движения;
- стоимость закупки дорогой новой современной подвижного состава;
- увеличение эксплуатационных расходов в связи с увеличением скорости движения;
- коэффициент съема грузовых поездов (т.е. простой для пропуска скоростных поездов).

2.5 Выводы по главе 2

1. В исследовании выполнен анализ параметров плана трассы при обращении на линии различных типов подвижного состава. Получены аналитические зависимо-

сти для расчета величины рекомендуемых радиусов круговых кривых при обычном подвижном составе и вагонах с наклоном кузова.

В результате исследования установлена зависимость между скоростью и радиусом. Выполненные вариантные расчеты показывают, что применение вагонов с наклоном кузова позволяет на существующих радиусах увеличить скорость движения на 10-45% в зависимости от величины радиуса и угла наклона.

Установлено возвышение наружного рельса, обеспечивающее комфортабельность езды пассажиров при использовании вагонов с наклоном кузова.

Разработан алгоритм расчета рекомендуемого радиуса, определяемого индивидуально для каждой кривой в автоматизированном режиме.

2. Определена структура затрат и доходов, которые необходимо учитывать при обосновании эффективности введения скоростного движения и сравнении при этом вариантов проектных решений.

Предложена сравнительная оценка эффективности переустройства участков железной дороги под скоростное движение пассажирских поездов позволяет выбрать оптимальный вариант повышения скоростей на существующих линиях с учетом критерия снижения затрат и ускорения доставки пассажиров.

Расчетами подтверждено, что применение нового подвижного состава с непогашенным ускорением $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$ позволяет реализовывать более высокие скорости на существующем пути без значительных капиталовложений в реконструкцию линии. Следовательно, для Белорусской железной дороги предлагается усовершенствовать нормативную базу и увеличить величину допускаемого непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$.

3. Проведено исследование стоимости пассажиро-часа, используемой при обосновании эффективности скоростного движения. Рассмотрены существующие способы определения стоимости пассажиро-часа и предложена методика расчета, основанная на проектных затратах по реконструкции и эксплуатации дороги для скоростного движения (формула 2.32).

3 ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

3.1 Классификация задач по принятию решений в проектах железных дорог

При проектировании железных дорог из-за сложности и многообразия строительных и эксплуатационных условий объекта, во многих случаях, приходится рассматривать большое число вариантов и выбирать из них наиболее рациональный по принятому критерию при заданных ограничениях.

Состав задач и способ их решения классифицируются по различным признакам (рисунок 3.1), в том числе:

- по количеству критериев - одно- и многокритериальные задачи;
- по степени достоверности информации – детерминированные и недетерминированные;
- по временному фактору – статические и динамические.

Однокритериальные статические детерминированные задачи относятся к оптимизационным, т.е. к задачам отыскания экстремума критерия. Методы решения этих задач различаются в зависимости от вида критерия (критериальной функции) [36].

Расчет сравнительной экономической эффективности вариантов с неизменными во времени эксплуатационными расходами выполняется по формуле дисконтированных затрат

$$\mathcal{E} = C + E_n K. \quad (3.1)$$

Для выбранного варианта определяется общая эффективность капитальных вложений, которая характеризует общую величину экономического эффекта в сопоставлении как со всеми расходами на его достижение – стоимостью средств

труда, предметов труда и рабочей силы, примененных или израсходованных в данном периоде, так и с отдельными видами используемых ресурсов

$$\mathcal{E}_n = \frac{Ц - С}{K},$$

где $Ц$ – годовая стоимость перевозок в оптовых ценах по проекту;

$С$ – годовые эксплуатационные расходы (по проекту) после сдачи железной дороги в постоянную эксплуатацию;

K – полная сметная стоимость железной дороги по проекту.

Вариант считается экономически обоснованным, если общая эффективность не меньше нормативной эффективности капитальных вложений E_n , т.е. $\mathcal{E}_n \geq E_n$.

Если $\mathcal{E}_n < E_n$, то возникает задача выбора варианта железной дороги, размеры перевозок на которой постоянны во времени.

Для того чтобы вычислить критерий – дисконтированные строительно-эксплуатационные расходы, необходимо затраты каждого года t (независимо от того, являются они капитальными вложениями или эксплуатационными расходами) умножить на коэффициент дисконтирования затрат года t , т.е. получить дисконтированные затраты каждого года, а затем их сложить.

Наряду со сравнением вариантов по дисконтированным затратам применяется сравнение вариантов по сроку окупаемости.

Если фактический срок окупаемости меньше нормативного, то предпочтение отдается варианту с большими капитальными вложениями, и наоборот.

Многокритериальные статически детерминированные задачи проектирования. Рассмотренные выше оптимизационные задачи имеют единственную цель – найти минимум (максимум) функции, например суммы затрат. В многокритериальных задачах появляется несколько целей (несколько критериев, которые желательно оптимизировать).

Для облегчения принятия решений в условиях многокритериальных задач существуют несколько методов, которые используют разработчики.

Линейная свертка. Она сводит многокритериальную задачу к однокритериальной. Вместо нескольких частных критериев W_1, W_2, \dots, W_n рассматривается один критерий в виде

$$F = \sum_{i=1}^n W_i \alpha_i,$$

где α_i – некоторые положительные числа (веса), с помощью которых производится соизмерение частных критериев.

Примером линейной свертки является рассмотренный выше критерий «дисконтированные строительно-эксплуатационные затраты», объединяющей два частных критерия: капитальные вложения K с весом 1 и эксплуатационные расходы C с весом $1/E$ (формула (2.5)). Свертка здесь облегчается тем, что размерность и характер оптимизации (минимизация) у всех трех критериев K , C и Δ одинаковы.

Выделение основного критерия. В ряде задач можно выбрать один, основной критерий. Например, в некоторых задачах в качестве основного критерия рассматривается строительная стоимость K , при этом игнорируются эксплуатационные расходы, поскольку изменение их по вариантам пренебрежительно мало, т.е. принимается $\Delta = K$.

Ранжирование вариантов. Под ранжированием понимается отображение вариантов так, чтобы лица, принимающие решения, могли оценить воздействие каждого из них и сделать свой выбор. Таким образом, неопределенность, возникающая в многокритериальных задачах, может быть снижена не только за счет сокращения числа критериев, но и за счет уменьшения числа вариантов решений [21], т.е. их ранжирования.

Однокритериальные статически недетерминированные задачи проектирования. В их основе лежит замена случайных параметров их неслучайными характеристиками, математическим ожиданием, максимальным или минимальным значением, в результате чего недетерминированные задачи сводятся к детерминированным.

Многокритериальные статически недетерминированные задачи. В настоящее время многокритериальные статические недетерминированные задачи наименее разработаны и находятся в стадии становления, хотя именно они наиболее полно отражают реальные ситуации, с которыми сталкивается разработчик проекта железной дороги.

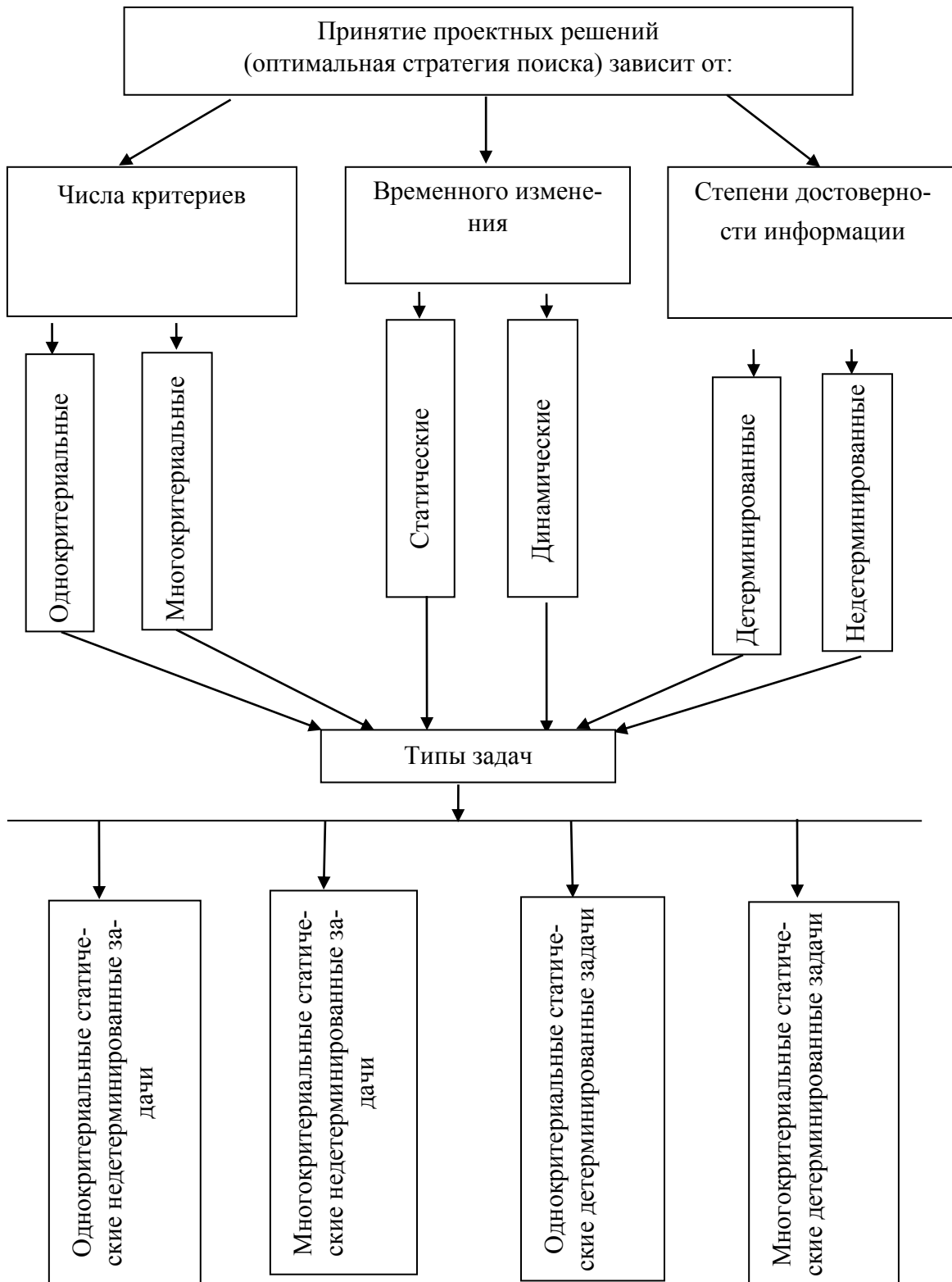


Рисунок 3.1 – Классификация задач по оптимизации проектного решения

При проектировании железной дороги, как правило, имеется не одна, а несколько целей, зачастую противоречивых, для оценки которых необходимо рас-

полагать соответственно не одним, а несколькими критериями, также противоречивыми, т.е. реальные задачи в большинстве своем многокритериальны. Кроме того, планируемые параметры цели подвержены по разным причинам изменениям, что вносит неопределенность в их значения, а значит, делает задачу недетерминированной.

Для изучения многокритериальных статических недетерминированных задач и принятия решения применяются экспертные процедуры.

Основной причиной возникновения проблемы принятия решений является отыскание варианта с оптимальным критерием, помимо которого в процессе принятия решений должны учитываться и другие факторы, понять и оценить которые позволяет теория принятия решений.

Основные положения этой теории:

1. Множество целей. В задачах принятия решений обычно имеется несколько целей, как правило, противоречивых, причем не обязательно эти цели имеют формальный характер, как в многокритериальных задачах.

2. Неопределенность. В момент принятия решения (выбора варианта) можно только прогнозировать (утверждать с некоторой вероятностью) обстановку, которая сложится в будущем, например, размеры перевозок, как в недетерминированных задачах.

3. Будущие последствия принятия решения. Если решение задачи не исчерпывает проблемы, и спустя несколько лет придется принимать очередное решение, то необходимо учитывать, какие возможности могут открыться (или закрыться) в будущем вследствие принятия сегодняшнего решения.

4. Неформализуемые понятия. Исторические ценности, эстетические представления, комфортабельность, престиж, настроение и т.д. являются примерами неформализуемых понятий, которые необходимо учитывать, но которые и усложняют задачу.

5. Проведение аналогий и сравнений. Сопоставление вариантов с отечественными и зарубежными аналогами и установление соответствия их лучшим

мировым образцам являются необходимым элементом процедуры принятия решений.

6. Социальные, экологические и стратегические аспекты. В процессе принятия решений при проектировании железных дорог возникают два вида проблем: формальные и неформальные.

Эффективность методов оптимизации и объективность получаемых результатов при решении проектных задач зависят от правильной постановки задачи, ее формализации и выбора соответствующей стратегии поиска.

3.2 Факторы неопределенности при обосновании решений для скоростного движения

Недостоверность информации при принятии проектных решений по реконструкции железной дороги для скоростного движения обусловлены различными факторами, которые подлежат анализу с учетом индивидуальных особенностей каждого проекта.

Факторы, влияющие на эффективность функционирования рассматриваемого объекта, могут быть *управляемыми или неуправляемыми* [5].

К неуправляемым факторам можно отнести погодные условия, действия конкурентов и т.д.

В состав управляемых факторов входят такие, на которые лицо, принимающее решения, может влиять по своему усмотрению в процессе планирования и осуществления деятельности. К ним относят, например, факторы, характеризующие способы применения объекта. Из множества управляемых факторов формируются стратегии управления объектом.

При исследовании рисков для рассматриваемого объекта факторы отображают в виде переменных (числовых и нечисловых). С точки зрения информированности исследователя об этих переменных факторы подразделяют на *определенные и неопределенные*.

К определенным факторам относят переменные, значения которых известны исследователю с требуемой точностью. Это различного характера заданные параметры, известные функции определенных аргументов и т. п. [5].

К неопределенным факторам относят переменные, о значениях которых в реальном процессе исследователь осведомлен не полностью. Причина неопределенности этих переменных (факторов) может быть различной. Обычно неопределенные переменные подразделяют на две группы: случайные переменные и неопределенные переменные нестохастического характера [5].

На выбор технических параметров влияют размеры перевозок на расчетные сроки эксплуатации. Причем величина этих перевозок дается исходя из прогноза, который в свою очередь не всегда оказывается верным. В период стабильного развития экономики и как следствие роста перевозок эта задача решалась исходя из опыта прошлых лет и перспективных планов развития промышленности и сельского хозяйства. Однако и тогда нельзя получить точных данных. Как показывают исследования, проведенные еще в 80-ых годах прошлого века [70, 101] фактические значения грузопотоков значительно отличаются от проектных. В работе проф. А.Е. Гибшмана [15] рассмотрено 15 транзитных и 23 тупиковых линий. В результате было получено, что значения фактических грузооборотов на расчетные сроки эксплуатации имеют существенные отклонения от проектных, причем как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

3.3 Критерии принятия решений в условиях неопределенности

Принятие решений в условиях частичной неопределенности основано на том, что вероятности различных вариантов развития событий неизвестны. В этом случае субъект руководствуется, с одной стороны, своим рискованным предпочтением, а с другой – критерием выбора из всех альтернатив по составленной «матрице решений». Принятие решений в условиях риска основано на том, что каждой ситуации развития событий может быть задана вероятность его осуществления. Это

позволяет взвесить каждое из значений эффективности и выбрать для реализации ситуацию с наименьшим уровнем риска.

Необходимость принимать решения, для которых не полностью учтены определяющие их условия, а также последующее их влияние, встречаются во всех областях техники, в частности при введении скоростного движения на железных дорогах.

Управление системой, проектирование устройств, планирование деятельности и вообще принятие решений предполагает достижение некоторой цели или последовательное приближение к некоторому наиболее предпочтительному состоянию или поведению.

В случае отсутствия достаточно полной информации возникает неопределённость в принятии решения. Причины этого различны: невозможность получения информации к моменту принятия решения; слишком высокие затраты на получение информации; невозможность устранения неопределённости по причинам объективного характера и т. д.

Планирование всегда связано с факторами неопределённости (информационная неопределённость в отношении будущего). В подобных ситуациях ответственность за принимаемые решения очень велика. Поэтому необходимо оптимально использовать имеющуюся информацию относительно поставленной задачи, чтобы, взвесив все возможные варианты решения, постараться найти среди них наилучший.

Принятие решений в условиях неопределённости связано с *риском* (возможной опасностью) принятия неэффективных решений, не обеспечивающих достижения намеченных целей.

С целью уменьшения неблагоприятных последствий в каждом конкретном случае учитывается степень риска и имеющаяся информация. Здесь *лицо принимающее решение* (ЛПР) - экономист, статистик, управленец или другое конкретное физическое лицо вступает в игровые отношения с абстрактным лицом (ситуацией, складывающейся независимо от ЛПР, на которую он не может оказывать

влияния). ЛПР должно уметь находить управленческое решение, когда абстрактное лицо не выбирает сознательно свои оптимальные стратегии.

Задачей ЛПР является принятие наилучшего управленческого решения в каждой конкретной ситуации, умение использовать даже неполную информацию для обоснования принимаемых решений. Качество принимаемого решения зависит от информированности ЛПР о ситуации, в которой принимается решение.

Риски всегда возникают при формировании любого управленческого решения, когда результат невозможно точно предсказать. Риски по экономической сущности рассматриваются как возможность потери или получения определенных выгод, имеющих случайную природу.

Различают три возможных ситуации выбора [66]:

- выбор в условиях определенности, когда результат решения обусловлен факторами, которые могут быть количественно оценены и результат предусмотрен заранее;

- выбор в условиях риска, когда результат точно нельзя предсказать, но известно о возможном распределении вероятностей наступления того или иного результата решения;

- выбор в условиях неопределенности, когда результат решения является непредсказуемым и отсутствует информация о вероятности наступления следствия решения.

Риски не является синонимом неопределенности, но они возникают именно в условиях неопределенности и именно из-за необходимости предприятия сделать выбор при формировании управленческого решения, исходя из определенных прогностических параметров выбор.

В условиях неопределенности и риска важны не только знания возможных последствий любого решения, но и информация о вероятности их на состояние.

Принятие решений представляет собой выбор одного из некоторого конечного (обычно небольшого) множества вариантов

$$E_i \in E \quad (i = \overline{1, m}),$$

где E – множество вариантов решений (стратегий) ЛПР.

Каждым вариантом E_i однозначно определяется некоторый результат e_i . Эти результаты допускают некоторую количественную оценку. Эти оценки отождествляются с соответствующими результатами, обозначая их одним символом e_i . Находится вариант решения с наибольшим значением e_i , полагая, что e_i характеризует такие величины как полезность, выигрыш, надежность или прибыль. Противоположную ситуацию с оценкой затрат или потерь можно исследовать путём минимизации оценки или, как это чаще делается, с помощью рассмотрения отрицательных величин полезности.

Таким образом, выбор оптимального варианта производится с помощью критерия

$$E_o = \left\{ E_{i_o} \mid E_{i_o} \in E \wedge e_{i_o} = \max_i e_i \right\}. \quad (3.2)$$

Процедура выбора в случае нескольких внешних состояний может быть представлена по аналогии с применением критерия (2.6). При этом каждому варианту E_i приписывается некоторый результат e_{ir} , характеризующий все последствия этого решения. Проблема в том, какой смысл вложить в результат e_{ir} . Выбор e_{ir} математически определяется оценочной (целевой) функцией. Существуют различные оценочные функции, которые принимают во внимание позиции принятия решений ЛПР.

Компромиссная позиция заключается в том, что последствия каждого из альтернативных решений характеризовать комбинацией из его наибольшего и наименьшего результатов, то можно принять:

$$e_{ir} = \min_j e_{ij} + \max_j e_{ij}, \quad (3.3)$$

наилучший в этом смысле результат имеет вид

$$\max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij} + \max_j e_{ij}). \quad (3.4)$$

Определяя желаемый результат, ЛПР исходит из компромисса между оптимистическим и пессимистическим подходами.

Оптимистическая позиция, следуя которой ЛПР становится на точку зрения азартного игрока, делая ставку на то, что при любом его решении внешняя среда будет находиться в максимально благоприятном состоянии

$$\max_i e_{ir} = \max_i (\max_j e_{ij}). \quad (3.5)$$

В **позиции нейтралитета** ЛПР исходит из того, что все встречающиеся отклонения результата решения от "среднего" случая допустимы, и выбирает решение, оптимальное с этой точки зрения.

$$\max_i e_{ir} = \max_i \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right\}. \quad (3.6)$$

Пессимистическая позиция ориентируется на то, что выпадет наименее благоприятный случай и приписывает каждому из альтернативных вариантов наихудший из возможных результатов. После этого ЛПР выбирает самый выгодный вариант, т.е. ожидает наилучшего результата при наихудшем состоянии внешней среды

$$\max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij}). \quad (3.7)$$

Позиция относительного пессимизма заключается в том, что для каждого варианта решения ЛПР оценивает потери по сравнению с определённым по каждому варианту наилучшим результатом, а затем из совокупности наихудших результатов выбирает наилучший согласно данной оценочной функции

$$\max_i e_{ir} = \min_i (\max_j (\max_i e_{ij} - e_{ij})). \quad (3.8)$$

Существуют и другие приемы принятия решений в условиях неопределенности. Использование тех или иных приемов зависит от условий эксплуатации. Если они заранее не известны и (или) не допускается риск, ориентируются обычно на наименее благоприятную ситуацию. Оценочная функция (3.8) соответствует поведению азартного игрока и поэтому в экономических и технических приложе-

ниях не применяется. Выбор критерия (оценочной функции) определяется исключительно позицией ЛПР.

В случае m вариантов решений E_1, E_2, \dots, E_m и n внешних состояний F_1, F_2, \dots, F_n критерий принятия решения можно представить в виде

$$\max K(e_{i1}, \dots, e_{in}), i = 1, \dots, m \quad \text{или} \quad \min K(e_{i1}, \dots, e_{in}), i = 1, \dots, m.$$

Всякое техническое или экономическое решение в условиях неполной информации принимается в соответствии с какой-либо оценочной функцией. При этом выбор оценочных функций всегда осуществляется с учётом анализа ситуации, в которой принимаются решения. От этого зависит качество принимаемых решений.

Существует несколько классических критериев принятия решений в условиях неопределенности и риска: критерий Байеса-Лапласа (BL-критерий), минимаксный критерий (ММ-критерий, критерий Вальда), критерий Севиджа (S-критерий, критерий минимального риска), критерий произведений (P-критерий), критерий Ходжа-Лемана, интегральный вероятностный критерий и т.д. [66]. Все они позволяют принять решение в условиях частичной неопределенности и риска.

3.4 Алгоритм принятия решений в условиях неопределенности

В данном исследовании принятие решения заключается в выборе одного из возможных вариантов реконструкции железной дороги под высокие скорости. Необходимость реконструкции железной дороги при введении скоростного движения поездов обусловлена рядом причин.

Пассажирское движение снимает часть грузовых поездов, что особенно ощутимо в условиях возрастания скоростей движения пассажирских поездов. Основным показателем здесь является коэффициент съема, величина которого зависит от скоростей движения грузовых и пассажирских поездов, длин перегонов и их не идентичности, путевого развития станций, расчетного межпоездного интер-

вала и ряда других факторов. В этой связи может возникнуть необходимость усиления мощности дороги – увеличения её пропускной и провозной способности.

При скоростном движении для обеспечения комфортабельности пассажиров предъявляются более жесткие требования к плану линии. Кривые малых радиусов необходимо уполаживать, длины прямых вставок и переходных кривых - увеличивать для стабилизации подвижного состава на концах круговых кривых.

Для обеспечения безопасности и бесперебойности движения поездов пересечения с автодорогами необходимо осуществлять в разных уровнях. Требуется замена стрелочных переводов, переустройство пассажирских платформ.

Кроме того, должны быть модернизированы устройства СЦБ и связи, усилена контактная сеть и тяговые подстанции, а также приняты меры по защите окружающей среды.

Реконструктивные мероприятия для повышения скоростей движения на железной дороге должны проектироваться так, чтобы были обеспечены безопасность и бесперебойность движения поездов, сократилось время пассажиров в пути при обеспечении требуемых размеров перевозок и наименьших строительно-эксплуатационных затратах.

Решение поставленных задач проектирования реконструкции железной дороги осуществляются на основе методов теории принятия решений.

Процедура принятия решений состоит из следующих этапов [71]: содержательная постановка задачи, формализация задачи, выбор критерия, математическая постановка задачи, формирование множества возможных допустимых вариантов, выбор метода и решение задачи, принятие решения.

Содержательная постановка задачи – это словесное ее описание.

Формализация задачи. Цель формализации состоит в переводе содержательной постановки с естественного языка понятий и терминов на язык математики – в символы и формулы.

Выбор критерия. Критерий – это показатель, с помощью которого производится оценка вариантов.

Математическая постановка задачи. Множество параметров, участвующих в задаче, можно разделить на три группы: параметры цели (размеры перевозок): x_1, x_2, \dots ; параметры системы (железной дороги): y_1, y_2, \dots ; критерий W .

Располагая параметрами и критерием, можно сформулировать математическую постановку задачи: найти такую совокупность удовлетворяющих ограничениям параметров $y_1, y_2 \dots$ системы (железной дороги), при которой обеспечивались бы параметры цели $x_1, x_2 \dots$ (размеры перевозок) при минимальном (максимальном) критерии (денежных затратах) W .

Формирование множества возможных вариантов. Любая проектная задача имеет множество решений (вариантов).

Выделение множества допустимых вариантов. Варианты, входящие в множество возможных, но не удовлетворяющие ограничениям, накладываемым на параметры железной дороги, исключаются из рассмотрения. Остальные варианты образуют множество допустимых решений.

Выбор метода и решение задачи. Выбор метода заключается в установлении наиболее подходящей математической процедуры для решения задачи, учитывающей ее формализованную модель, структуру критерия и ограничений.

Принятие решения. На основе информации, получаемой в результате применения математического аппарата, а также анализа всех показателей вариантов, учитывающих взаимодействие подсистем, а также взаимодействие системы с окружающей средой и надсистемой, принимается решение.

Методика выбора технических параметров реконструкции в условиях неопределенности исходной информации согласно данному алгоритму (рисунок 3.2) происходит следующим образом.

В блоке 1 должны быть *определены варианты расчетных условий* ($РУ_n$ -сценариев, в которых будет осуществляться эксплуатация дороги.

Необходимо выделить те факторы неопределенности, которые для данного проектного случая наиболее значимы. Кроме того, нужно определить вариантные значения факторов неопределенности. Возможные сочетания вариантов значений

факторов неопределенности определяют различные сценарии развития условий реализации проекта. Максимальное число вариантов составляет

$$N = \prod_{\phi=1}^{\phi=\Phi} R_{\phi}, \quad (3.9)$$

где Φ – число факторов неопределенности $1 \dots \phi \dots \Phi$;

R_{ϕ} – количество вариантов значений каждого фактора ϕ .

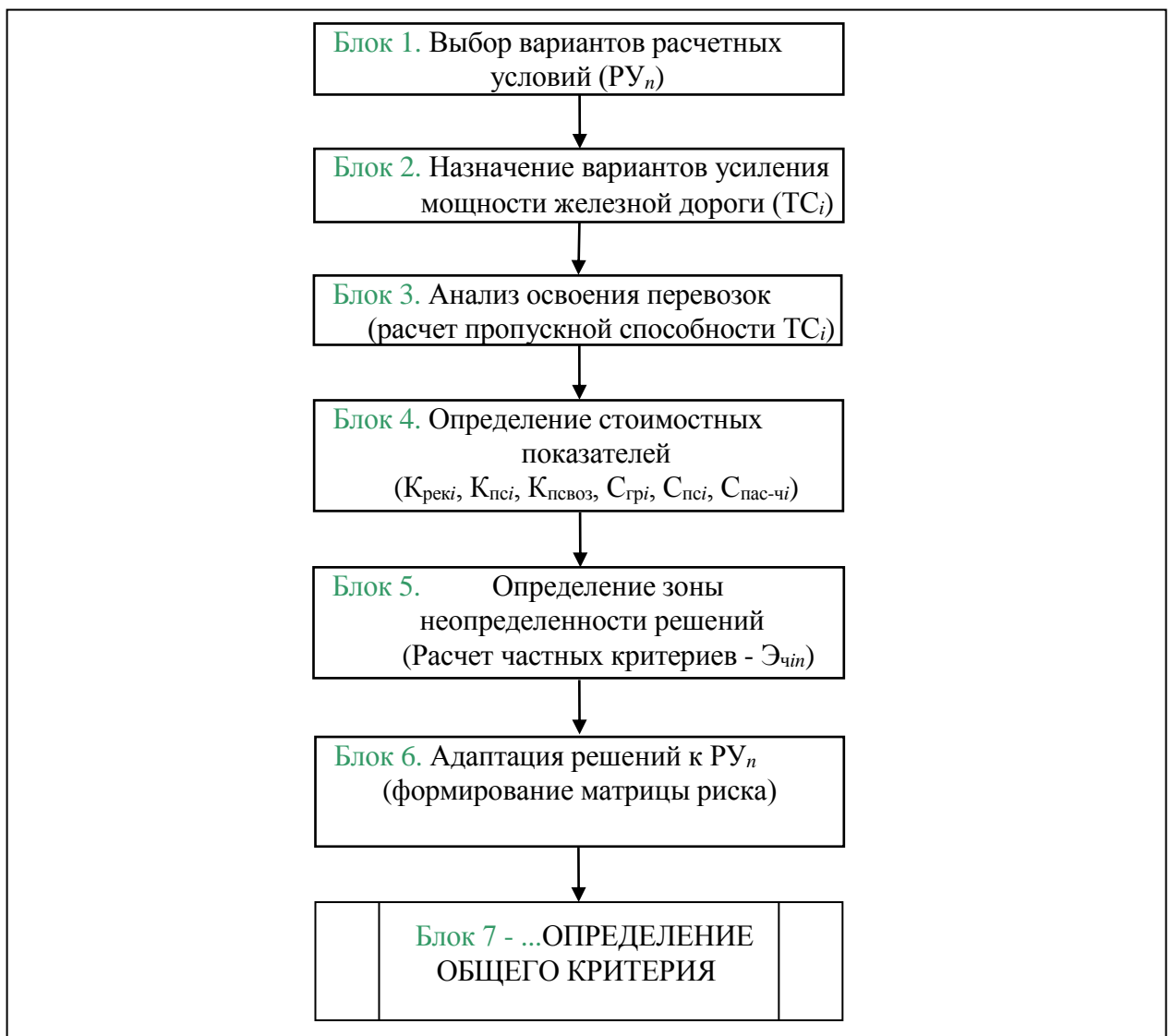


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма выбора технических параметров реконструкции для скоростного движения в условиях неопределенности

При установлении факторов неопределенности следует иметь ввиду, что железнодорожная линия - это сложная техническая система большого линейного

протяжения, расположенная в различных природных и техногенных условиях. Эти условия влияют на строительно-эксплуатационные показатели железной дороги, её пропускную и провозную способности и должны быть изучены в процессе разработки проекта. Полученные данные могут быть неполными или содержать ошибки. Поэтому обоснованность выбранных для реконструкции железных дорог технических параметров зависит от учета в методах расчета условий неопределенности. При этом под неопределенностью понимается не полное отсутствие информации о тех или иных данных, а только то, что эти данные неточные и возможно их изменение с течением времени. Например, капитальные затраты напрямую зависят от цен на материалы, стоимости работ, объемов выполняемых работ и других показателей. Эксплуатационные расходы также имеют в своей структуре ряд составляющих, которые нельзя точно определить на перспективу. Коэффициент дисконтирования зависит от нормы дисконта E , которая также может изменяться с течением времени. Как отмечено в п.2.3, также могут существенно отличаться от прогнозируемых значений проектные грузо- и пассажиропотоки на расчетные годы эксплуатации.

Далее (блок 2) производится назначение возможных вариантов комплекса технических параметров и средств технического оснащения для усиления мощности реконструируемой железной дороги, определяющих её техническое состояние после реконструкции ($ТС_i$).

Как правило, железные дороги, реконструируемые для скоростного движения пассажирских поездов, относятся к магистральным двухпутным линиям с электрической тягой. Поэтому набор вариантов усиления мощности ограничен.

В состав мероприятий по увеличению пропускной способности следует включить реконструкцию постоянных устройств в неудовлетворительном состоянии для отмены временных ограничений скоростей, модернизацию устройств СЦБ для уменьшения межпоездного и станционных интервалов и др.

Возможно также увеличение массы грузовых поездов за счет усиления мощности тяговых средств или удлинения приёмо-отправочных путей.

В некоторых случаях следует рассмотреть устройство дополнительного главного пути, а также перераспределение перевозок с использованием параллельных направлений или других видов транспорта.

В блоке 3 предполагается выполнить анализ освоения перевозок. Необходимо сделать тяговые расчеты и определить возможную пропускную способность намеченных технических состояний и, сопоставив их с потребной пропускной способностью, выявить их соотношение. Надо исключить состояния в некоторых расчетных условиях, если они не справляются с заданными размерами перевозок или предусмотреть возможность дополнительных мероприятий, позволяющих адаптировать линию к данным внешним расчетным условиям.

В блоке 4 выполняются расчеты по определению стоимости переустройства магистрали, обусловленной необходимостью усиления мощности линии и реконструктивными мероприятиями, связанными с реализацией высоких скоростей движения пассажирских поездов.

В этом же блоке необходимо определить эксплуатационные расходы и стоимости времени нахождения пассажиров в пути. Кроме того, необходимо определить затраты на приобретение подвижного состава и установить величину возврата за счет реализации существующих вагонов и локомотивов.

На следующем этапе (блок 5) устанавливаются показатели частных критериев для всех назначенных технических состояний в каждом из расчетных случаев внешних условий, принятых к рассмотрению. Критерий, как правило, денежный, включает в себя составляющие, анализ которых выполнен в п.3. При этом могут рассматриваться как одноэтапные, так и многоэтапные затраты в период эксплуатации дороги, принятый для сравнения. При использовании многоэтапных затрат, когда анализу подлежит этапное наращивание мощности линии, необходимо оптимизировать схему освоения перевозок при фиксированном начальном состоянии.

В результате должна быть сформирована матрица частных критериев, характеризующая назначенные технические состояния в каждом из вариантов расчетных условий (таблице 3.1).

Таблица 3.1 – Матрица показателей частных критериев проектных решений в различных расчетных условиях

Решения i \	Расчетные условия n	1	...	n	...	N
1		$\mathcal{E}_{ч11}$	...	$\mathcal{E}_{ч1n}$	...	$\mathcal{E}_{ч1N}$
...	
i		$\mathcal{E}_{чи1}$	...	$\mathcal{E}_{чин}$	...	$\mathcal{E}_{чиN}$
...	
I		$\mathcal{E}_{чI1}$	...	$\mathcal{E}_{чIn}$	...	$\mathcal{E}_{чIN}$

Совокупность решений, охватывающая все расчетные внешние условия, составляет зону неопределенности для рассматриваемой задачи.

В блоке 6 необходимо рассмотреть варианты, не удовлетворяющие поставленной задаче – обеспечение заданных размеров перевозок. В этом случае надо адаптировать решение к расчетным условиям - предусмотреть мероприятия по усилению пропускной и провозной способности или разгрузке линии за счет параллельных направлений.

На основании таблицы 3.1 формируется матрица рисков (таблица 3.2) по условию

$$r_{in} = \mathcal{E}_{чин} - \min \mathcal{E}_{чин},$$

где $\mathcal{E}_{чин}$ - показатель частного критерия для i -го проектного решения в n -х расчетных условиях; $\min \mathcal{E}_{чин}$ – показатель критерия для наиболее рационального проектного решения в расчетных условиях n .

Таблица 3.2 – Матрица рисков

Решения i \	Расчетные условия n	1	...	n	...	N
1		r_{11}	...	r_{1n}	...	r_{1N}
...	
i		r_{i1}	...	r_{in}	...	r_{iN}
...	
I		r_{I1}	...	r_{In}	...	r_{IN}

Матрица рисков показывает дополнительные затраты для решения i по сравнению с наиболее рациональным решением в рассматриваемых расчетных условиях n .

В блоках 7 - ... необходимо выбрать метод оценки решения в условиях неопределенности, определить общий критерий принятия решения и установить наиболее рациональное проектное решение с учетом всех расчетных условий.

Достоверность выбора технических параметров в проекте железнодорожной линии, во многом, зависит от корректно принятого метода сравнения, а также критерия оптимальности решения.

3.5 Методика расчета интегрального вероятностного критерия

Исходными данными для определения ИВК [75] является матрица рисков. Также может быть использована матрица частных критериев.

При использовании матрицы рисков для каждого варианта проектных решений i составляются зависимости математического ожидания потерь от вероятности реализации расчетных условий p_n , изменяющейся в диапазоне от 0 до 1

$$M_{in}(p_n) = r_{in}p_n + \sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}p_j \quad (3.10)$$

где r_{in} – элемент матрицы риска для рассматриваемых РУ;

r_{ij} – элемент матрицы риска при остальных РУ.

Вероятность реализации остальных расчетных условий принимается одинаковой

$$p_j = \frac{1 - p_n}{N - 1} \quad (3.11)$$

Подставляя формулу для p_j в выражение (3.16), получаем:

$$M_{in}(p_n) = \left(r_{in} - \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1} \right) \cdot p_n + \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1} \quad (3.12)$$

Примем обозначения:

$$k_{in} = r_{in} - \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1}, \quad b_{in} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} r_{ij}}{N-1} \quad (3.13)$$

В результате получаем математическое ожидание потерь в виде линейного относительно p_n уравнения

$$M_{in}(p_n) = k_{in} \cdot p_n + b_{in}. \quad (3.14)$$

Таким образом, для каждого варианта расчетных условий $n \in N$ получаем систему линейных зависимостей из I уравнений, где I – количество решений в зоне неопределенности

$$\sum_{n=1}^{n=N} k_{in} \cdot p_n = b_i \quad (i=1, 2, \dots, I)$$

или в развернутом виде

$$M_{1n}(p_n) = k_{1n} \cdot p_n + b_{1n}$$

.....

$$M_{in}(p_n) = k_{in} \cdot p_n + b_{in}$$

.....

$$M_{In}(p_n) = k_{In} \cdot p_n + b_{In}.$$

Пересечения линий, характеризуемых этими уравнениями, позволяют установить границы вероятностей, при которых оптимальное и субоптимальное решения равноценны.

Анализ абсцисс этих точек пересечений позволяет установить интервалы вероятностей реализации расчетных условий, в которых то или иное решение является наиболее рациональным. Далее вычисляется интегральный вероятностный критерий (ИВК).

Расчет общего интегрального вероятностного критерия (ИВК) выполняется в последовательности, указанной на рисунке 3.3.

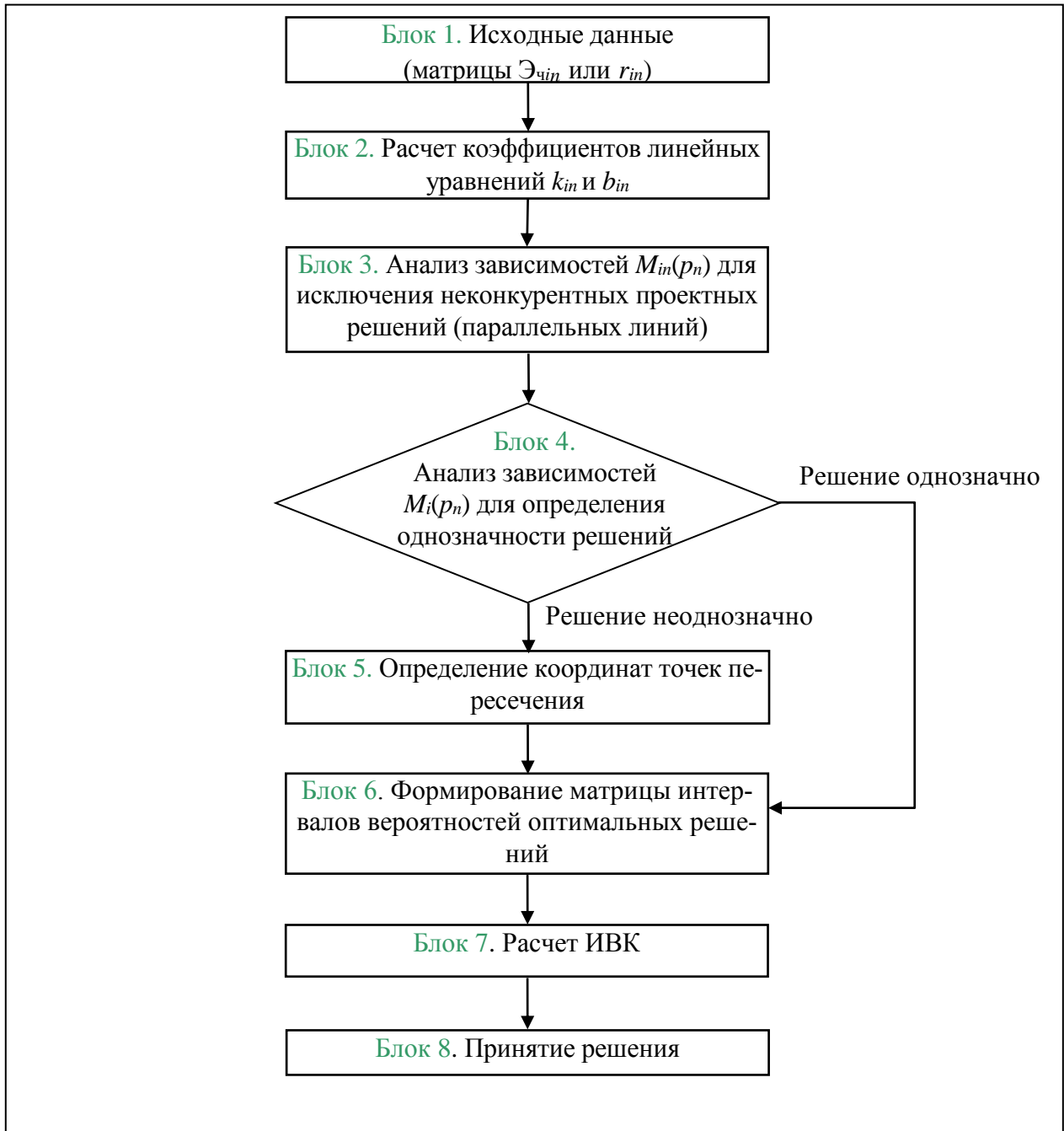


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритма расчета интегрального вероятностного критерия

Блок 1. Формируется матрица частных критериев. Выполняется анализ соответствия решений каждому из принятых к рассмотрению варианту расчетных условий. В случае необходимости решение должно быть оценено с учетом адап-

тации к данным расчетным условиям. На основании матрицы частных критериев составляется матрица рисков (потерь).

Блок 2. По формулам (3.13) выполняется расчет коэффициентов линейных уравнений k_{in} и b_{in} .

Блок 3. Анализ зависимостей $M_{in}(p_n)$ для исключения неконкурентных проектных решений (параллельных линий). С использованием правила Крамера или графика необходимо исключить технические состояния, зависимости которых параллельны, а потери больше. Например, на рисунке 3.4 необходимо исключить состояние $i=1$, параллельное состоянию $i=3$ и уступающее ему по потерям.

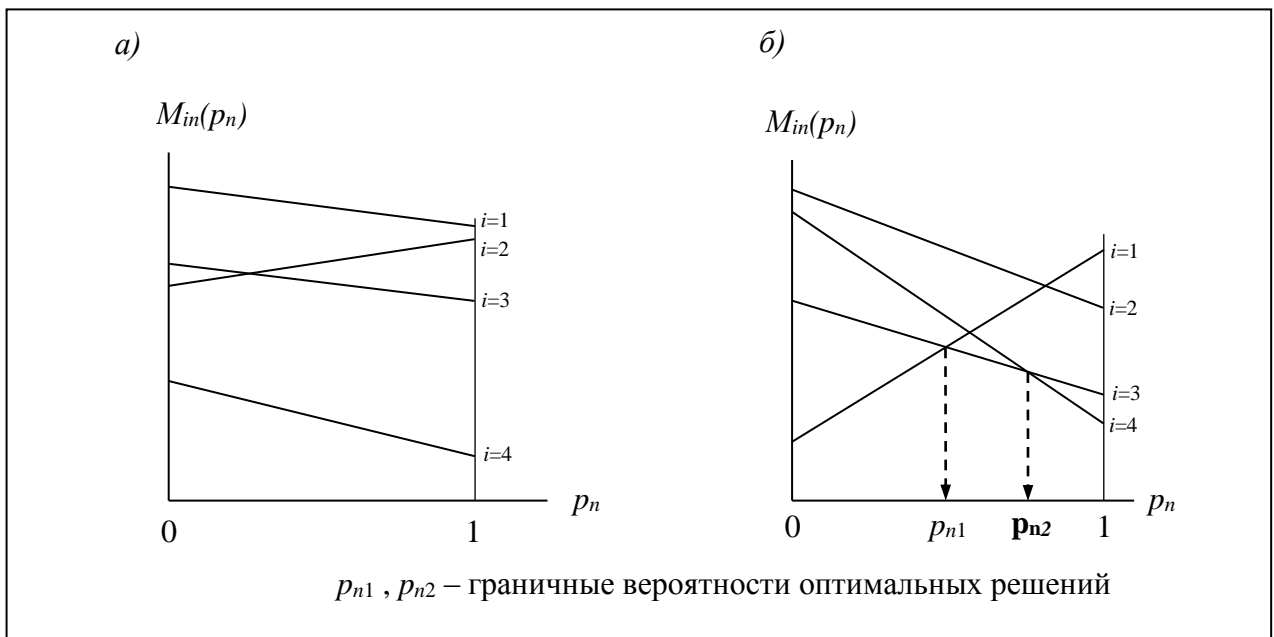


Рисунок 3.4 – Варианты соотношения зависимостей $M_{in}(p_n)$

Блок 4. Анализ зависимостей $M_{in}(p_n)$ для определения однозначности решений.

В некоторых случаях возможно, что результаты сравнения вариантов решений при всех значениях вероятностей дают однозначный ответ. На рисунке 4.3 очевидно преимущество технического состояния $i=4$. Тогда наиболее рациональное решение очевидно и необходимо перейти к блоку 6.

Блок 5. Определение координат точек пересечения. Необходимо решить систему линейных уравнений одним из известных способов (последовательным исключением неизвестных, с использованием правила Крамера и т.д.).

Блок 6. Формирование матрицы интервалов вероятностей оптимальных решений. Необходимо выполнить анализ полученных в блоке 5 координат точек пересечения.

Сначала следует определить принадлежность абсциссы точки пересечения к интервалу $0 \leq p \leq 1$. Точки вне интервала исключаются из рассмотрения. Далее выполняется поиск минимальной ординаты, то есть устанавливается решение с минимальными показателями общего критерия анализируемых решений при данном значении вероятности.

Из оставшихся после анализа точек формируется вектор интервалов вероятностей оптимальных решений в данных расчетных условиях. В результате получаем таблицу интервалов изменения вероятности, в которых то или иное решение оптимально (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Интервалы вероятностей оптимальных решений и расчет показателей ИВК

Проектное решение	Расчетные условия						$\sum_{j=1}^{j=N} \Delta p_j$
	1	2	3	4	...	N	
1	$(p_n \div p_k)_{11}$	0	0	$(p_n \div p_k)_{41}$	...	0	...
2	0	$(p_n \div p_k)_{22}$	0	$(p_n \div p_k)_{42}$	...	0	...
3	$(p_n \div p_k)_{13}$	0	$(p_n \div p_k)_{33}$	0	...	0	...
4	0	0	0	0	...	$(p_n \div p_k)_{N4}$	...
...
I	0	0	$(p_n \div p_k)_{3A}$	$(p_n \div p_k)_{4A}$	...	0	...

Блок 7. Расчет ИВК. Таблица 3.2 служит основанием для вычисления интегрального вероятностного критерия по формуле

$$\alpha_p = \frac{\sum_{j=1}^{j=N} \Delta p_j}{N}, \quad (3.15)$$

где $\Delta p_i = p_k - p_n$, p_k , p_n – значения вероятностей конца и начала интервала оптимального решения соответственно (см. рисунок 3.4).

В качестве оптимального выбирается вариант с максимальными значениями α_p .

3.6 Выводы по главе 3

Выполнен анализ общего алгоритма принятия решений в условиях неопределенности при выборе технических параметров по увеличению провозной способности линии, реконструируемой для перехода на скоростное движение пассажирских поездов.

Подробно исследована структура денежного критерия для сравнения вариантов на реконструируемых линиях со смешанными грузовыми и пассажирскими поездами для скоростного движения поездов.

Разработан алгоритм определения интегрального вероятностного критерия применительно к рассматриваемой задаче.

Предложена методика принятия решения по выбору технических параметров и средств оснащения линии с учетом неопределенности при реконструкции для скоростного движения пассажирских поездов.

4 ПРИМЕР ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ДЛЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

4.1 Исходные данные

Характеристика участка железной дороги

Взятый для разработки примера участок железнодорожной линии расположен во втором транспортном коридоре, проходящем по территории Республики Беларусь.

Основные технические параметры:

- руководящий уклон – 9 ‰;
- длина участка – 192 км;
- полезная длина приемо-отправочных путей $l_{по} = 850$ м;
- число главных путей – 2 пути;
- вид тяги – электрическая переменного тока (ЧС4т, ВЛ80к);
- устройство СЦБ – автоблокировка;
- способ организации движения (вид графика) – пакетный.
- весовая норма – $Q_{вн} = 3200$ т.

Размеры перевозок

Грузовые перевозки – 30 млн. ткм/км в год.

Пассажирское движение – 10-30 п.п./сутки.

Расчетные условия

В результате анализа возможных вариантов эксплуатации железной дороги после реконструкции для скоростного движения пассажирских поездов установлены два фактора неопределенности – размеры перевозок и величина стоимости пассажиро-часа. Принято три варианта размеров пассажирского движения ($n_{псi}$ в парах поездов в сутки) а также два варианта стоимости пассажиро-часа ($e_{п-чj}$ в у.е./п-ч): $n_{пс1} = 10$; $n_{пс2} = 20$; $n_{пс3} = 30$; $e_{п-ч1} = 3.3$; $e_{п-ч2} = 6,6$.

Таким образом, анализу подлежат $N=3 \times 2=6$ вариантов расчетных условий:

$$PУ_n \Rightarrow n_{пс1} e_{п-ч1}, n_{пс1} e_{п-ч2}, n_{пс2} e_{п-ч1}, n_{пс2} e_{п-ч2}, n_{пс3} e_{п-ч1}, n_{пс3} e_{п-ч2}.$$

Анализ пропускной способности железнодорожной линии

Необходимые и возможные пропускные способности линии при существующем техническом состоянии и принятых в примере размерах перевозок определена в соответствии с Инструкцией по расчету наличной пропускной способности [39]. Результаты расчетов при скоростях пассажирских поездов до 120 км/ч показаны на рисунке 4.1.

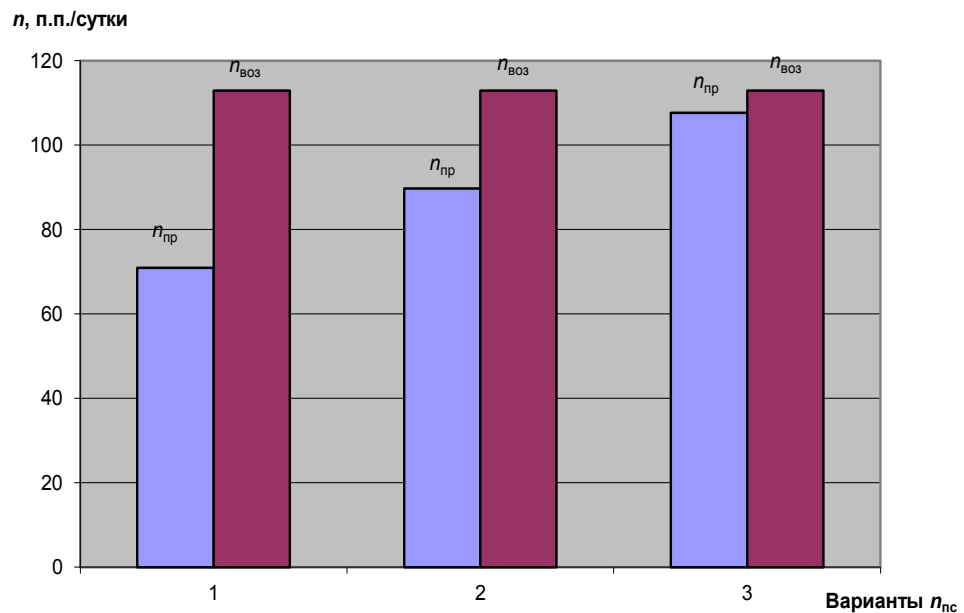


Рисунок 4.1 – Необходимая и возможная пропускные способности участка железной дороги при существующем техническом состоянии линии и $V_{\max(пс)}=120$ км/ч:

$n_{пр}$ –потребное количество пар приведенных поездов в сутки; $n_{воз}$ –возможное количество пар поездов в сутки; варианты $n_{пс}$: 1–10 п.п./сутки; 2–20 п.п./сутки; 3–30 п.п./сутки.

Как следует из сопоставления пропускных способностей, железная дорога обеспечивает заданные размеры перевозок при всех расчетных вариантах внешних расчетных условий.

Коэффициент съема грузовых поездов пассажирскими определен по рекомендациям [39]. Расчеты показали, что в принятых для примера условиях коэффициент съема пассажирскими поездами при увеличении скоростей от 120 до 200 км/ч возрастает от 1,98-1,89 до 3,17-2,90.

На рисунке 4.2 показаны необходимая и возможная пропускные способности участка железной дороги при существующем техническом состоянии линии и $V_{\max(\text{пс})}=200$ км/ч с учетом увеличения съема грузовых поездов пассажирскими.

В расчетах возможной пропускной способности при скоростном движении увеличен резерв на плановые ремонты и текущее содержание постоянных устройств со 120 до 240 мин.

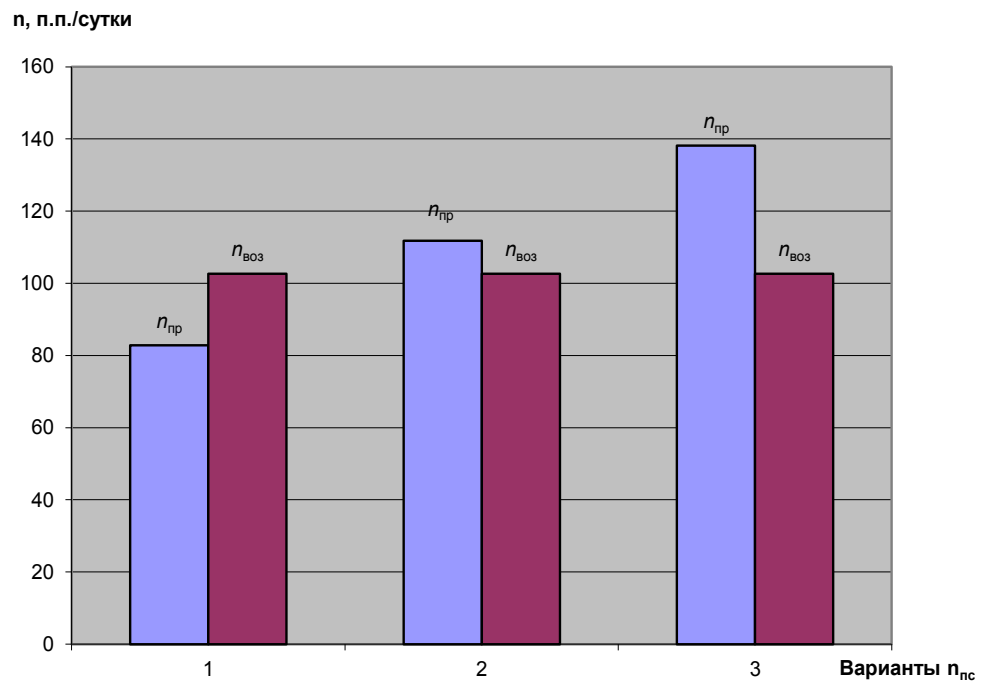


Рисунок 4.2 – Необходимая и возможная пропускные способности участка железной дороги при существующем техническом состоянии линии и $V_{\max(\text{пс})}=200$ км/ч: $n_{\text{пр}}$ –потребное количество пар приведенных поездов в сутки; $n_{\text{воз}}$ –возможное количество пар поездов в сутки; варианты $n_{\text{пс}}$: 1–10 п.п./сутки; 2–20 п.п./сутки; 3–30 п.п./сутки.

Как видно на рисунке 4.2, для второго и третьего вариантов размеров пассажирских перевозок железная дорога должна быть реконструирована с целью увеличения её провозной способности.

В результате анализа существующего технического состояния линии и возможных вариантов усиления линии приняты следующие реконструктивные мероприятия:

- 1) увеличение полезной длины приемо-отправочных путей от 850 до 1050 м, что позволит повысить весовую норму поезда от 3200 до 4000 т;
- 2) строительство III главного пути со специализацией его для грузового движения при частично-пакетном графике;

3) строительство III главного пути совместно с удлинением приемо-отправочных путей.

Выполнены расчеты пропускных способностей после усиления мощности дороги за счет указанных мероприятий. Результаты определения пропускных способностей железной дороги после усиления мощности при скоростном движении пассажирских поездов приведены на рисунках 4.3 – 4.5.

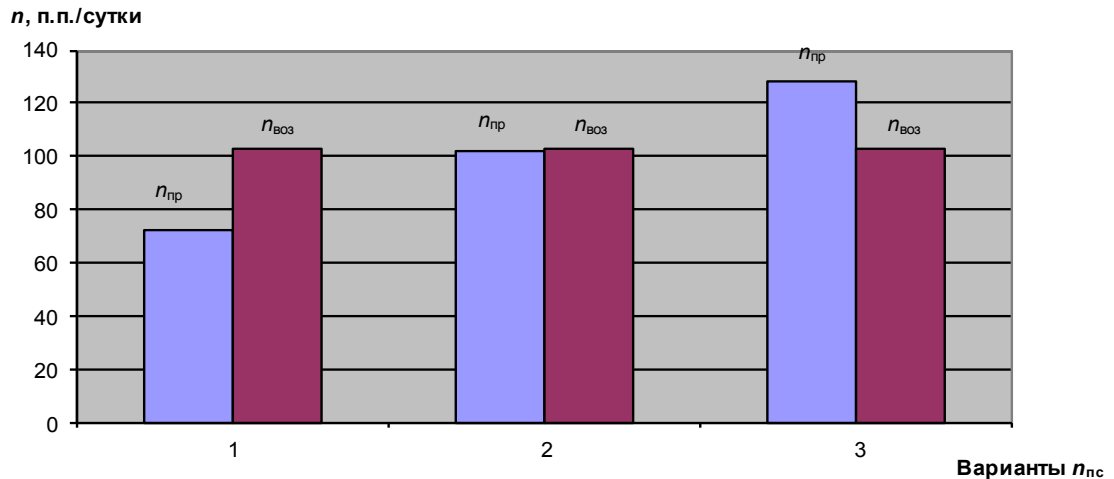


Рисунок 4.3 – Необходимая и возможная пропускные способности участка железной дороги после удлинения приемо-отправочных путей линии при $V_{\max(\text{пс})}=200$ км/ч:
 $n_{\text{пр}}$ –потребное количество пар приведенных поездов в сутки; $n_{\text{воз}}$ –возможное количество пар поездов в сутки; варианты $n_{\text{пс}}$: 1–10 п.п./сутки; 2–20 п.п./сутки; 3–30 п.п./сутки.

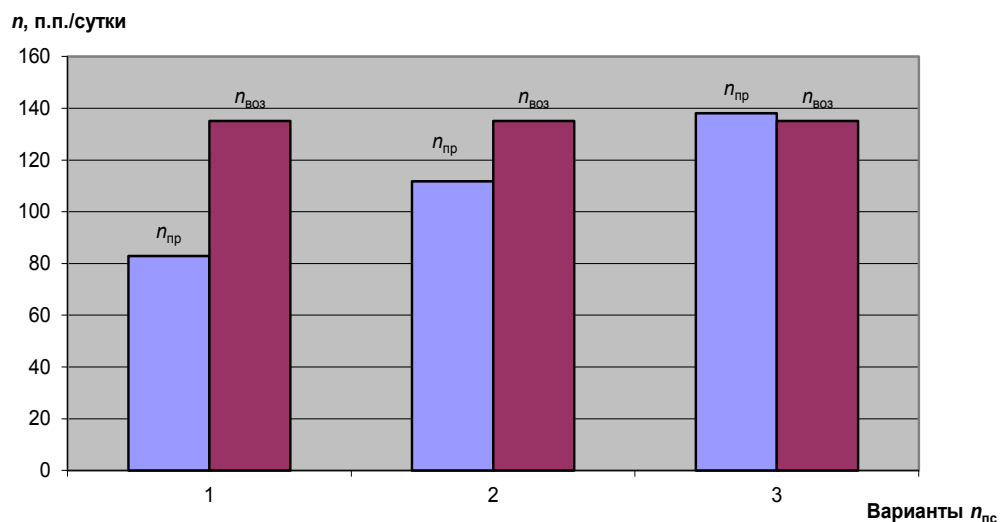


Рисунок 4.4 – Необходимая и возможная пропускные способности участка железной дороги после строительства третьего пути при $V_{\max(\text{пс})}=200$ км/ч:
 $n_{\text{пр}}$ –потребное количество пар приведенных поездов в сутки; $n_{\text{воз}}$ –возможное количество пар поездов в сутки; варианты $n_{\text{пс}}$: 1–10 п.п./сутки; 2–20 п.п./сутки; 3–30 п.п./сутки.

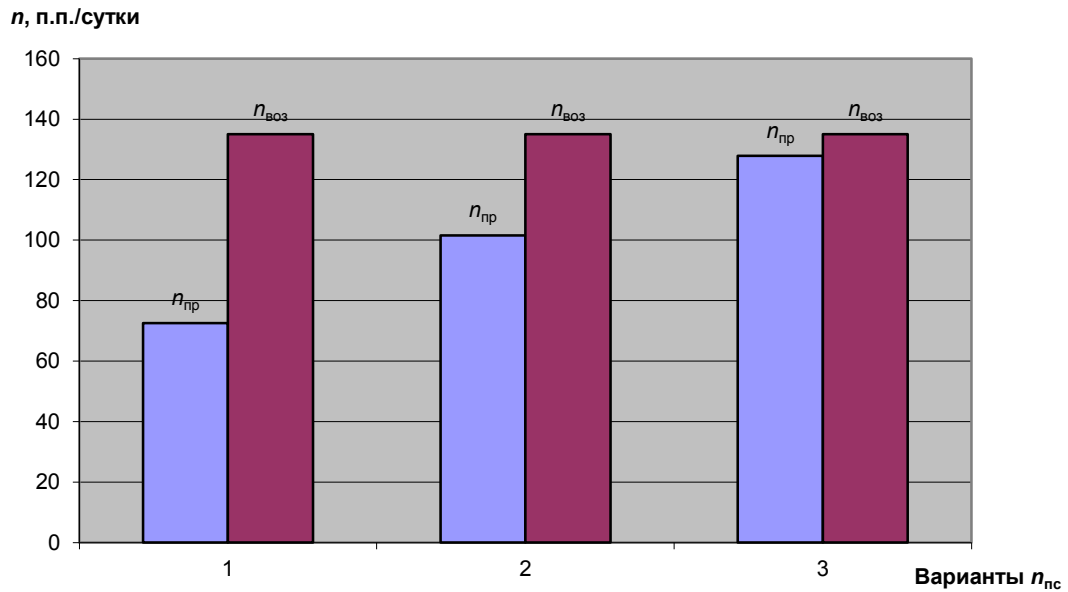


Рисунок 4.5 – Необходимая и возможная пропускные способности участка железной дороги после строительства третьего пути и удлинения приемо-отправочных путей при $V_{\max(пс)}=200$ км/ч:

$n_{пр}$ –потребное количество пар приведенных поездов в сутки; $n_{воз}$ –возможное количество пар поездов в сутки; варианты $n_{пс}$: 1–10 п.п./сутки; 2–20 п.п./сутки; 3–30 п.п./сутки.

Анализ соотношения возможных и необходимых пропускных способностей, приведенных на рисунках 4.3 – 4.5 показывает, что в вариантах расчетных условий при размерах пассажирского движения 30 п.п. в сутки усиления мощности дороги за счет удлинения приемо-отправочных путей или строительства второго пути недостаточно.

В варианте расчетных условий с размерами перевозок 10 п.п./сутки усиление мощности линии не требуется (см. рисунок 4.2). Следовательно, в этих вариантах расчетных условий необходимо в качестве адаптивных мероприятий рассмотреть целесообразность эксплуатации линии без усиления мощности.

В рассматриваемом примере вариант удлинения полезной длины приемо-отправочных путей конкурентен во всех случаях, так как увеличение весовой нормы грузового поезда позволит уменьшить эксплуатационные расходы по движению поездов, а вариант с использованием III-го пути не имеет смысла. Поэтому адаптация в вариантах внешних расчетных условий с $n_{пс} = 10$ п.п./сутки для второго и третьего проектных решений по усилению мощности линии предполагает

разборку III-го пути и получение возвратных стоимостей по некоторым устройствам (верхнее строение пути, стрелочные переводы и т.д.). Возможен также вариант консервирования III-го пути.

4.2 Формирование матриц частных критериев и риска

В соответствии с п. 3 (см. рисунок 3.2), после установления множества расчетных условий и назначения вариантов усиления мощности линии, необходимо сформировать матрицу показателей частных критериев $\mathcal{E}_{\text{ч.и.}}$.

В качестве критерия принят минимум суммы приведенных строительно-эксплуатационных затрат и стоимости времени нахождения пассажиров в пути на расчетный год эксплуатации

$$\mathcal{E}_{\text{ч.и.}} = (K_{\text{рек}} + K_{\text{пс}} - K_{\text{пс(возв)}}) \cdot E \pm C_t + C'_{\text{п-ч.}}$$

К единовременным затратам, включенным в показатель критерия, отнесены капиталовложения на реконструкцию дороги ($K_{\text{рек}}$) и приобретение подвижного состава ($K_{\text{пс}}$). Принят электропоезд «Ласточка».

Учтена возвратная стоимость за счет высвобождения используемых пассажирских вагонов и локомотивов ($K_{\text{пс(возв)}}$). Норма дисконта (E) взята равной 0,1.

Стоимость времени нахождения пассажиров в пути ($C'_{\text{п-ч.}}$) определена по формуле (2.25).

В таблице 4.1 приведены результаты расчетов показателей критерия для принятых вариантов переустройства в различных расчетных условиях.

Таблица 4.1 – Матрица показателей частных критериев решений в различных расчетных условиях, тыс.бел.руб.

Проектные решения i	Расчетные условия n					
	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.
	1	2	3	4	5	6
1. Удл. $l_{по}$	269,334	348,650	482,952	284,214	378,410	527,592
2. III путь	280,982	380,336	477,498	295,862	410,096	522,138
3. Удл. $l_{по}+$ III путь	289,375	404,270	474,936	304,254	434,03	519,576

На базе этих данных получена матрица рисков, показывающая дополнительные приведенные затраты (потери) по отношению к наиболее рациональному решению в каждом из расчетных условий (таблица 4.2). В каждом столбце матрицы находят минимальное значение $\min_i \mathcal{E}_{чин}$ и вычисляют разности по формуле

$$r_{in} = \mathcal{E}_{чин} - \min_i \mathcal{E}_{чин}$$

Таблица 4.2 – Матрица рисков (потери)

Проектные решения i	Расчетные условия n					
	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.
	1	2	3	4	5	6
1. Удл. $l_{по}$	0	0	8,016	0	0	8,016
2. III путь	11,648	31,686	2,562	11,648	31,686	2,562
3. Удл. $l_{по}+$ + III путь	20,41	55,620	0	20,040	55,620	0

Анализ результатов показывает, что 1-й вариант (удл. $l_{по}$) является лучшим в первом, втором, четвертом и пятом вариантах расчетных условий; 2-й вариант (III путь) – во всех случаях занимает промежуточное значение; 3-й вариант (удл. $l_{по}+$ III путь) – лучший в третьем и шестом вариантах расчетных условий.

Определение стоимости реконструкции линии производилось на основе данных приведенных в [109], где НЦС на устройство железнодорожных линий дифференцированы в зависимости от категории линии (I категория), категории местности

по рельефу (II категория – «пересеченная местность, изрезанная балками и оврагами или частично заболоченная местность»), группы грунтов (дифференцировано только для тоннелей) и различных условий отсыпки земляного полотна («насыпь из выемки» и «насыпь из карьера до 50%»). Дальность возки грунта и балластных материалов учитывается поправочными коэффициентами.

В [109] не учитывают особенности сооружения скоростных (более 160 км/ч) и высокоскоростных железнодорожных линий (участков). Однако, повышение скоростей движения выше 160 км/ч на ближнюю перспективу и не предусматривается, конструктивная скорость ЭПм «Stadler» и ЭС1 «Ласточка» равна 160 км/ч, а их максимальная скорость в эксплуатации, соответственно, 138 и 140 км/ч.

Таким образом, использование данных [109] допустимо.

В качестве реконструктивных мероприятий рассматриваются строительство третьего пути [109] для увеличения пропускной способности линии и увеличение полезной длины приемо-отправочных путей (определяется на основе [109]), также обеспечивающее увеличение пропускной способности линии за счет роста массы грузовых поездов.

4.3 Принятие решений в условиях неопределенности с использованием различных общих критериев

После того, как сформирована матрица частных критериев и матрица риска, необходимо принять оптимальное решение с использованием обобщающих (общих) критериев, анализ которых приведен в главе 3. Далее рассмотрено использование классических методов принятия решений и выбор оптимального решения с помощью интегрального вероятностного критерия, предложенного на кафедре «Изыскания и проектирование железных дорог» МИИТа.

4.3.1 Классические критерии принятия решений в условиях неопределенности и риска

Критерий Байеса-Лапласа (BL-критерий)

Применительно к рассматриваемой задаче в принятых в главе 4 и 5 обозначениях оценочная функция (общий критерий) имеет вид

$$Z_{BL} = \min_i \sum_{n=1}^N p_n \cdot \mathcal{E}_{чин}$$

Если все внешние расчетные условия принятия решений PY_n ($n=1, 2, \dots, N$) равновероятны ($p_1 = p_2 = \dots = p_N = 1/N$), то используется критерий Лапласа (таблица 4.3)

$$Z_{BL} = \min_i \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathcal{E}_{чин}$$

Таблица 4.3 – Принятие решения по критерию Байеса-Лапласа

Проектные решения i	Расчетные условия n						$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathcal{E}_{чин}$	Рекомендуемое решение
	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.		
	1	2	3	4	5	6		
Удл. $l_{по}$	269,334	348,650	482,952	284,214	378,410	527,592	763,717	Удл. $l_{по}$
III путь	280,982	380,336	477,498	295,862	410,096	522,138	788,970	
II путь + Удл. $l_{по}$	289,375	404,270	474,936	304,254	434,03	519,576	808,812	

Согласно критерию Байеса-Лапласа в качестве оптимального рекомендовано решение – *увеличение полезной длины прямо-отправочных путей* (удл. $l_{по}$).

Следует отметить, что в состав условий корректного применения данного критерия входит многоразовая реализация задачи, что не соответствует примеру.

Минимаксный критерий (ММ-критерий или критерий Вальда)

Общий критерий имеет в примере следующую оценочную функцию, соответствующую позиции крайнего пессимизма (таблица 4.4)

$$Z_{MM} = \min_i \max_n \mathcal{E}_{чин}$$

Таблица 4.4 – Принятие решения по критерию Вальда

Проектные решения i	Расчетные условия n						$\max_n \Delta_{ин}$	Рекомендуемое решение
	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.		
	1	2	3	4	5	6		
Удл. $l_{по}$	269,334	348,650	482,952	284,214	378,410	527,592	527,592	III путь+ удл. $l_{по}$
III путь	280,982	380,336	477,498	295,862	410,096	522,138	522,138	
II путь + Удл. $l_{по}$	289,375	404,270	474,936	304,254	434,03	519,576	519,576	

Таким образом, согласно критерию Вальда, в качестве оптимального будет рекомендовано решение – строительство третьего пути с удлинением приемо-отправочных путей (III путь+удл. $l_{по}$), при использовании которого затраты при любых условиях не превысят 259,788 тыс. бел.руб.

Критерий Сэвиджа (S-критерий)

Оценочная функция критерия Сэвиджа имеет вид

$$Z_S = \min_i \max_n r_{in}.$$

Условия применения S-критерия (таблица 4.5):

- о вероятностях внешних состояний F_n ничего не известно;
- решение реализуется малое число раз;
- при небольшом числе реализаций решения допускается некоторый риск.

Таблица 4.5 – Принятие решения по критерию Сэвиджа

Проектные решения i	Расчетные условия n						$\max_n r_{i,n}$	Рекомендуемое решение
	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.		
	1	2	3	4	5	6		
Удл. $l_{по}$	1. Удл. $l_{по}$	0	0	8,016	0	0	8,016	Удл. $l_{по}$
III путь	2. III путь	11,648	31,686	2,562	11,648	31,686	31,686	
III путь + Удл. $l_{по}$	3. Удл. $l_{по}$ + III путь	20,41	55,620	0	20,040	55,620	55,62	

Согласно критерию Сэвиджа в качестве оптимального рекомендуется удлинение приемо-отправочных путей (удл. $l_{по}$).

Критерий произведений

Оценочная функция по критерию произведений $Z_P = \min_i \prod_1^N \mathcal{E}_{\text{чин}}$.

Условия применения критерия произведений:

- о вероятностях внешних состояний F_n ничего не известно;
- решение реализуется малое число раз;
- при небольшом числе реализаций решения допускается некоторый риск (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Принятие решений по критерию произведений

Проектные решения i	Расчетные условия n						Z_P	Рекомендуемое решение
	$n_{\text{пс}}=10\text{п.п.}$ $e_{\text{п-ч}}=6,6$ бел.руб.	$n_{\text{пс}}=20\text{п.п.}$ $e_{\text{п-ч}}=6,6$ бел.руб.	$n_{\text{пс}}=30\text{п.п.}$ $e_{\text{п-ч}}=6,6$ бел.руб.	$n_{\text{пс}}=10\text{п.п.}$ $e_{\text{п-ч}}=13,2$ бел.руб.	$n_{\text{пс}}=20\text{п.п.}$ $e_{\text{п-ч}}=13,2$ бел.руб.	$n_{\text{пс}}=30\text{п.п.}$ $e_{\text{п-ч}}=13,2$ бел.руб.		
	1	2	3	4	5	6		
Удл. $l_{\text{по}}$	269,334	348,650	482,952	284,214	378,410	527,592	8,04E+13	Удл. $l_{\text{по}}$
III путь	280,982	380,336	477,498	295,862	410,096	522,138	10,1E+13	
II путь + Удл. $l_{\text{по}}$	289,375	404,270	474,936	304,254	434,03	519,576	11,9E+13	

Согласно критерию произведений в качестве оптимального будет рекомендовано решение по удлинению приемо-отправочных путей (Удл. $l_{\text{по}}$).

Критерий Ходжа-Лемана (HL-критерий)

Этот критерий основан на BL -критерии и MM -критерии. С помощью параметра ν выражается степень доверия к использованному распределению вероятностей. При решении задачи учитывается, что степень доверия к позиции крайней осторожности Z_{MM} на процесс принятия решения должна быть не более 0,4.

Оценочная функция определяется равенством

$$Z_{HL} = \min_i \left[\nu \sum_{n=1}^N p_n \cdot \mathcal{E}_{\text{чин}} + (1 - \nu) \max_n \mathcal{E}_{\text{чин}} \right].$$

Критерий Ходжа-Лемана предъявляет к ситуации принятия решения следующие требования:

- вероятности появления состояний F_n неизвестны, но некоторые предположения о распределении вероятностей возможны;

- принятое решение теоретически допускает бесконечно много реализаций;
- при малых числах реализаций допускается некоторый риск.

Критерий Ходжа-Лемана рассмотрен в предположении, что все состояния равновероятны ($p_1 = p_2 = \dots = p_6 = 0,167$ при $\nu = 0,4$) (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Принятие решения по критерию Ходжа-Лемана

Проектные решения i	Расчетные условия n						Z_{HL}	Рекомендуемое решение
	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.		
	1	2	3	4	5	6		
Удл. $l_{по}$	269,334	348,650	482,952	284,214	378,410	527,592	440,61	Удл. $l_{по}$
III путь	280,982	380,336	477,498	295,862	410,096	522,138	446,02	
III путь+ удл. $l_{по}$	289,375	404,270	474,936	304,254	434,03	519,576	451,68	

По критерию Ходжа-Лемана при $\nu = 0,4$ оптимальным мероприятием по усилению мощности будет удлинение приемо-отправочных путей (Удл. $l_{по}$).

Критерий Гурвица (HW-критерий)

Оценочная функция по критерию Гурвица дает решение, которое находится между позициями крайнего пессимизма и предельного оптимизма.

Весовой множитель λ , показывающий степень пессимизма и принимает значения от 0 до 1.

$$Z_{HW} = \min_i \left[\lambda \max_n \mathcal{E}_{чин} + (1 - \lambda) \min_n \mathcal{E}_{чин} \right]$$

Стараясь занять наиболее уравновешенную позицию, лицо, принимающее решение может воспользоваться критерием Гурвица, приняв $\lambda = 0,5$. В результате будет получено средневзвешенное решение между точками зрения предельного оптимиста и крайнего пессимиста. Рекомендуется принимать $\lambda = 0,3$ (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Принятие решения по критерию Гурвица

Проектные решения i	Расчетные условия n						Z_{HL}	Рекомендуемое решение
	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30$ п.п. $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.		
	1	2	3	4	5	6		
Удл. $l_{по}$	269,334	348,650	482,952	284,214	378,410	527,592	346,81	Удл. $l_{по}$
III путь	280,982	380,336	477,498	295,862	410,096	522,138	353,33	
III путь+ удл. $l_{по}$	289,375	404,270	474,936	304,254	434,03	519,576	358,34	

Критерий предъявляет к ситуации принятия решений следующие требования:

- о вероятности появления состояний ничего не известно;
- решение реализуется лишь малое количество раз;
- допускается некоторый риск.

Расчет выполнен при $\gamma=0,3$.

В соответствии с критерием Гурвица надо рекомендовать усилить мощность линии за счет удлинения приемо-отправочных путей (Удл. $l_{по}$).

Критерий Гермейера (G-критерий)

Оценочная функция по критерию Гермейера $Z_G = \min_i \max_n p_n \cdot \mathcal{E}'_{чин}$,

где p_n - вероятности внешних состояний F_n , ($n = 1, 2, \dots, N$), $\sum_{n=1}^N p_n = 1$.

G-критерий некоторым образом обобщает ММ-критерий, а в случае равномерного распределения p_n ($p_n=1/N$, $n=\overline{1,N}$) они становятся идентичными.

Условия применимости G-критерия таковы:

- вероятности появления состояний F_n известны;
- допускается некоторый риск;
- решение может реализовываться как малое, так и большое число раз.

Если функция распределения известна с малой надежностью и числа реализаций малы, то при использовании G-критерия, вообще говоря, имеется неоправданно большой риск.

Поскольку вероятности внешних состояний системы неизвестны, то предположим, что они равновероятны ($p_1=p_2=p_3=p_4=p_5=p_6=1/6$).

Необходимо сформировать матрицу остатков, в которой все элементы были бы отрицательными. Для этого из всех элементов матрицы частных критериев необходимо вычесть число несколько большее, чем её максимальный элемент (таблица 4.9).

В примере из всех элементов вычтено 529,592.

Согласно критерию Гермейера в качестве оптимального будет рекомендовано решение удлинить приемо-отправочные пути (Удл. $l_{по}$).

Таким образом, по критериям Байеса-Лапласа, Сэвиджа, произведений, Ходжа-Лемана, Гурвица и Гермейера в качестве оптимального решения следует рекомендовать при реконструкции железной дороги под скоростное движение пассажирских поездов усилить её мощность за счет удлинения приемо-отправочных путей, что позволяет увеличить весовую норму и уменьшить потребное количество грузовых поездов.

Таблица 4.9 – Принятие решений по критерию Гермейера по матрице остатков

Проектные решения i	Расчетные условия n						Z_{HL}	Рекомендуемое решение
	$n_{пс}=10п.п.$ $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=20п.п.$ $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=30п.п.$ $e_{п-ч}=6,6$ бел.руб.	$n_{пс}=10п.п.$ $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=20п.п.$ $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.	$n_{пс}=30п.п.$ $e_{п-ч}=13,2$ бел.руб.		
	1	2	3	4	5	6		
Удл. $l_{по}$	-260,258	-180,942	-46,64	-254,378	-151,182	-2	-148,028	Удл. $l_{по}$
III путь	-248,61	-149,256	-52,094	-233,73	-119,496	-7,454	-136,376	
III путь+ удл. $l_{по}$	-240,218	-5,332	-54,656	-225,338	-95,562	-10,016	-105,396	

По критерию Вальда в качестве оптимального решения надо рекомендовать строительство третьего главного пути с удлинением приемо-отправочных путей. При этом возрастет возможная пропускная способность линии и сократится потребное число грузовых поездов.

4.3.2 Определение интегрального вероятностного критерия

Для выбора оптимального решения с использованием интегрального вероятностного критерия (ИВК) в условиях неопределенности была сформирована матрица экономического риска (п. 4.2, таблица 4.2).

В соответствии алгоритмом (блок 2, см. рисунок 3.3) определены угловые коэффициенты k_i и начальные ординаты b_i для всех принятых РУ. Значения приведены в таблицах 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10 – Значения угловых коэффициентов k_i

Проектные решения i	Расчетные условия n					
	$n=10$ п.п./сут.		$n=20$ п.п./сут.		$n=30$ п.п./сут.	
	$e_{\text{пасс-ч}}=6,6$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=13,2$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=6,6$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=13,2$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=6,6$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=13,2$ бел.руб.
	1	2	3	4	5	6
Удл. $l_{\text{по}}$	-3,206	-3,206	6,412	-3,206	-3,206	6,412
III путь	-4,380	19,664	-15,284	-4,380	19,664	-15,284
III путь + удл. $l_{\text{по}}$	-6,216	36,480	-30,264	-6,216	36,480	-30,264

Таблица 4.11 – Значения начальной ординаты b_i

Проектные решения i	Расчетные условия n					
	$n=10$ п.п./сут.		$n=20$ п.п./сут.		$n=30$ п.п./сут.	
	$e_{\text{пасс-ч}}=6,6$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=13,2$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=6,6$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=13,2$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=6,6$ бел.руб.	$e_{\text{пасс-ч}}=13,2$ бел.руб.
	1	2	3	4	5	6
Удл. $l_{\text{по}}$	3,206	3,206	1,604	3,206	3,206	1,604
III путь	16,028	12,022	17,846	12,022	12,022	17,846
III путь + удл. $l_{\text{по}}$	26,256	19,140	30,264	19,140	19,140	30,264

На следующем этапе (блоки 3 и 4, см. рисунок 3.3) сделан анализ коэффициентов и значений общего критерия при $p_n=0$ и $p_n=1$. Установлено, что в расчетных условиях № 1, № 2, № 4 и № 5 во всем диапазоне изменения вероятности от 0 до 1 оптимален вариант усиления линии за счет увеличения весовой нормы грузового поезда (удл. $l_{\text{по}}$).

Координаты точек пересечения графиков $M_{in}(p_n)$ для оставшихся расчетных условий № 3 и № 6 (блок 5, см. рисунок 3.3) определены с использованием способа Крамера.

Результаты расчета координат точек пересечения приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Координаты точек пересечения зависимостей $M_{in}(p_n)$

Проектные решения i	III путь	Удлинение $l_{\text{по}}$	III путь + Удлинение $l_{\text{по}}$
Расчетное условие № 1			
Удлинение $l_{\text{по}}$	Удлинение $l_{\text{по}}$ оптимально при $p_n=0..1$		
III путь			
III путь + Удлинение $l_{\text{по}}$			
Расчетное условие № 2			
Удлинение $l_{\text{по}}$	Удлинение $l_{\text{по}}$ оптимально при $p_n=0..1$		
III путь			
III путь + Удлинение $l_{\text{по}}$			

Проектные решения i	III путь	Удлинение $l_{по}$	III путь + Удлинение $l_{по}$
Расчетное условие № 3			
Удлинение $l_{по}$	(0,75; 3,20)	-	-
III путь	-	-	(0,83; 2,59)
III путь + Удлинение $l_{по}$	(0,78; 3,31)	-	-
Расчетное условие № 4			
Удлинение $l_{по}$	Удлинение $l_{по}$ оптимально при $p_n=0..1$		
III путь			
III путь + Удлинение $l_{по}$			
Расчетное условие № 5			
Удлинение $l_{по}$	Удлинение $l_{по}$ оптимально при $p_n=0..1$		
III путь			
III путь + Удлинение $l_{по}$			
Расчетное условие № 6			
Удлинение $l_{по}$	(0,75; 3,20)	-	-
Проектные решения i	III путь	Удлинение $l_{по}$	III путь + Удлинение $l_{по}$
III путь	-	-	(0,83; 2,59)
III путь + Удлинение $l_{по}$	(0,78; 3,31)	-	-

В таблице 4.13 показаны интервалы вероятности оптимальных решений для всех вариантов расчетных условий (блок 6, см. рисунок 3.2).

Таблица 4.13 – Интервалы вероятности оптимальных решений

Проектные решения i	Расчетные условия n					
	1	2	3	4	5	6
Удлинение $l_{по}$	0...1,00	0...1,00	0...0,75	0...1,00	0...1,00	0...0,75
III путь	-	-	0,75...0,83	-	-	0,75...0,83
III путь с удлинением $l_{по}$	-	-	0,83...1,00	-	-	0,83...1,00

На заключительном этапе (блок 7, см. рисунок 3.2) для окончательного определения оптимального решения выполнен расчет показателей интегрального вероятностного критерия для каждого из вариантов намеченных технических параметров реконструкции с целью усиления мощности линии (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Расчет интегрального вероятностного критерия

Проектные решения i	Расчетные условия n						
	1	2	3	4	5	6	α
Удлинение $l_{по}$	1,0	1,0	0,75	1,0	1,0	0,75	0,91
III путь	0	0	0,08	0	0	0,08	0,03
III путь с удлинением $l_{по}$	0	0	0,17	0	0	0,17	0,06

Интегральный вероятностный критерий определяется по формуле (4.7). Значение ИВК дает представление о вероятности, при которой данное решение будет

оптимальным. Соответственно, чем больше значение ИВК для данного решения, тем более вероятно, что это решение будет оптимальным.

На рисунке 4.6 интервалы вероятностей при всех рассматриваемых расчетных условиях приведены в виде гистограммы.

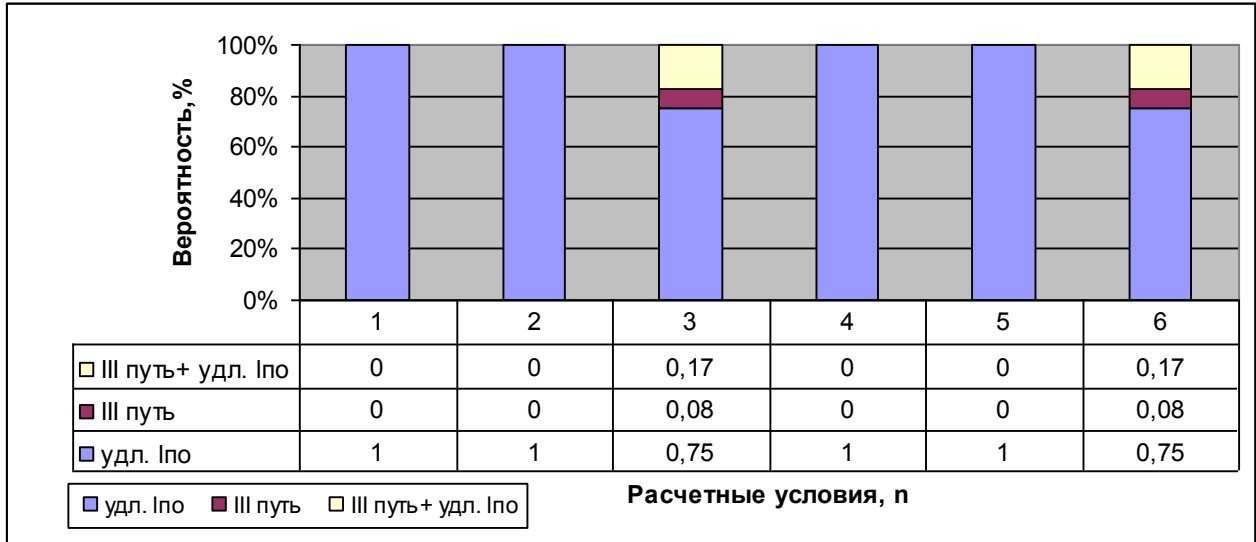


Рисунок 4.6 – Графическое представление интервалов вероятностей оптимальных решений

На рисунке 4.7 дано графическое представление ИВК. Из приведенного рисунка видно, что с вероятностью 91% для всех принятых расчетных условий за оптимальный следует принимать вариант решения по удлинению приемо-отправочных путей, т.к. для данного решения значение $\alpha = \max \alpha$. Преимущество данного варианта очевидно.

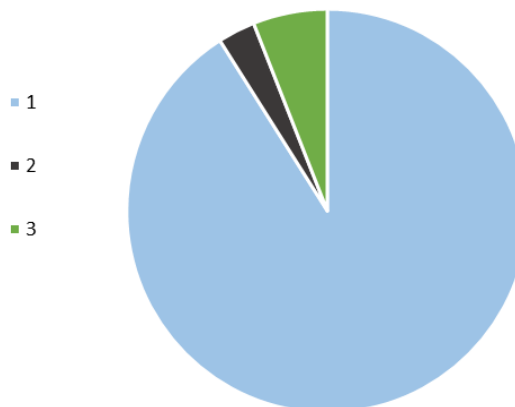


Рисунок 4.7 – Графическое представление ИВК:

- 1 – удлинение приемо-отправочных путей; 2 – строительство III пути;
3 – одновременное удлинение приемо-отправочных и строительство III пути

Значение вероятностей остальных решений зоны неопределенности составляют 3% и 6% для решений III путь и III путь с удлинением приемо-отправочных путей соответственно. Следовательно, ЛПР может с большей уверенностью принять решение о удлинении приемо-отправочных путей в качестве окончательного варианта реконструкции существующей линии.

Выбор решения в случае анализа вероятностей реализации не отдельных расчетных условий, а значений факторов неопределенности производится аналогично. Различны лишь подходы к формированию векторов граничных вероятностей.

Полученные результаты расчетов дают основание для принятия в качестве оптимального решения – удлинение $l_{по}$.

Дополнительно была выполнена проверка устойчивости принятого решения при изменениях расчетной стоимости реконструкции линии, которая может быть, как занижена, так и завышена.

Если стоимость реконструкции занижена, то обоснованность принятого решения (с самой низкой строительной стоимостью) возрастет.

Если стоимость реконструкции в расчете завышена, то возрастет предпочтительность решения(й) с более высокой строительной стоимостью.

Была определена минимальная стоимость реконструкции, при которой наиболее капиталоемкие варианты в самых благоприятных для них условиях (максимальные размеры движения и стоимость пассажира-часа) сравниваются по величине критерия с принятым.

Это произойдет при снижении стоимости реконструкции более, чем в 5 раз, что практически невероятно, и подтверждает обоснованность принятого решения.

4.4 Выводы по главе 4

Рассмотрен пример использования методики обоснования технических параметров реконструкции линии для перехода к скоростному движению пассажир-

ских поездов при смешанных грузовых и пассажирских перевозках с учетом неопределенности исходной информации. Для примера взят участок железнодорожной линии, расположенный во втором транспортном коридоре, проходящем по территории Республики Беларусь.

В качестве факторов неопределенности внешних условий приняты размеры пассажирских перевозок и величина стоимости пассажира-часа.

В результате анализа наличной и потребной провозных способностей назначены три варианта увеличения мощности дороги после ввода скоростного движения пассажирских поездов:

- удлинения приемо-отправочных путей для увеличения весовой нормы грузовых поездов и сокращения их потребного количества;
- строительство III главного пути с переносом на него части грузового движения;
- оба мероприятия совместно.

По предложенной методике определены приведенные затраты для вариантов проектных решений при всех возможных расчетных условиях. С использованием этих затрат сформированы матрица частных критериев и матрица рисков.

Выполнено сравнение вариантов проектных решений по классическим критериям и интегральному вероятностному критерию.

При использовании классических критериев, имеющих в своей основе элемент субъективизма, получены противоречивые результаты.

При интегральном вероятностном критерии рекомендация однозначна и сопровождается количественной оценкой, что облегчает задачу ЛПР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате исследования получены аналитические зависимости для определения радиусов кривых в условиях смешанного грузового и пассажирского движения при различных типах подвижного состава, предложен алгоритм определения рекомендуемого радиуса и возвышения наружного рельса с учетом индивидуальных условий эксплуатации каждой кривой.

2. Разработана методика технико-экономической оценки увеличения норматива непогашенного ускорения на Белорусской железной дороге, которая реализована на направлении II транспортного коридора Красное – Минск – Брест Белорусской железной дороги при $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$.

Выполнено сравнение обычного подвижного состава при $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$ и подвижного состава с наклоном кузова. По данным расчетов более эффективным для Белорусской железной дороги следует считать использование обычного подвижного состава при увеличении нормативного значения непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$.

3. Предложены две новые методики расчета стоимости пассажиро-часов:

- на основании сравнения скоростных и пассажирских поездов, курсирующих на реконструируемом направлении;

- на базе затрат на реконструкцию, подвижной состав и эксплуатацию скоростной линии, обуславливающих увеличение скоростей движения, установленных в проекте.

4. Выполнена адаптация и развитие методики выбора решений в проектах железных дорог с учетом частичной неопределенности к условиям задачи по реконструкции линии для скоростного движения, в том числе: уточнение структуры частного критерия, анализ факторов неопределенности при проектах реконструкции железных дорог для скоростного движения, формализация задачи по определению граничных значений вероятности эффективности проектных решений.

5. Выполнена апробация методики обоснования параметров реконструкции с учетом частичной неопределенности на примере Белорусской железной дороги. Проведенный анализ показал, что наиболее эффективным мероприятием повышение скоростей на участках Минск – Негорелое (направление Минск-Брест), Коханово – Орша (участка Красное-Минск) является удлинение приемо-отправочных путей.

6. Перспективой дальнейшей разработки данной темы может быть разработка методологических подходов к повышению скоростей движения поездов, а также, дальнейшие разработки с точки зрения совершенствования конструкции верхнего строения пути и ходовых частей подвижного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахраменко, Г. В. Проектирование реконструкции плана железных дорог : учеб.-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию / Г. В. Ахраменко. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 34 с.
2. Ахраменко, Г. В. Введение скоростных пассажирских поездов на основных направлениях Белорусской железной дороги «Пути технического перевооружения и модернизации железнодорожного транспорта: Тез. докл. 4 научно-техническая конференция кафедр БелГУТа и Дор НТО Белорусской ж.д. / БелГУТ. – 1989. – С.40 – 41.
3. Аймурзаева, Ж. К. Определение параметров кривой по не совмещению отвода и переходных кривых / Ж. К. Аймурзаева, С. К. Турахан // Мат-лы ХLI междунар. научно-практ. конф. КазАТК им. М. Тынышпаева, Алматы, 2017. – С. 450–455.
4. Бещева, Н. И. Местное пассажирское движение на электрифицированных линиях / Н. И. Бещева // Тр. ЦНИИ МПС. – 1965. – № 300. – С. 51-60.
5. Будихин, С. А. Автоматизация процессами управления рисками промышленных предприятий : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Будихин Сергей Анатольевич. – М., 2008. – 121 с.
6. Веденисов, Б. Н. О переходных кривых при больших скоростях движения /Б. Н. Веденисов. – Тр. МИИТа. – 1936. – № 47. – С. 56.
7. Вербило, В. А. Проектирование новых и реконструкция существующих железных и автомобильных дорог: учеб. – метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию/ В. А. Вербило, Н. В. Довгелюк. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 23с.
8. Вербило, В. А. Проектирование продольного профиля при реконструкции железных дорог: учебно-методическое пособие по курсовому и дипломно му проектированию. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 20 с.

9. Вишняков, Я. Д. Общая теория рисков / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. – 2-е изд., испр. – М. : «Академия», 2008. – 368 с.
10. Воздействие на путь вагонов электропоезда "Аллегро" (Pendolino SM6), оборудованных системой активного принудительного наклона кузова в кривых / А. М. Бржезовский [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 5. – С. 16-23.
11. Волков, Б. А. Экономические изыскания и основы проектирования железных дорог / Б. А. Волков, И. В. Турбин, Е. С. Свинцов, Н. С. Лобанова; под общ. ред. Б. А. Волкова. – М.: Маршрут, 2005. – 408 с.
12. Высокоскоростные железнодорожные сообщения – достижения и проблемы // Железные дороги мира. – 2001. – №2. – С. 5 – 9.
13. Гавриленков, А. В. Изыскания и проектирование железных дорог / А. В. Гавриленков, Г. С. Переселенков. – М.: Транспорт, 1998. – 56.
14. Где ходят поезда с наклоняющимися при повороте вагонами? [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.transclass.ru/travel/blog/gde-khodyat-poezda-s-naklonyayushchimisya-pri-povorote-vagonami/>.
15. Гибшман, А. Е. Определение экономической эффективности проектных решений на железнодорожном транспорте / А. Е. Гибшман. – М.: Транспорт, 1976. – 222 с.
16. ГОСТ 9238 – 83 Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. – М : Транспорт, 1988. – 43 с.
17. Государственная программа развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016 – 2020 годы [Электронный ресурс]. – 2016. – 33 с. - Режим доступа:
<http://www.government.by/upload/docs/file591cd03b057946c1.PDF>.
18. Грицык, В. И. Дефекты рельсов железнодорожного пути / В. И. Грицык. – М. : УМЦ МПС России, 2005. – 80 с.
19. Довгелюк, Н. В. Изыскания и проектирование железных дорог: учебное пособие для учреждения высшего образования / Н. В. Довгелюк, Г. В. Ахраменко, И. М. Царенкова. – Минск : М-во образования Республики Беларусь, 2013. – 334с.

20. Довгелюк, Н. В. Скоростные железнодорожные магистрали: учебн.-метод. пособие / Н. В. Довгелюк, Т. А. Руденко. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 43 с.
21. Дубровская, Т. А. Выбор параметров реконструкции железных дорог для скоростного движения с учетом неопределенности исходной информации / Т. А. Дубровская // материалы VII междунар. научн.-практ. конф. «Проблемы безопасности на транспорте» – Гомель : БелГУТ, 2015. – С. 241 – 242.
22. Дубровская, Т. А. Определение нормативных радиусов кривых для скоростных железных дорог с учетом условий эксплуатации / Т. А. Дубровская // Материалы VIII междунар. научн.-практ. конф. «Проблемы безопасности на транспорте». – Гомель : БелГУТ, 2017. – С. 24 – 26.
23. Дубровская, Т. А. Оценка стоимости проезда на железнодорожном транспорте при внедрении скоростного движения / Т. А. Дубровская // Тезисы докладов научн.-практ. конф. – Губкин, 2018. – С. 217 – 218.
24. Дубровская, Т. А. Сфера эффективности скоростного пассажирского транспорта на железных дорогах / В.С. Миронов, Т. А. Дубровская // Сб. трудов Девятой междунар. научн.-практ. конф. «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». – Иркутск : ИрГУПС, 2018. – С. 534 – 538.
25. Дубровская, Т.А. Определение стоимость пассажира-часа при введении скоростного движения на существующих линиях / Т. А. Дубровская // «Вестник экономики транспорта и промышленности», г. Харьков, 2018. – № 62 (Спецвыпуск). – С. 180 – 181.
26. Дубровская, Т.А. Особенности повышение скоростей движения поездов на железнодорожных линиях межрегионального сообщения / Г. В. Ахраменко, Т. А. Дубровская // «Сборник научных трудов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта», г. Харьков, 2018. – № 182. – С. 53–62.
27. Дубровская, Т.А. Анализ влияния непогашенного ускорения на скорость движения пассажирских поездов / П. В. Ковтун, Т. А. Дубровская // «Сборник научных трудов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта», г. Харьков, 2018. – № 181. – С. 6–15.

28. Дубровская, Т.А. Повышение скоростей движения на существующих линиях / В.С. Миронов, Т. А Дубровская // Материалы IX междунар. научн.-практ. конф. «Проблемы безопасности на транспорте». – Гомель : БелГУТ, 2018. – С. 43 – 45.

29. Дубровская, Т.А. Выбор подвижного состава при введении скоростного движения на существующих линиях / Т. А. Дубровская // М-лы 78 междунар. научн.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Днепр : ДИИТ, 2018. – С. 35–36.

30. Дубровская, Т. А. Обоснование параметров реконструкции железной дороги для введения скоростного движения с учетом неопределенности исходной информации / Т. А Дубровская // Известия Транссиба. – 2019. – № 1(37). – С. 122–129.

31. Ерофеев, А. А. Проблемы повышения скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях / А. А. Ерофеев, П. В. Ковтун, Т. А. Дубровская // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2018. – № 181. – С. 57–60.

32. Ершков, О. П. Необходимое соотношение скоростей движения грузовых и пассажирских поездов / О. П. Ершков // Железнодорожный транспорт. – 1959. – №12. – С. 53 – 55.

33. Ершков, О. П. Теоретические и экспериментальные исследования особенностей движения экипажей со скоростями до 200 км/ч и требования к содержанию пути / О. П. Ершков, В. Я. Карцев // Железные дороги мира. –1980. – №1. – С. 3 – 13.

34. Железные дороги мира. – 2010. – № 5. – 76 с.

35. Золотарский, А. Ф. Железнодорожный путь и подвижной состав для высоких скоростей движения / А. Ф. Золотарский, С. В. Вершинский, О. П. Ершков и др.; под общ. ред. М. А. Чернышова. – М.: Транспорт, 1964. – 272 с.

36. Изыскания и проектирование железных дорог: учебник для вузов / И. В. Турбин, А. В. Гавриленков, И. И. Кантор и др.; под ред. И. В. Турбина. – М.: Транспорт, 1989. – 479 с.

37. Изыскания и проектирование железных дорог: учебник для вузов / Н. В. Довгелюк, Г. В. Ахраменко, И. М. Царенкова. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 332 с.

38. Ильин, Д. В. Расчет длин переходных кривых на участках обращения пассажирских поездов с полуактивной системой принудительного наклона кузова / Д. В. Ильин // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – №6. – С. 27–29.

39. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог № 128. – М.: ОАО «РЖД», 2010.– 124 с.

40. Инструкция по техническому обслуживанию и эксплуатации сооружений, устройств, подвижного состава и организации движения на участках обращения скоростных пассажирских поездов (ЦРБ-393). – М.: МПС РФ, 1996. – 56 с.

41. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утверждена расп. ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г № 2288р. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.tdesant.ru/info/item/189>.

42. Инфраструктура линии Санкт-Петербург – Москва для высокоскоростного движения поездов. Общие технические требования. СТО РЖД 1.07.001-2007. – М. : ОАО «РЖД», 2007.– 52 с.

43. Иоаннисян, А. И. Улучшение трассы существующих железных дорог / А. И. Иоаннисян. – М.: Транспорт, 1972. – 176 с.

44. Каменский, В. Б. Содержание железнодорожного пути в кривых / В. Б. Каменский, Э. Я. Шац. – М : Транспорт, 1987. – 189 с.

45. Кантор, И.И. Изыскания и проектирование железных дорог / И. И. Кантор. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 288 с.

46. Кантор, И. И., Высокоскоростная магистраль Центр – Юг / И. И. Кантор, В. М. Резник // Транспортное строительство. – 1988. – № 10. – с. 17 – 18.

47. Кантор, И. И. Высокоскоростные железнодорожные магистрали: трасса, подвижной состав, магнитный подвес / И. И. Кантор. – М. : Маршрут, 2004. – 51 с.

48. Карпущенко, Н. И. Параметры колеи и износ рельсов / Н. И. Карпущенко, И. А. Осташко // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – №81. – С. 6 – 7.

49. Карпущенко, Н.И. Возвышение наружного рельса и допускаемые скорости движения поездов в кривых / Н.И. Карпущенко // Сб. научн. трудов «Проблемы повышения скоростей движения поездов на Транссибирской магистрали». – Новосибирск, 1999. – С. 7–15.

50. Киселёв, И. П. Развитие высокоскоростного железнодорожного движения в России и СССР (середина XIX – XX век) : автореф. дис. ... докт. истор. наук : 07.00.10 / Киселёв Игорь Павлович. – С.-Пб., 2011. – 44 с.

51. Козлов, В. Ю. План трассы и новый тип подвижного состава для высоких скоростей движения / В. Ю. Козлов // Сб. научн. трудов МИИТа. – 1976. – Вып. 538. – С. 80 – 86.

52. Козловский, С. А. Совершенствование методов экономической оценки эффективности применения специализированных грузовых вагонов : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Козловский Станислав Александрович. – М., 2003. – 137 с.

53. Колодяжный, Н.В. Высокоскоростное пассажирское движение на железных дорогах / Н.В. Колодяжный. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.

54. Копыленко, В. А. Техничко-экономическая модель задачи оптимального переустройства эксплуатируемой линии для повышения скорости поездов / В. А. Копыленко // Сб. научн. Тр. МИИТа. – 1986. – Вып. 771. – С. 50 – 66.

55. Корженевич, И. П. Изменение возвышения наружного рельса вдоль кривой / И. П. Корженевич, С. А. Лыкова, А. А. Мамитко, // Сб. научн. трудов Днепрпетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2010. – №34. – С. 81 – 87.

56. Корженевич, И. П. Оценка основных параметров железнодорожных кривых при установлении их максимальных скоростей / И. П. Корженевич, Д. Н. Курган, Н. Б. Курган, Н. Г. Ренгач // Сб. научн. Тр. «Строительство». – 2002. – №10. – С. 28 – 34.

57. Кочнев, П. Ф. Комплексное повышение скоростей движения поездов / П. Ф. Кочнев. – М. : Транспорт, 1989. – 176 с.

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

59. Кочнев, Ф. П. Повышение скорости движения пассажирских поездов / Ф.П. Кочнев. – М. : Транспорт, 1970. – 272 с.

60. Курган, Д.Н. Методология расчетов железнодорожной колеи при взаимодействии со скоростным подвижным составом: автореф. дис. ... д.т.н.: 05.22.06 / Курган Дмитрий Николаевич. – Днепропетровск, 2017. – 35 с.
61. Курган, Н.Б. Определение объемов работ для снятия ограничений скорости, связанных с планом линии / Н.Б. Курган, Н.П. Хмелевская, С.Ю. Байдак // Сб. науч. тр. Дальневосточного гос. ун-та путей сообщения. – Хабаровск: из-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 52–62.
62. Марков, Ю. Н. Возвышение и износ рельсов / Ю. Н. Марков// Путь и путевое хозяйство. – 2000. – №1. – С. 31 – 32.
63. Масьянова, И. Т. Зарубежный опыт повышения скоростей пассажирских поездов на примере Японии / И. Т. Масьянова // «Технические науки – от теории к практике»: материалы XVII международной заочной научно-практической конференции. Часть I. Новосибирск: «СибАК», 2013. – с. 138 – 140.
64. Матвеев, В. И. Анализ надежности работы железнодорожного пути : учеб.-метод. пособие / В. И. Матвеев, А. А. Кебилов, Н. Е. Мирошников. - Гомель : БелГУТ, 2013. – 56 с.
65. Мелентьев, Л. П. Взаимодействие колес с рельсами и их износ / Л. П. Мелентьев // Путь и путевое хозяйство. – 1999. – №5. – С. 6 – 13.
66. Менар, Клод Экономика организаций / Клод Менар. – М.: Инфра-М, 2006 г. – 63 с.
67. Методика определения возвышения наружного рельса в кривых участках пути // Путь и путевое хоз-во. – 1997. – № 6. – С. 16 – 19.
68. Методика определения возвышения наружного рельса в кривых. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://helpiks.org/7-34668.html>.
69. Миронов, В. С. Вопросы проектирования высокоскоростных линий : дис. ... канд. техн. наук 05.22.06 / Миронов Виктор Степанович. – М., 1972 г. – 209 с.
70. Миронов, В. С. Оценка вариантов проектных решений при выборе начальных технических параметров линии в условиях неопределенности / В. С. Миронов // Тр. МИИТа. – 1982. – № 715. – С. 107–111.

71. Миронов, В. С. Поддержка принятия решений по выбору технических параметров железных дорог в условиях неопределенности / В. С. Миронов, К. Ю. Ворончихин // Сб. научн. тр. «Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона». – 2004. – С. 38 – 50

72. Миронов, В. С. Параметры плана скоростной железной дороги с использованием пассажирских вагонов с наклоном кузова / В. С. Миронов, Т. А. Руденко // Тезисы докладов научн.-метод. конф. «Путь XXI века». – С-Пб. : ПГУПС, 2013. – С. 35 – 36.

73. Миронов, В. С. Анализ эффективности скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь / В. С. Миронов, Т. А. Руденко // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: материалы III междунар. научн.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2013. – С. 300 – 302.

74. Миронов, В. С. Оценка вариантов проектных решений при выборе начальных технических параметров линии в условиях неопределенности / В. С. Миронов // Межвуз. сб. научн. трудов «Технико-экономическая эффективность проектных решений железных дорог». – М. 1982. – № 715. – С. 107 – 111.

75. Миронов, В. С. Поддержка принятия решения по выбору технических параметров железных дорог в условиях неопределенности / В. С. Миронов, К. Ю. Ворончихин // Межвуз. сб. научн. трудов «Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона» – Хабаровск : ДВГУПС. – 2004. – С. 75–86.

76. Миронов, В. С. Технико-экономическая эффективность использования вагонов с наклоном кузова в проектах реконструкции железных дорог для скоростного движения поездов / В. С. Миронов, Т. А. Руденко // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 6 (42). – С. 96 – 102.

77. Миронов, В. С. Радиусы круговых кривых для скоростных железных дорог при использовании вагонов с наклоном кузова / В. С. Миронов, Т. А. Руденко // Вестник Транспорта Поволжья. 2014. – №3(45). – С. 44–50.

78. Морозов, А.А. Оценка эффективности управления инвестиционно-строительными проектами с использованием метода нейросетевой оптимизации :

дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Морозов Александр Алексеевич. – М., 2010. – 156 с.

79. Оценка основных параметров железнодорожных кривых при установлении их максимальных скоростей / И. П. Корженевич, Д. Н. Курган и др. // Строительство. – 2002. – № 10. – С. 28 – 34.

80. Певзнер, В. О. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения / В. О. Певзнер, Ю. С. Ромен // Сб. тр. ученых ОАО "ВНИИЖТ. – М. : Интекст, 2013. – С. 210–222.

81. Певзнер, В. О. Научные основы моделирования взаимодействия пути и подвижного состава в современных условиях эксплуатации / М. М. Железнов, В. О. Певзнер, В. П. Соловьев, С. С. Надежин // Бюллетень Объединенного ученого Совета ОАО «РЖД». – М. : ООО «Аполлон принт». – 2014. – № 4. – С. 21 – 30.

82. Певзнер, В. О. Состояние железнодорожного пути и установление скоростей движения: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.06 / Певзнер Виктор Ошеревич. – М., 1991 г. – 331 с.

83. Певзнер, В. О. Устройство пути в кривых: возвышение и отводы / В. О. Певзнер, В.Я. Карцев // Вестник СГУПС. – 1997. – № 13. – С. 10–13.

84. Певзнер, В. О. Научные основы системы управления состоянием пути / В. О. Певзнер. – М. : РАС, 2018. – 269 с.

85. Переселенков, Г. С. Высокоскоростные железные дороги и надежность пассажирских перевозок / Г. С. Переселенков // Развитие системы пассажирских сообщений. – 1984. – С. 135 – 148.

86. Расчет допускаемых скоростей движения поездов по данным о фактическом состоянии пути / Н. И. Карпущенко [и др.]; под ред. Н. И. Карпущенко. – Новосибирск : СибГУПС, 2006. – 74 с.

87. Романов, А. В. К вопросу о взаимодействии пути и подвижного состава при высокоскоростном движении поездов / А. В. Романов, Е. И. Шехтман // Бюллетень результатов научных исследований. – С.- Петербург : ПГУПС, 2015, С. 48–53.

88. Руденко, Т. А. Реконструкция плана железных дорог : пособ. по курс. и дипл. проектир. / Т. А. Руденко, В. С. Миронов. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 25 с.

89. Руденко, Т. А. Определение величины дополнительного угла наклона поездов с наклоняемыми кузовами при недостаточном возвышении наружного рельса в кривой для обеспечения уровня безопасности пассажиров / Т.А Руденко // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VI междунар. научн.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2012. – С. 144.

90. Руденко, Т. А. Оценка эффективности внедрения скоростного движения в Республике Беларусь / Т. А Руденко // Неделя науки-2013 «Наука МИИТа – транспорту»: тр. научно-практ. конф. – М.: МИИТ, 2013. – С. II-14 – II-15.

91. Руденко, Т.А. Анализ эффективности скоростного движения пассажирских поездов в Республике Беларусь / Т.А Руденко, В.С. Миронов // материалы III междунар. научн.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса». – Гомель : БелГУТ, 2013. – С. 300 – 302.

92. Руденко, Т. А. Применение экипажей с наклоном кузова для скоростного движения / Т. А Руденко // Железнодорожный транспорт: современные проблемы науки: сборник тезисов XLI научн.-практ. конф. Молодых ученых, аспирантов и студентов – Киев : ДЕТУТ, 2012. – Ч. 1. – С. 76 – 78.

93. Руденко, Т. А. Аспекты безопасности при вписывании подвижного состава с наклоном кузова в габаритные ограничения в пределах кривых / Т. А Руденко, С. В. Калягин // М-лы VI междунар. научн.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології». – Киев : ДЕТУТ, 2013. – Серія «Техніка, технології» – С. 128 – 129.

94. Свинцов, Е. С. Методика оценки экономической эффективности проектных решений / Е. С. Свинцов, А. В. Романов, Е. Г. Алексеева // Сб. докладов 58-й научно-технической конференции – СПб. : ПГУПС, 1998. – С. 21-22.

95. Свинцов, Е. С. Оптимизация технического состояния в полигоне параллельных ходов на примере скоростного направления Санкт-Петербург - Выборг – Бусловская / Е. С. Свинцов, А. В. Романов, А. П. Конюхов // В сб. трудов «Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона» – Хабаровск: ДВГУПС. – 2004. – С. 22-24.

96. Свинцов, Е. С. Определение параметров специальных высокоскоростных линий / Е. С. Свинцов, А. В. Федоров // Тр. МИИТ.–1979. – № 644. – С. 42–45.
97. Система наклона кузовов вагонов поезда Talgo Pendular // Железные дороги мира. – 2005. – №4. – С. 39 – 41.
98. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. В прошлом, настоящем и будущем. Т. 1 / В. И. Ковалев [и др.] ; под ред. В. И. Ковалева. – СПб. : Питер, 2001. – 320 с.
99. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. Т. 2 / В. И. Ковалев [и др.] ; под ред. В. И. Ковалева. – СПб. : Питер, 2003. – 448 с.
100. Смелянский И.В. Совершенствование нормативов непогашенного ускорения и его приращения для современного подвижного состава при скоростном движении: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.22.06 / Смелянский Игорь Владимирович. – М., 2008. – 208 с.
101. Совершенствование методов определения эффективности капитальных вложений на транспорте / под ред. В. Н. Лившица. – М.: Транспорт, 1978. – 264 с.
102. Специальные технические условия для проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростной пассажирской железнодорожной магистрали «Москва – Санкт-Петербург» . – М. : ОАО «РЖД», 2009. – 52 с.
103. СНБ 3.03.01–98. Железные дороги колеи 1520 мм. – Мн.: Минстройархитектуры, 1998. – 30 с.
104. СП 119.13330.2017. Железные дороги колеи 1520 мм. – М. : ОАО «ЦНИИС», 2018. – 35 с.
105. СТП БЧ 56.388-2018. Положение о системе ведения путевого хозяйства Белорусской железной дороги. – Мн, 2018. – 28 с.
106. Терёшина, Н. П. Экономика железнодорожного транспорта / Н. П. Терёшина, В. Г. Галабурда, М. Ф. Трихунков. – М. : УМЦ ЖДТ, 2006. – 150 с.
107. Типовая методика для проведения работ по повышению скоростей движения современного скоростного подвижного состава по существующему пути. – М.: ОАО «РЖД», 2013. – 86 с.

108. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: [утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 № 1734-р в редакции распоряжения Правительства Российской Федерации от 11.06.2014 г. № 1032-р] [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.rador.ru/news/strategy2030.pdf>.

109. Укрупненные нормативы цены в строительстве. НЦС 81-02-07-2017. Сборник № 07. Железные дороги. – М. – 2017. – 53 с.

110. Умаров, Х.К. Методы определения и оценки рисков при принятии решений в инвестиционных проектах сооружения транспортных объектов / Свинцов Е. С., Меркушева В. С., Шехмаматьев Ш. Р. Умаров Х. К., Бедане Зелалам Асему // М-лы междунар. научн. – практ. конф. «Проблемы разработки национальных железнодорожных стандартов Республики Эфиопия». – СПб. : ПГУПС. – 2014 г. – С. 154-163.

111. Федосеева, Т. В. Автоматизация принятия решений по управлению предприятиями промышленности и транспортного комплекса на основе анализа рисков: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Федосеева Татьяна Вячеславовна. – М., 2006. – 152 с.

112. Черномордик, Г. И. Повышение скоростей движения поездов / Г. И. Черномордик. – М. : Транспорт, 1964. – 202 с.

113. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1969. – 536 с.

114. Шахунянц, Г. М. Особенности устройства железнодорожного пути при существующих скоростях и сверхскоростном транспорте / Г. М. Шахунянц // Труды МИИТа. – М.: Трансжелдориздат, 1936. – Вып. 47. – 56 с.

115. Шварцфельд, В. С. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог на основе геоинформационных технологий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.06 / Шварцфельд Вячеслав Семенович. – Хабаровск, 2001. – 400 с.

116. Шкурников, С. В. Повышение скоростей движения поездов на основе модернизации постоянных устройств однопутных железных дорог : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.03 / Шкурников Сергей Васильевич. – Л., 1990. – 26 с.

117. Шкурников, С. В. К вопросу о взаимодействии подвижного состава и геометрических параметров трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей / С. В. Шкурников, О. С. Морозова // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 3. – С. 96–104.

118. Шкурников, С. В. Опыт совмещенного высокоскоростного пассажирского и грузового движения в странах Европейского союза / С. В. Шкурников, О. С. Морозова // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 32–40.

119. Целиков, В. В. Факторы, оказывающие влияние на безопасность движения на железнодорожном транспорте и рекомендации по их предупреждению / В. В. Целиков, Ш. К. Курманова, А. Жанузаков // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2014. - № 2(87). – С. 48–54.

120. Эффект ускорения [Электронный ресурс] : газета «Гудок». АО «Издательский дом «Гудок». – 2012. – режим доступа к газете:
<http://www.gudok.ru/newspaper/?archive=2012.05.15> .

121. Яковлева, Т. Г. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов, Н. Н. Путря, М. П. Смирнов. – М. : Транспорт, 1999. – 405 с.

122. Leaflet 513. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. Traction and Rilling Stock Committee. Paris. 1994.

123. McGinty J. Craven Will New Train Guidelines Improve Speeds? Not So Fast [Электронный ресурс]/ Jo Craven McGinty // The Wall Street Journal, 2019.. - Режим доступа: <https://www.wsj.com/articles/will-new-train-guidelines-improve-speeds-not-so-fast-11547209980>.

124. Nunno R. Fact Sheet: High Speed Rail Development Worldwide [Электронный ресурс]/ Richard Nunno // Environmental and Energy Study Institute. – USA, 2018. – Режим доступа:

https://www.eesi.org/files/FactSheet_High_Speed_Rail_Worldwide.pdf.

125. Rodrigue J.-P. High Speed Rail Systems [Электронный ресурс] / Jean-Paul Rodrigue // The Geography of Transport Systems, 2017 - Режим доступа: https://transportgeography.org/?page_id=7457.

126. Sirong, Yi Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment : Theory and Practice [Text] / Yi Sirong // Technology & Engineering. – Elsevier Science, 2017. – 324 p.

127. Sogin S. Simulating the effects of higher speed passenger trains in single track freight networks / Samuel Sogin, Christopher P.L. Barkan, Mohd Rapik Saat // Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, pp. 3684- 3992.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Стоимость переустройства участка Красное– Минск–Брест Белорусской железной дороги

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{нп}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{нп}=0,9$ м/с ²)	$R_{рек}$, м	Площадь между R_c и $R_{рек}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки землянона*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{рек}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
912976	913335	70	20	1050	125	135	1300	2069,67	62100	85	17095	79195	••
921252	921883	40	17	2120	160	175	2400	2742,72	90500	83	16668	107168	
935525	936779	75	33	2160	180	195	2300	9777,98	391120	81	16256	407376	
937765	938000	40	4	3400	160	225	3700	60,39	2100	21	4147	6247	•
941326	941697	110	25	835	115	130	1000	2076,14	64360	73	14662	79022	••
942323	942572	55	8	1800	155	170	2100	265,14	9960	42	8300	18260	•
943102	943378	75	17	950	120	130	1100	666,39	21720	44	8716	30436	
943892	944331	100	42	600	100	105	700	4154	130440	73	14633	145073	••
947146	947408	40	8	2000	155	170	2300	292,34	11160	39	7860	19020	•
950845	951311	55	13	2060	165	185	2400	1472,24	44160	77	15383	59543	••
955296	955519	70	9	1400	140	155	1700	300,01	10260	48	9557	19817	•
956672	956930	70	21	705	100	110	900	1275,56	39540	71	14272	53812	••
960421	960764	50	10	1896	155	170	2200	550,84	20820	55	10999	31819	•
961085	961534	30	12	2164	155	175	2600	1586,72	55860	90	18093	73953	
970550	971340	100	42	1074	135	145	1300	17144	565760	166	33248	599008	••
971860	973249	65	53	1490	145	160	1800	64452,1	2449180	289	57797	2506977	
974487	975423	70	36	1480	145	160	1800	21271,9	850880	202	40476	891356	
979190	979586	55	32	710	95	105	800	1942,42	61000	50	10039	71039	

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{\text{нп}}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{\text{нп}}=0,9$ м/с ²)	$R_{\text{рек}}$, м	Площадь между R_c и $R_{\text{рек}}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки землоотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{\text{рек}}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
979786	980030	85	23	610	95	105	700	630,45	23320	36	7200	30520	•
980988	981416	65	23	1070	125	135	1300	2914,82	104360	92	18400	122760	••
986578	987595	55	27	2120	170	185	2400	10914,8	366740	134	26864	393604	•
999524	1000003	55	14	2030	165	180	2300	1417,07	51020	64	12742	63762	••
1013555	1014325	50	21	2060	160	180	2400	6180,24	242260	127	25417	267677	
1037544	1038650	35	30	2140	160	175	2400	13928	481900	134	26875	508775	
1055437	1056021	50	16	2130	165	180	2400	2210,95	73400	74	14806	88206	
1065573	1065969	60	12	1970	165	180	2300	1076,42	39620	66	13267	52887	•
999524	1000003	55	14	2030	165	180	2300	1417,07	51020	64	12742	63762	••
1013555	1014325	50	21	2060	160	180	2400	6180,24	242260	127	25417	267677	
1037544	1038650	35	30	2140	160	175	2400	13928	481900	134	26875	508775	
1055437	1056021	50	16	2130	165	180	2400	2210,95	73400	74	14806	88206	
1065573	1065969	60	12	1970	165	180	2300	1076,42	39620	66	13267	52887	•
739853	740364	130	49	600	105	115	700	6532,61	195980	85	17033	213013	••
741499	741717	90	19	645	95	105	700	223,57	7380	19	3718	11098	•
744495	744738	100	17	830	115	125	900	262,44	10500	20	4099	14599	••
745190	745932	85	69	616	95	105	700	14962	520680	101	20236	540916	
746270	746586	90	36	505	85	95	600	2127,49	65960	59	11889	77849	
746644	746923	90	39	415	80	85	500	1997,18	75100	57	11429	86529	
747171	747273	30	3	1800	145	155	2100	14	460	17	3400	3860	•

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{нп}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{нп}=0,9$ м/с ²)	$R_{рек}$, м	Площадь между R_c и $R_{рек}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{рек}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
747403	747726	85	46	400	80	85	500	3758,03	118000	81	16150	134150	••
747831	747939	40	10	600	85	90	700	57,51	2200	18	3600	5800	•
749372	749940	40	36	915	100	115	1100	7554,89	226640	115	22968	249608	••
750247	750337	20	4	1420	120	135	1800	34,69	1180	24	4817	5997	•
750479	750596	25	8	820	95	105	1000	74,24	2300	26	5137	7437	
750600	750673	20	3	1200	110	125	1500	9,69	360	18	3650	4010	
751052	751177	60	27	265	60	70	400	774,24	27260	64	12736	39996	
751529	751722	40	14	790	95	110	1000	455,63	15040	51	10261	25301	
751871	752213	50	32	615	85	95	700	1597,65	60720	47	9454	70174	••
752252	752590	50	32	615	85	95	700	1597,65	63900	47	9343	73243	
753489	753706	55	11	1180	125	140	1500	504,8	15860	59	11769	27629	•
753740	753989	45	12	1200	125	135	1400	397,23	14700	42	8300	23000	
754422	754584	60	10	900	110	120	1100	176,95	6340	36	7200	13540	
754655	754928	60	16	980	115	125	1200	866,95	29120	61	12257	41377	
755091	755463	70	32	660	100	110	900	5351,32	192640	135	27055	219695	••
755627	756100	85	43	637	95	105	700	2884,63	113080	47	9356	122436	
756292	756923	50	43	845	100	110	1000	9793,67	338860	116	23149	362009	
757392	757926	45	13	2290	175	190	2600	1471,75	48860	72	14458	63318	
760228	760448	60	21	600	90	95	700	529,83	19500	37	7333	26833	•

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{нт}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{нт}=0,9$ м/с ²)	$R_{рек}$, м	Площадь между R_c и $R_{рек}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{рек}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
760448	760579	60	9	800	105	115	1000	116,13	3700	33	6550	10250	
760697	760838	70	11	730	100	110	900	163,11	5780	33	6567	12347	
760838	760974	70	13	600	90	100	700	126,22	4020	23	4533	8553	
760974	761127	70	13	660	100	110	900	363,5	11920	56	11127	23047	
761168	761793	105	56	645	100	110	700	5486,98	208500	53	10659	219159	••
762335	762846	115	48	609	105	110	700	5635,12	171300	76	15271	186571	
762920	763338	125	37	641	105	115	700	1738,91	62260	38	7695	69955	
763427	763835	110	36	649	100	110	700	1394,32	52420	32	6412	58832	
764061	764238	65	10	990	120	130	1200	203,45	6800	38	7509	14309	•
764270	764511	95	21	655	105	115	800	859,85	25800	53	10670	36470	••
764590	764906	110	29	619	100	115	800	2739,94	105760	92	18480	124240	
765161	765672	100	34	850	115	130	1000	4747,89	189920	90	18035	207955	
766073	766998	90	84	630	95	105	700	21950,9	755100	103	20556	775656	
767852	768019	70	6	1695	155	170	2000	107,79	3280	30	6010	9290	•
768019	768168	90	14	615	95	105	700	135,48	4300	21	4119	8419	
768168	768363	90	15	760	110	125	1000	629,45	23660	62	12316	35976	
770097	770475	80	19	1130	130	140	1300	1248,47	47700	57	11373	59073	
771348	771781	50	22	1110	115	130	1300	2144,31	71200	74	14823	86023	••
772822	773177	100	33	610	100	105	700	1846,3	66840	52	10475	77315	
773833	774161	100	19	990	135	140	1200	1389,95	43640	70	13915	57555	•

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{нп}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{нп}=0,9$ м/с ²)	$R_{рек}$, м	Площадь между R_c и $R_{рек}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{рек}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
774222	774639	90	23	1030	125	135	1200	2027,16	79060	69	13765	92825	••
775192	775356	120	12	790	120	130	900	142,01	4800	23	4567	9367	•
775356	775784	120	39	625	105	110	700	2551,85	80120	51	10272	90392	••
776184	776495	120	29	625	105	110	700	1060,13	36900	37	7464	44364	
795035	795567	90	36	841	110	125	1000	5930,43	192140	101	20116	212256	
795777	796205	80	21	1194	135	145	1400	2177,85	85800	74	14769	100569	
797139	797766	110	56	645	100	110	700	5486,98	172300	53	10693	182993	
798893	799500	75	39	885	115	125	1000	5566,57	219320	79	15775	235095	
799652	799799	70	10	885	115	125	1100	188,79	6200	36	7142	13342	•
799799	800058	70	16	945	115	130	1200	988,74	36580	70	13978	50558	
800058	800294	70	19	720	100	110	900	881,27	30660	59	11800	42460	••
800957	801442	125	44	629	105	115	700	3457,62	109960	55	10949	120909	
801548	802310	60	21	2056	160	185	2400	6247,34	249900	127	25499	275399	
549949	550547	100	39	870	120	130	1000	6242,57	187277	88	17689	204966	••
550775	551256	140	44	620	105	115	700	3869,52	127700	61	12281	139981	
552555	552990	95	25	990	130	140	1200	3153,55	126140	92	18317	144457	
558945	559682	40	29	1480	135	145	1800	11197,1	389660	162	32377	422037	
560722	561048	75	20	945	115	125	1000	376,85	11680	19	3838	15518	•
565083	565477	95	22	1040	130	140	1200	1678,36	63100	61	12281	75381	••
567377	567964	120	53	640	105	110	700	5080,83	165640	55	11095	176735	

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{нпг}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{нпг}=0,9$ м/с ²)	$R_{рек}$, м	Площадь между R_c и $R_{рек}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{рек}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
570533	570869	105	22	870	125	135	1100	2121,83	66620	88	17654	84274	
571337	571967	80	21	1690	160	175	2000	15138,1	578280	114	22713	600993	
574468	574876	125	23	1010	135	145	1100	1285,45	38560	36	7222	45782	
580026	580502	90	22	1240	135	150	1400	1978,07	67640	61	12281	79921	
580938	581719	70	64	700	100	110	900	34914,7	1082360	223	44658	1127018	
582429	583034	100	42	835	115	125	900	3603,59	136220	48	9525	145745	
584092	584820	90	43	980	125	135	1200	16424,7	578140	165	33005	611145	
584951	585764	135	80	585	105	115	700	30401,4	1003240	160	32098	1035338	
586958	587590	150	58	625	110	115	700	8160,81	310120	76	15177	325297	
589735	590282	105	31	1010	130	140	1100	2470,03	98800	49	9734	108534	
590996	591393	75	20	1140	130	140	1300	1375,32	43180	56	11164	54344	
597746	598422	145	63	620	110	115	700	11011,5	407420	88	17584	425004	
599860	600579	120	39	1070	140	150	1200	7577,87	271280	88	17689	288969	
611184	611938	50	21	2060	160	175	2300	4264,71	143300	88	17584	160884	
618086	618393	105	33	530	90	100	600	1238,69	44600	40	8059	52659	••
618393	618793	105	34	675	110	120	800	3154,56	123660	74	14828	138488	
619141	619617	40	13	2050	160	170	2300	1055,82	36540	57	11339	47879	
619976	620337	40	10	2095	160	175	2400	606,48	20140	53	10641	30781	•
624718	625063	100	21	920	120	130	1000	626,01	23040	29	5861	28901	••
625063	625678	100	38	940	120	130	1000	2768,2	88020	40	7955	95975	

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{нп}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{нп}=0,9$ м/с ²)	$R_{рек}$, м	Площадь между R_c и $R_{рек}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{рек}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
625757	626249	135	49	575	105	115	700	8008,73	283500	107	21369	304869	
627439	628285	60	32	1510	140	155	1800	13719,9	436300	162	32377	468677	
628573	629310	130	57	738	115	120	800	7445,73	244220	62	12330	256550	
629355	629897	110	38	810	115	130	1000	8178,57	310780	126	25190	335970	
630320	631170	65	32	1500	145	160	1800	14150,1	430160	167	33493	463653	
633515	634332	50	23	2030	160	175	2300	6251,53	223800	108	21666	245466	
634403	634983	145	47	715	120	125	800	5727,33	215340	70	13938	229278	
636100	636766	140	61	625	105	115	700	9442,17	315360	80	15962	331322	
637063	637677	50	17	2030	160	175	2300	2533,6	76000	80	16014	92014	
647874	648451	110	38	870	125	135	1100	10775,5	415940	152	30493	446433	
649085	649780	80	31	1265	140	150	1500	8451,62	338060	127	25417	363477	
651924	652767	100	79	610	100	105	700	23413,9	805440	124	24806	830246	
652964	653792	120	65	730	110	120	800	12217,8	371420	79	15874	387294	
654469	655017	70	30	1050	120	130	1200	3982,29	126640	79	15700	142340	
665346	665930	140	52	640	105	115	700	4806,33	180720	54	10885	191605	
668142	668768	65	34	1060	125	135	1300	9690,83	370180	142	28469	398649	••
669543	669740	40	10	1110	115	125	1300	202,56	6720	33	6629	13349	•
669817	669961	50	10	840	100	110	1000	130,23	4720	28	5582	10302	
670326	670441	45	8	830	100	110	1000	70,5	2220	24	4745	6965	
670588	670715	60	9	840	105	115	1000	94,96	3700	25	5024	8724	

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{\text{нп}}=0,7 \text{ м/с}^2$)	V_p , км/ч ($a_{\text{нп}}=0,9 \text{ м/с}^2$)	$R_{\text{рек}}$, м	Площадь между R_c и $R_{\text{рек}}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{\text{рек}}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
671131	671270	55	8	1020	115	125	1200	90,55	3060	25	5024	8084	
671428	671825	35	15	1550	135	145	1800	1248,02	39180	65	13083	52263	
671924	672939	65	57	1025	125	130	1200	30403,8	1058060	174	34802	1092862	••
674153	674654	65	33	860	110	125	1100	7366,38	276980	138	27632	304612	
674691	675099	70	27	880	110	125	1100	3756,7	142760	104	20724	163484	
675547	676442	60	49	1054	115	125	1200	16536,8	519260	125	24960	544220	
678127	678787	70	21	1825	160	175	2100	4399,1	153080	101	20148	173228	
680398	680802	130	21	1110	145	155	1300	1866,22	60460	70	13921	74381	
682341	682989	120	37	995	135	145	1200	9889,73	302620	132	26463	329083	
683562	684174	130	35	1006	135	145	1100	3685,93	124580	57	11478	136058	
701321	701595	105	13	1170	145	155	1400	573,88	20540	52	10432	30972	•
701921	702279	115	18	1160	145	160	1400	1579,71	49920	75	15072	64992	••
702496	703069	120	31	1070	140	150	1200	3838,37	135880	70	14060	149940	
703286	703620	100	16	1235	140	150	1400	785,93	25460	46	9211	34671	
704031	704309	110	12	1300	150	160	1500	427,79	13260	42	8373	21633	•
705163	705575	150	41	580	110	115	600	702,45	22480	14	2861	25341	••
708295	708672	100	21	1035	130	140	1200	1502,98	54700	60	12089	66789	••
709914	710768	20	39	1245	110	125	1500	17974,7	708200	173	34697	742897	
711644	711736	20	2	2500	160	180	2900	7,66	260	14	2791	3051	•
711789	711881	20	2	2500	160	180	2900	7,66	260	14	2791	3051	

Продолжение приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{нп}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{нп}=0,9$ м/с ²)	$R_{рек}$, м	Площадь между R_c и $R_{рек}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{рек}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
712615	713618	45	27	2115	160	180	2400	11097,4	348460	134	26847	375307	••
713828	714102	90	16	960	125	135	1200	937,09	36180	67	13397	49577	•
714215	714574	130	33	630	105	115	700	1457,93	53060	40	8059	61119	••
714634	715244	140	57	615	105	115	700	8727,79	272300	85	16904	289204	
715437	715768	120	29	660	110	120	800	2180,53	71960	71	14165	86125	
715890	716258	130	35	600	105	115	700	2423,78	86780	61	12211	98991	
716964	717455	45	14	2080	160	180	2400	1737,67	66720	78	15630	82350	
718234	718541	125	26	670	115	120	800	1472,85	54200	59	11792	65992	
719096	719387	120	31	544	95	100	600	833,28	26840	30	6057	32897	
719424	720098	140	63	611	105	115	700	12166,8	386900	98	19562	406462	
720614	721039	45	12	2060	160	180	2400	1158,39	42620	71	14235	56855	•
721995	722409	110	29	824	115	130	1000	3424,66	110960	89	17807	128767	••
725611	726395	60	41	1084	120	135	1400	23362,3	920480	226	45202	965682	
727606	728191	90	39	854	110	125	1000	6950,9	218260	99	19866	238126	
728262	729022	120	72	605	105	110	700	18942,2	746320	119	23864	770184	
729094	729752	110	59	643	100	110	700	6605,46	216660	59	11733	228393	
729805	730324	50	25	1206	125	135	1400	3466,67	128260	85	16921	145181	
730337	730780	120	41	616	105	110	700	3290,12	114500	60	12016	126516	••
731020	731406	60	22	994	115	125	1200	2116,52	67300	79	15812	83112	
732784	733057	70	14	1080	125	135	1300	634,66	25380	54	10746	36126	•

Окончание приложения

ПК начало кривой	ПК конец кривой	h , мм	α , град.	R_c , м	V_c , км/ч ($a_{\text{нп}}=0,7$ м/с ²)	V_p , км/ч ($a_{\text{нп}}=0,9$ м/с ²)	$R_{\text{рек}}$, м	Площадь между R_c и $R_{\text{рек}}$ (площадь между дугами), м ²	Стоимость отсыпки земполотна*, ВУН	Изменение в длине кривой при изменении R_c на $R_{\text{рек}}$, м	Стоимость удлинения ВСП**, ВУН	Общая стоимость реконструкции кривых, ВУН	Примечание
735214	735514	70	13	1320	135	150	1600	833,79	25680	63	12700	38380	
736070	736315	75	17	830	110	120	1000	674,19	25080	50	10083	35163	
737157	737747	95	55	615	100	105	700	7867,79	270660	82	16311	286971	••
737923	738735	100	75	622	100	105	700	17688,1	597860	102	20410	618270	
490702	491645	60	27	1970	160	180	2300	12152,4	371860	158	31593	403453	••
504524	504942	65	13	1870	160	180	2200	1303,98	52160	74	14753	66913	•
526104	526687	120	32	1050	140	150	1300	8397,2	298940	139	27762	326702	••
527380	528382	90	78	740	110	115	900	50277,1	1659140	217	43330	1702470	
531945	532423	110	26	1070	135	150	1300	4201,21	157960	103	20550	178510	
533867	534401	110	49	630	100	110	700	4678,36	160000	59	11867	171867	
536977	537388	30	26	900	100	110	1100	3082,89	119620	91	18267	137887	
538094	538175	35	52	1200	120	130	1400	31085,7	101960	180	36033	137993	
538207	538290	35	4	1200	120	130	1400	14,74	520	14	2767	3287	•
539740	540447	60	38	1060	120	135	1400	19891,1	648460	227	45355	693815	••
Итого									38884697	16203	3240611	42125309	
Примечание:		<ul style="list-style-type: none"> • – досыпка существующего земляного полотна. •• – отсыпка нового земляного полотна. * – указана стоимость отсыпки с учетом средней высоты насыпи 2 м и стоимость 1 м³ – 20,0 ВУН. ** – стоимость переустройства 1 км верхнего строения пути стоит 200,0 тыс. ВУН. 											

На основании выполненного расчета по определению стоимости реконструкции участка Красное – Минск – Брест была получена окончательная цифра – 42125309 белорусских рублей (1,369 млрд. российских рублей).

