

РОСЖЕЛДОР

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Ростовский государственный университет путей сообщения»

(ФГБОУ ВО РГУПС)



На правах рукописи

Харченко Павел Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ СРЕДСТВ РЕГИСТРАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ ЛОКОМОТИВА**

Специальность 2.9.3 – «Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент Н. В. Гребенников

Ростов-на-Дону
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Современное состояние и проблемы эксплуатации тягового подвижного состава железных дорог.....	14
1.1 Развитие систем и технологий эксплуатации транспортных средств	14
1.2 Тенденции внедрения цифровых технологий в систему эксплуатации подвижного состава	23
1.3 Модель ведения поезда в системе эксплуатации подвижного состава.....	34
1.4 Методы технического нормирования энергопотребления и рекуперации в системе эксплуатации локомотивов на основе регистрируемых параметров	42
Выводы по главе 1	50
2 Исследование теоретических подходов и разработка методики оценки модели ведения поезда при эксплуатации тягового подвижного состава	51
2.1 Критерии оценки модели ведения поезда	51
2.2 Формализация задачи повышения эффективности эксплуатации подвижного состава на основе анализа информации о выполненных поездках.....	53
2.3 Разработка методики оценки эксплуатации тягового подвижного состава с использованием данных регистрации параметров локомотива на основе нечёткой логики.....	62
2.3.1 Оценка соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС»	68
2.3.2 Оценка соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «продольная динамика»	75
2.3.3 Оценка соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «точность хода по расписанию».....	80

2.3.4 Оценка технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «энергоэффективность»	84
Выводы по главе 2.....	86
3 Разработка комплексной имитационной компьютерной модели поезда	88
3.1 Структура и назначение комплексной имитационной компьютерной модели	88
3.2 Компьютерная модель механической части	95
3.3 Компьютерная модель электрической части	97
3.4 Модель блока расчёта тормозных сил	98
3.5 Модель блока учёта расхода энергоресурсов на тягу поезда и возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть	106
3.6 Результаты моделирования и проверка адекватности компьютерной модели	111
Выводы по главе 3.....	113
4 Экспериментальные исследования влияния моделей ведения поезда на технологию эксплуатации с позиции энергоэффективности, безопасности и динамики движения подвижного состава.....	115
4.1 Планирование и проведение экспериментальных исследований на участке железной дороги.....	115
4.2 Анализ экспериментальных исследований соблюдения технологии эксплуатации при приоритетном критерии «продольная динамика»	117
4.3 Анализ экспериментальных исследований соблюдения технологии эксплуатации при приоритетном критерии «энергоэффективность»	128
4.4 Совершенствование системы технического нормирования потребления и возврата энергоресурсов на тягу поездов.....	138
4.5 Совершенствование системы эксплуатации тягового подвижного состава за счёт интеграции методов оценки моделей ведения поезда в технологию технического обучения эффективным и безопасным приёмам вождения поездов.....	148
Выводы по главе 4.....	152

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157
Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационного исследования (справочное)	186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. По поручению Президента РФ Правительством Российской Федерации утверждена долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» (ДПР) [1, 2], синхронизированная с положениями государственных программ, директивами Правительства РФ, а также нормативными документами Министерства транспорта и собственно компании [3–7]. В рамках инновационного и технологического развития, в соответствии со «Стратегией научно-технологического развития холдинга до 2025 года и на перспективу до 2030 года» (Белая книга), приоритетными направлениями определены развитие систем управления безопасностью движения и рисками, повышение энергетической эффективности, а также совершенствование систем управления качеством эксплуатации железнодорожного транспорта [8].

Современный этап развития железнодорожной отрасли характеризуется возрастающими требованиями к безопасности, энергоэффективности и надёжности эксплуатации подвижного состава. Выполнение этих задач требует перехода от традиционных методов эксплуатации тягового подвижного состава (ТПС) к принципиально новым, основанным на цифровых технологиях, интеграции информационных систем и интеллектуальной обработке эксплуатационных данных. Несмотря на реализацию обширных программ технического перевооружения, включающих обновление локомотивного парка, внедрение интеллектуальных систем управления тяговыми агрегатами, систем автоведения поездов и рекуперативного торможения, остаётся актуальной необходимость решения ряда ключевых задач, связанных с комплексной оптимизацией процессов эксплуатации [9]. Прежде всего, это касается вопросов системной оценки эффективности моделей ведения поездов, объективного нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и своевременного технического обслуживания локомотивов на основе реальных условий эксплуатации.

Актуальность этих задач обусловлена масштабами энергетического потребления железнодорожным транспортом. Так, доля потребления энергии на тягу поездов в общей структуре расходов ОАО «РЖД» составляет 77 %, при этом холдинг потребляет около 4,5 % всей электроэнергии и 6,5 % дизельного топлива в стране [10]. Энергетические стратегии РФ и ОАО «РЖД» направлены на сокращение удельного расхода ресурсов, что невозможно без внедрения комплексных систем мониторинга, диагностики и адаптивного управления эксплуатацией тягового подвижного состава [11, 12].

Одной из ключевых стратегических целей ОАО «РЖД» является обеспечение заданного уровня безопасности движения, соответствующего международным и национальным стандартам, сохранности перевозимых грузов, защиты жизни и здоровья людей, а также минимизация последствий от транспортных происшествий [13]. Анализ показателей безопасности по итогам работы за 2023 год [14] указывает на необходимость усиления технической составляющей в управлении эксплуатацией – как за счёт внедрения систем раннего выявления отклонений в работе ТПС, так и за счёт использования алгоритмов прогнозного обслуживания на основе данных средств регистрации параметров движения и диагностики.

Таким образом, в современных условиях основной задачей системы эксплуатации тягового подвижного состава становится внедрение технологических и организационных решений, обеспечивающих интеграцию эксплуатационной информации в контуры управления, диагностики и нормирования. Это требует совершенствования существующих подходов, разработки и апробации новых моделей технической эксплуатации, базирующихся на объективных, полноценных и высокочастотных данных, регистрируемых в реальных условиях движения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам изучения эффективности эксплуатации ТПС на всем жизненном цикле уделяется значительное внимание. Существенный вклад в развитие концепций, технологических и технических решений, направленных на повышение

энергетической эффективности, надёжности и экономичности эксплуатации подвижного состава внесли учёные и специалисты транспорта: А. А. Бакланов, Л. А. Баранов, А. А. Воробьев, В. А. Гапанович, В. В. Грачёв, Я. М. Головичер, Н. В. Гребенников, А. И. Давыдов, К. И. Доманов, А. М. Евстафьев, С. П. Железняк, А. А. Зарифьян, А. Г. Зверев, И. П. Исаев, П. Г. Колпахчян, П. С. Корнеев, А. С. Космодамианский, С. В. Малахов, С. А. Маринин, А. И. Молчанов, В. С. Молярчук, Л. А. Мугинштейн, В. П. Обухов, С. И. Осипов, С. С. Осипов, Л. Н. Павлов, А. А. Пугачёв, А. Д. Петрушин, О. Е. Пудовиков, В. Е. Розенфельд, А. Н. Савоськин, Н. Н. Сидоров, В. П. Феоктистов, С. Г. Шантаренко, Е. Н. Школьников, К. И. Юренко и др.

Ключевыми направлениями в системе эксплуатации тягового подвижного состава являются совершенствование моделей вождения поездов и управления тормозами подвижного состава, обеспечение безопасности движения и снижение продольно-динамических воздействий в поезде. Большой вклад в решение данного класса задач внесли многие учёные и инженеры: С. А. Айзинбуд, В. Р. Асадченко, Л. В. Балон, В. Д. Верескун, С. В. Вершинский, П. Т. Гребенюк, В. Г. Иноземцев, В. Г. Козубенко, В. В. Крылов, В. Н. Курков, Б. Н. Никифоров, А. Н. Савоськин, Т. А. Тибилов, И. А. Яицков и др.

Объектом исследования является тяговый подвижной состав железных дорог в условиях перехода к цифровым и энергоэффективным технологиям.

Предметом исследования являются методы обработки регистрируемых параметров локомотива, обеспечивающие оценку и выбор рациональных моделей ведения поезда с учётом энергоэффективности и продольной динамики поезда.

Цель работы: совершенствование системы и технологии эксплуатации подвижного состава железных дорог на основе применения инновационных методов обработки регистрируемых параметров локомотива, направленных на повышение эффективности эксплуатации подвижного состава.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ и обобщение современного состояния проблем и существующих решений в области систем и технологий эксплуатации транспортных средств, в том числе тягового подвижного состава железных дорог.
2. Разработать методику оценки модели ведения поезда при эксплуатации тягового подвижного состава с использованием информации средств регистрации параметров локомотива.
3. Разработать комплексную имитационную компьютерную модель поезда, позволяющую исследовать модели ведения поезда при эксплуатации тягового подвижного состава с позиции энергоэффективности, безопасности и продольной динамики движения подвижного состава.
4. Провести моделирование и анализ различных режимов эксплуатации подвижного состава с использованием разработанной методики для оценки реализуемых моделей ведения поезда, выявления резервов экономии энергоресурсов и анализа соблюдения технологии эксплуатации.
5. Провести экспериментальные исследования влияния моделей ведения поезда на технологию эксплуатации по критериям энергоэффективности, безопасности и продольной динамики движения подвижного состава.
6. Разработать предложения по практическому применению методов обработки и анализа регистрируемых параметров в системе эксплуатации тягового подвижного состава.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Развита научный подход в области исследования и оценки эффективности эксплуатации тягового подвижного состава, учитывающий безопасность движения, продольную динамику поезда, точность хода по расписанию и энергоэффективность.
2. Впервые предложена методика оценки модели ведения поезда с использованием данных регистрации параметров локомотива на основе нечёткой логики, позволяющая обеспечить более эффективное решение задачи оценки и

выбора рациональной модели ведения поезда для заданного приоритетного критерия.

3. Разработана имитационная компьютерная модель пассажирского поезда, позволяющая воспроизводить все режимы движения поезда, управления тяговым оборудованием и автотормозами, влияющие на энергоэффективность, безопасность и динамику подвижного состава, с последующим расчётом показателей энергопотребления.

4. Разработан метод технического нормирования потребления и возврата энергетических ресурсов на тягу поездов с дифференцированием по каждому перегону на основе использования энергооптимальных моделей управления тяговым подвижным составом и принципа оптимальности Беллмана.

5. Разработан алгоритм интеграции методов оценки эффективности эксплуатации тягового подвижного состава, основанных на анализе фактических показателей, в систему обучения эффективным и безопасным приёмам вождения поездов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Проведённые теоретические исследования подтвердили целесообразность интеграции традиционных инструментов оценки выполненных поездок с перспективными методами интеллектуального анализа реализуемых моделей ведения поезда, основанными на применении методов нечёткой логики.

2. Разработана и апробирована методика оценки и выбора реализуемых моделей ведения поезда на основе комплексной оценки массива данных со средств регистрации параметров локомотива, основанная на нечётко-логической расчётной модели с учётом значимости критериев, определяемой по формуле Фишберна, позволяющая в ряде случаев обеспечить более эффективное решение задачи выбора рациональной модели ведения поезда по сравнению с эвристическим подходом.

3. Разработанная имитационная компьютерная модель поезда позволила провести комплексные исследования различных моделей ведения поезда во всех

комбинациях режимов управления тягой, рекуперативным и пневматическим торможением с последующей оценкой энергоэффективности, безопасности движения и продольной динамики поезда.

4. Разработаны мероприятия по совершенствованию системы технического нормирования потребления и возврата энергетических ресурсов на основе использования энергооптимальных моделей ведения поезда, что позволяет объективно установить плановую норму расхода энергоресурсов на тягу поездов для каждого участка железной дороги.

5. Предлагаемая методика использована при разработке энергооптимальных режимно-информационных карт и успешно апробирована, что позволило снизить удельный расход топливно-энергетических ресурсов, минимизировать продольные рывки при движении поезда и увеличить долю следования в режиме рекуперации по сравнению с типовым режимом автоведения.

Методология и методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решены с использованием методов статистической обработки больших массивов экспериментальных данных, имитационного компьютерного моделирования, теории локомотивной тяги, теории электрических цепей, формального метода Ньютона – Эйлера, метода экспертных оценок, метода Фишберна, нечёткой логики, натурного эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа существующих тенденций внедрения цифровых технологий в систему эксплуатации подвижного состава.

2. Методика оценки модели ведения поезда с использованием данных регистрации параметров локомотива на основе нечёткой логики, учитывающая безопасность движения, продольную динамику поезда, точность хода по расписанию и энергоэффективность.

3. Комплексная имитационная компьютерная модель пассажирского поезда посредством синтеза программных комплексов ПК «Универсальный механизм» и MATLAB/Simulink, в основе которой лежит использование технических характеристик завода-изготовителя подвижного состава, позволяющая проводить

исследования влияния реализуемой модели ведения поезда на энергоэффективность, безопасность и динамику подвижного состава.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния моделей ведения поезда на технологию эксплуатации с позиции энергоэффективности, безопасности и динамики движения подвижного состава в границах Северо-Кавказской железной дороги.

5. Предложения по совершенствованию системы эксплуатации тягового подвижного состава за счёт комплексного учёта факторов движения поезда как электромеханической системы и внедрения разработанной методики оценки моделей ведения в технологические процессы нормирования энергоресурсов и выработки безопасных и энергоэффективных приёмов вождения.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается корректностью исходных математических положений, обоснованностью принятых допущений, а также сопоставлением теоретических, экспериментальных данных и результатов, полученных в процессе компьютерного моделирования, с информацией бортовых средств регистрации параметров локомотива.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– международных научно-практических конференциях «Транспорт – 2015, 2016, 2017, 2018, 2021, 2025, 2026» – Ростов-на-Дону, РГУПС, 2015–2018, 2021, 2025, 2026 гг.;

– VIII Международной конференции «Системный анализ, управление и обработка информации» – Дивноморское, ДГТУ, 2017 г.;

– II Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление» – Ростов-на-Дону, РГУПС, 2018 г.;

- Всероссийской национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТрансПромЭк-2018») – Ростов-на-Дону, РГУПС, 2018 г.;
- Международной молодёжной научно-практической конференции «Применение и развитие нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике» – Новочеркасск, ЮРГПУ (НПИ) имени М. И. Платова, 2018 г.;
- 2018 International Russian Automation Conference “RusAutoCon 2018” – Sochi, 2018;
- IX, XI международных научно-технических конференциях «Технологии разработки информационных систем» («ТРИС-2019», «ТРИС-2021») – Таганрог, ЮФУ, 2019, 2021 гг.;
- 5th International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI 2021) – Sochi, 2021;
- 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) – Sochi, 2021;
- International Scientific Conference «Cyber-physical systems design and modeling (CyberPhy-2021)» – St. Petersburg, 2021;
- VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надёжность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» – Омск, ОмГУПС, 2021 г.;
- XXXIV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-34» – Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 2021 г.;
- 12, 14, 15, 16, 17-й Международных научно-практических конференциях «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» – Ростов-на-Дону, РГУПС, 2020, 2022–2025 гг.;
- VII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» – Омск, ОмГУПС, 2025 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 34 работах, из них восемь статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, шесть статей в журналах, входящих в базу Scopus, получен один патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа общим объёмом 192 страницы, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 213 источников и приложения, содержит 48 рисунков, 36 таблиц.

1 Современное состояние и проблемы эксплуатации тягового подвижного состава железных дорог

1.1 Развитие систем и технологий эксплуатации транспортных средств

Железнодорожный тяговой подвижной состав представляет собой разновидность наземных транспортных средств, предназначенных для перевозки грузов и пассажиров по железным дорогам. Одной из ключевых задач Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года является обеспечение безопасных, качественных и экономически эффективных транспортных услуг [4]. Это требует снижения себестоимости и энергоёмкости перевозок, что возможно за счёт модернизации эксплуатационных систем. Для решения поставленных задач в настоящее время созданы и эксплуатируются современные воздушные, наземные и водные транспортные средства, являющиеся сложными техническими объектами и состоящие из множества систем, связанных между собой специализированными коммуникационными интерфейсами и каналами связи.

Транспортные средства, включая локомотивы, воздушные и водные суда, в последние десятилетия претерпевают значительные изменения, обусловленные цифровизацией, автоматизацией и внедрением искусственного интеллекта. Трансформация затрагивает не только их конструкцию, но и системы и технологии технической эксплуатации, обслуживания и ремонта на всем жизненном цикле, включая проектирование, производство, эксплуатацию, техническое обслуживание, ремонт и утилизацию транспортных средств. Этот процесс носит двуединый характер: с одной стороны, происходят организационно-методические преобразования, с другой – технологическая революция средств диагностики, мониторинга и управления [15–19].

Исторический анализ показывает, что развитие технологий и организационных моделей эксплуатации в транспортной отрасли происходило во взаимосвязи: технические инновации вызывались насущными потребностями

системы эксплуатации, а возникавшие организационные задачи, в свою очередь, стимулировали внедрение новых технологических решений. Эта причинно-следственная взаимосвязь особенно отчётливо прослеживается на примере первого переходного этапа в развитии систем эксплуатации, охватывающего период 1900 – 1950 гг. В этот период произошёл переход от реактивной модели «ремонта по факту отказа» к планово-предупредительной системе технического обслуживания [20–22]. Для железнодорожного транспорта была введена система обслуживания по пробегу, а в авиации – по налёту часов, что потребовало разработки соответствующих технологий [23–25]:

- создания механических счётчиков наработки (в частности, мотоочасов для авиационной техники);
- производства стандартизированных измерительных приборов для оценки износа узлов и агрегатов;
- внедрения первых форм централизованного учёта межремонтных ресурсов подвижного состава.

Для железнодорожного транспорта эти изменения были связаны с ростом интенсивности движения, увеличением массы поездов и усложнением конструкции тягового подвижного состава. Введённые нормативы позволили существенно сократить количество отказов в пути следования, повысить безопасность перевозок и предсказуемость работы техники. Внедрение регламентов технического обслуживания подвижного состава значительно повысило надёжность его эксплуатации и сократило число аварийных отказов. Однако это сопровождалось ростом трудозатрат и эксплуатационных расходов, поскольку поддержание заданных межремонтных интервалов требовало вовлечения значительного объёма человеческих и материальных ресурсов.

Во второй, переходный, период (1970–1990 гг.) система планово-предупредительных ремонтов (ППР), долгое время применявшаяся на железнодорожном транспорте, столкнулась с объективным кризисом [26]. По данным анализа жизненного цикла технического обслуживания, совокупные издержки на эксплуатацию и ремонт подвижного состава в этот период выросли

на 30–40 %, что было связано с недостаточной гибкостью ППР и низкой эффективностью системы при эксплуатации техники в различных режимах [27]. Это стимулировало переход к системам технического обслуживания по фактическому состоянию, позволяющим учитывать индивидуальные параметры работы ТПС и сокращать затраты за счёт оптимизации межремонтных пробегов. На железнодорожном транспорте началось внедрение средств регистрации параметров движения (СРПД), а также автоматизированных систем диагностики технического состояния агрегатов (например, узлов тележек, тяговых двигателей, тормозного оборудования) [28, 29]. Параллельно с железнодорожной отраслью аналогичные процессы происходили в других видах транспорта. В автомобильной отрасли в конце 1980-х годов были внедрены первые версии систем бортовой диагностики OBD-I, которые к 1996 году были заменены на более совершенные OBD-II, OBD-III [30, 31]. В авиации начали широко использоваться встроенные системы тестирования (BITE), позволяющие выполнять диагностику в полёте и сразу после посадки [32]. На морских судах стали применять системы мониторинга вибрации и температуры для оценки состояния дизель-генераторов и гребных валов [33]. Именно организационная потребность в переходе от трудоёмкой системы ППР к объективному мониторингу технического состояния стала катализатором технологической революции в средствах диагностики и цифрового переоснащения процессов эксплуатации. Это позволило существенно сократить затраты, повысить надёжность и перейти к более прогнозируемой модели управления жизненным циклом подвижного состава.

Современный этап развития систем и технологий эксплуатации транспортных средств (2010-е гг. – н. в.) характеризуется синергией новейших технологических решений и организационных концепций, формирующих замкнутый цикл взаимного влияния: технологические инновации открывают возможности реализации новых моделей эксплуатации, которые, в свою очередь, стимулируют дальнейшее развитие технологий [34–37].

Одним из ключевых достижений данного этапа стала технология предиктивного обслуживания, реализованная в рамках концепции цифровых

двойников в транспортной отрасли. Данная концепция базируется на совокупности инновационных элементов [38–42]:

- датчиков интернета вещей (IoT), способных измерять вибрацию, температуру, давление и другие параметры технического состояния оборудования;
- систем машинного обучения, позволяющих создавать алгоритмы прогнозирования отказов на основе анализа больших данных;
- облачных платформ, обеспечивающих централизованный сбор, хранение и обработку массивов информации.

Переход к предиктивным моделям эксплуатации вызвал потребность в усовершенствовании сенсорных технологий, развитии алгоритмов глубокого обучения для анализа сложных корреляций, а также в перспективных квантовых вычислениях для обработки экстремально больших объёмов данных. В железнодорожной отрасли концепция «умного депо» наглядно демонстрирует процесс взаимного влияния организационных задач и технологических ответов [43, 44]:

- 1) организационные запросы формируют требования к технологиям;
- 2) индивидуализация ремонтных процедур реализуется через цифровые двойники узлов и агрегатов подвижного состава;
- 3) оптимизация запасов запасных частей осуществляется с помощью систем предиктивной логистики;
- 4) снижение простоев достигается использованием искусственного интеллекта для планирования ремонтов.

В сфере водного транспорта развивается аналогичная концепция «умного внутреннего водного транспорта», включающая: «умные суда», «умные порты», «умную инфраструктуру», «умную навигацию», «умный ремонт» и «умные водные пути» и др. [45, 46]. Внедрение указанных компонентов направлено на повышение эффективности, безопасности и экологичности судоходства посредством цифровизации и автоматизации [47].

Данные из отчёта Siemens «Railigent Case Study» (2023) [48] подтверждают, что для повышения доступности, связи, устойчивости и надёжности железнодорожной инфраструктуры активно внедряются цифровые решения, включая IoT и концепции MaaS (Mobility as a Service). Siemens Mobility фокусируется на создании умных транспортных экосистем с интеграцией датчиков и программного обеспечения. Использование цифровых моделей обслуживания (Maintenance as a Service), сотен сенсоров и продвинутого анализа данных способствует переходу от превентивной к предиктивной практике технического обслуживания, что снижает частоту и стоимость внеплановых ремонтов. Совмещение высокочастотного мониторинга, программного анализа и проактивного реагирования обеспечивает одновременно экономию ресурсов и повышение эффективности эксплуатации. Важным трендом является активное государственное финансирование развития цифровой инфраструктуры в железнодорожной и общественной транспортной сферах, что отражает признание цифровизации как ключевого мегатренда в мировой экономике и промышленности.

Рассмотрим ниже эволюцию систем и технологий эксплуатации транспортных средств с декомпозицией по отраслям и бенчмаркингом лучших практик зарубежных компаний.

Авиационная отрасль традиционно занимает лидирующие позиции в применении передовых технологий эксплуатации. В период с 1950-х по 1980-е годы преобладала система регламентного технического обслуживания, основанная на налёте часов (Maintenance Schedule, MS), закреплённая в нормативных документах Международной организации гражданской авиации (ICAO) [49, 50]. Этот подход обеспечивал стандартизацию процедур обслуживания и повышение безопасности полётов, однако имел ограничения в адаптации к фактическому состоянию оборудования. Революционным шагом в развитии стала интеграция систем ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) и FDM (Flight Data Monitoring) в 1990-х годах, которые позволили осуществлять мониторинг технического состояния воздушных судов в

реальном времени. Эти технологии существенно повысили эффективность диагностики и управления техническим обслуживанием [51, 52]. Современный этап развития характеризуется массовым внедрением предиктивных систем технического обслуживания, основанных на анализе больших данных и методах искусственного интеллекта. Одним из наиболее ярких примеров является платформа Skywise Predictive Maintenance (SPM), которая позволяет прогнозировать технические отказы до их возникновения за счёт интеграции данных с бортовых систем, применения алгоритмов предсказательной аналитики и автоматизированной оценки состояния узлов и агрегатов [53]. Это даёт возможность авиакомпаниям сокращать количество незапланированных ремонтов и снижать длительность простоев воздушных судов. Таким образом, платформа Skywise и партнёрская модель Digital Alliance формируют новую парадигму в управлении техническим состоянием воздушных судов, обеспечивая повышение надёжности парка и снижение эксплуатационных затрат авиакомпаний. Особое внимание уделяется развитию концепции цифровых двойников. Компания GE Aviation успешно использует цифровые модели авиадвигателей, позволяющие моделировать процессы износа и оптимизировать межремонтные интервалы. Результаты показывают, что предиктивное обслуживание с использованием искусственного интеллекта может снизить расходы на обслуживание на 12–18 % и сократить незапланированное время простоя на 15–20 %, тем самым увеличивая техническую готовность воздушных судов [54].

Морской и речной транспорт традиционно характеризуется большей консервативностью в вопросах технической эксплуатации по сравнению с авиационной отраслью. До начала 2000-х годов здесь преобладала система планово-предупредительных ремонтов, в том числе доковых, регламентируемых классификационными обществами, такими как Lloyd's Register и DNV [55]. С начала 2010-х годов в отрасли наметился переход к более современным методам обслуживания, основанным на реальном техническом состоянии оборудования – CBM (Condition-Based Maintenance), а также к применению технологий интернета вещей (IoT). Одной из ключевых причин таких изменений стала необходимость

повышения технической надёжности судов, оптимизации затрат на ремонт и снижения времени простоя. Знаковым для внедрения цифровых технологий на водном транспорте стал проект автономного электрического контейнеровоза Yara Birkeland, разработанный в Норвегии. В 2022 году судно было введено в эксплуатацию в тестовом режиме. Оно стало первым в мире полностью электрическим и автономным судном малого тоннажа (до 120 TEU), предназначенным для прибрежной каботажной доставки грузов. По оценкам разработчиков, использование Yara Birkeland позволит ежегодно сократить выбросы CO₂ на 1 000 тонн за счёт замещения автомобильного транспорта [56–58]. Другим показательным примером цифровой трансформации стал проект Tuas Mega Port в Сингапуре, первая очередь которого была введена в эксплуатацию 1 сентября 2022 года. В новом терминале автоматизированы все ключевые процессы перегрузки контейнеров, включая управление портовыми кранами, перемещение грузов с помощью автономных транспортных средств, а также централизованное управление логистикой с применением искусственного интеллекта и технологий 5G [59, 60]. По информации Морского и портового управления Сингапура, к 2040 году порт достигнет мощности до 65 млн TEU в год, оставаясь при этом полностью цифровым и экологически ориентированным [61]. Таким образом, даже традиционно инерционные отрасли, такие как водный транспорт, переходят к цифровым моделям управления техническим состоянием и эксплуатации, что позволяет повысить эффективность и устойчивость судоходства [62–64].

Железнодорожная отрасль демонстрирует уникальный пример сочетания инновационных подходов с требованиями к надёжности и безопасности. В XX веке на железнодорожном транспорте преобладала система технического обслуживания по пробегу, характерная для советской школы эксплуатации. Современный этап характеризуется внедрением интеллектуальных систем мониторинга, таких как Railigent (Siemens) и HealthHub (Alstom) [65]. Siemens Railigent диагностирует потенциальную неисправность и помогает принять решение – продолжать эксплуатацию или отправить подвижной состав в депо

досрочно. По данным Siemens, это позволило сократить затраты на техническое обслуживание на 25 %. Railigent X предоставляет ключевые данные для поддержки решений, снижая время простоя и оптимизируя загрузку депо, ускоряет цифровую трансформацию железнодорожных систем и способствует увеличению устойчивости без дополнительных ресурсов. Alstom HealthHub – комплексная система предиктивного обслуживания всех железнодорожных активов, которая обеспечивает сбор параметров, анализ и прогноз технического состояния, а также анализирует данные поездов, инфраструктуры и систем сигнализации для повышения производительности и оптимизации обслуживания. Примером успешной цифровизации является Deutsche Bahn, где применяется комплексный подход к предиктивному ремонту инфраструктуры с использованием дронов и технологий анализа больших данных [66, 67]. В Японии (JR East) с 2024 года начато тестирование полностью автономных поездов, что стало возможным благодаря развитию систем компьютерного зрения и точного позиционирования [68]. В России в рамках реализации проекта «Умные депо» внедрены цифровые технологии диагностики и планирования ремонтов на направлении Москва – Санкт-Петербург [43].

Таким образом, современное развитие транспортной отрасли демонстрирует разнонаправленную динамику внедрения цифровых технологий в зависимости от специфики вида транспорта. Авиационный сектор выступает лидером по темпам интеграции автономных систем, что обусловлено высокими требованиями к безопасности и эксплуатационной эффективности. Однако именно в этой отрасли наблюдается наибольшее регуляторное давление, что сдерживает полномасштабное внедрение инноваций. Водный транспорт, напротив, характеризуется наиболее консервативным подходом к цифровизации, что связано с длительным жизненным циклом судов и высокой стоимостью модернизации. Железнодорожный транспорт занимает промежуточное положение: здесь инновационные технологии находят активное применение, при этом сохраняется акцент на надёжность и устойчивость эксплуатации.

Анализ текущих технологических трендов позволяет выделить три ключевых направления интеграции цифровых решений в систему эксплуатации подвижного состава и инфраструктуры:

- 1) автономные эксплуатационные системы, отражающие переход к минимизации человеческого участия. Это предполагает развитие таких организационных моделей, как безлюдные депо и терминалы, а также применение автономных технических решений – дронов, роботизированных инспекторов и мобильных диагностических комплексов;
- 2) когнитивные системы поддержки принятия решений, нацеленные на снижение влияния человеческого фактора. В этом направлении наблюдается активное внедрение ИИ-ассистентов, систем дополненной реальности, когнитивной аналитики и цифровых помощников машиниста;
- 3) цифровая экосистема жизненного цикла, предполагающая интеграцию данных и процессов на всех этапах – от проектирования и производства до технической эксплуатации и утилизации. Здесь ключевыми технологическими решениями выступают цифровые двойники, IoT, блокчейн и цифровые паспорта изделий.

Проведённый анализ позволяет сделать вывод о том, что развитие системы и технологии эксплуатации, как правило, следует за эволюцией организационно-функциональных моделей, выступая в качестве инструментального отклика на новые методологические запросы. Вместе с тем на современном этапе наблюдается переход к синергетической модели развития, при которой технологии и организационные подходы формируют единое взаимодополняющее пространство. Наиболее перспективными направлениями цифровой трансформации транспортного комплекса выступают автономизация, интеллектуализация и формирование сквозных цифровых экосистем. Несмотря на различия между видами транспорта, все они демонстрируют конвергентные тенденции к автоматизации, цифровизации и повышению роли аналитики в управлении эксплуатацией. Эффективная реализация этих процессов требует

системного подхода, включающего технологические, экономические, нормативные и кадровые компоненты.

1.2 Тенденции внедрения цифровых технологий в систему эксплуатации подвижного состава

Современные транспортные системы, несмотря на высокий уровень автоматизации, цифровизации и развития технических средств контроля, сохраняют существенную зависимость от действий человека. При этом при анализе транспортной аварийности необходимо различать две методологически разные категории: непосредственные ошибки экипажа (пилотов, капитанов, машинистов) при управлении транспортным средством и человеческий фактор в широком системном понимании, включающий организационные, коммуникационные и управленческие факторы, качество подготовки к рейсу, надзор и др. Следует также учитывать, что в различных видах транспорта, странах и системах статистического учёта применяются неодинаковые методики классификации причин происшествий. В связи с этим значения, характеризующие вклад человеческого фактора, не всегда могут быть прямо сопоставлены между собой и требуют корректной интерпретации.

В авиационной отрасли доля происшествий, непосредственно связанных с ошибками пилота или экипажа, оценивается на уровне 60 %, тогда как на отказы техники приходится 20 %, на внешние воздействия – 10 %, и ещё 10 % составляют происшествия с неустановленными причинами. При этом 36 % таких случаев происходят на этапе посадки, 30 % – при взлёте, 18 % – во время крейсерского полёта и 16 % – при заходе на посадку. При учёте более широкого комплекса человеческого фактора, включающего подготовку персонала, коммуникацию, соблюдение процедур, диспетчерское взаимодействие, техническое обслуживание и организационный контроль, доля происшествий, связанных с человеческим фактором, может достигать 80 % [69–72].

Аналогичная ситуация наблюдается на водном транспорте. При узкой трактовке учитываются главным образом ошибки экипажа при судовождении, маневрировании и выполнении технологических операций. При расширенной трактовке человеческого фактора дополнительно учитываются береговое управление, организация судовых операций, коммуникация, управленческие и организационные факторы. Поэтому в сфере морских перевозок оценки непосредственного влияния экипажа находятся примерно на уровне 60 %, а при широком подходе к человеческому фактору достигают около 80 % [72].

На железнодорожном транспорте, согласно данным факторного анализа нарушений безопасности движения и отказов технических средств в локомотивном комплексе ОАО «РЖД» за 2021–2025 гг., доля влияния человеческого фактора на возникновение транспортных происшествий, включая крушения, аварии и происшествия при перевозке опасных грузов, достигает 75 %. В то же время среди событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, доля случаев, обусловленных человеческим фактором, составляет 13 %. При этом 73 % таких событий приходится на маневровую работу, а 26 % – на поездную. В то же время 62 % таких событий связаны с неисправностью подвижного состава, 10 % – с неисправностью инфраструктуры и 4 % – с внешними воздействиями [14, 73].

Таким образом, сопоставление авиационного, водного и железнодорожного транспорта показывает, что более низкие значения, как правило, отражают непосредственные ошибки экипажа, тогда как более высокие значения характеризуют человеческий фактор в широком системном понимании. Приведённые данные подтверждают необходимость развития интеллектуальных систем поддержки принятия решений, автоматизированного анализа данных средств регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния транспортных средств, а также совершенствования технологий эксплуатации, направленных на снижение рисков, обусловленных человеческим фактором.

Управление транспортными средствами требует от операторов (пилотов, капитанов, машинистов) не только строгого соблюдения регламентов, но и адаптации к меняющимся внешним условиям. Это создаёт дополнительные риски для безопасности, энергоэффективности и надёжности эксплуатации [74–76]. Управление воздушным судном требует от пилота постоянного баланса между соблюдением регламентов и адаптацией к внешним условиям. Энергоэффективность полёта напрямую зависит от выбора оптимальной высоты, скорости и маршрута. Например, снижение сопротивления воздуха за счёт корректного выбора высоты позволяет значительно сократить расход топлива. Авиакомпания Delta внедрила AI-алгоритмы для поддержки принятия решений пилотами, что позволило сократить расход топлива на 1 % в 2022 году с прогнозируемым ростом до 3 % к 2035 году [77]. Однако, несмотря на широкое внедрение автоматизированных систем управления, исследования Boeing показывают, что значительный риск возникновения авиационных инцидентов возникает в момент передачи управления от автопилота пилоту, что подчёркивает уязвимость на стыке автоматизированного и ручного управления [78]. Даже при наличии современных систем, таких как FMS (Flight Management System), действия пилота в критических ситуациях могут привести как к снижению эффективности полёта, так и к аварийным событиям. Это подчёркивает необходимость совершенствования методов и моделей обучения, непрерывной подготовки экипажей, включая тренажёры для отработки экстренных сценариев.

На морском и речном транспорте человеческий фактор проявляется прежде всего в выборе маршрутов и управлении судовыми системами. Капитан, принимая решение о скорости хода, напрямую влияет на энергопотребление: например, реализуется тактика *slow steaming*, которая за счёт снижения скорости на 10 % позволяет сократить расход топлива примерно на 20 % вследствие экспоненциальной зависимости мощности от скорости [79, 80]. Однако ошибки в навигации, такие как инцидент с контейнеровозом Ever Given в марте 2021 года, приводят к катастрофическим последствиям – ущерб от блокировки Суэцкого канала оценивался экспертами в \$10 млрд [81]. В ответ на риски навигационных

ошибок внедрение цифровых решений на судах стало эффективным инструментом их предупреждения. Электронные картографические системы ECDIS, которые заменяют бумажные карты и автоматизируют расчёт курсов, позволили снизить число навигационных ошибок примерно на 40 % [82]. Несмотря на это, отрасль остаётся консервативной по причине длительного срока службы судов и высокой стоимости модернизации, которые замедляют переход к автономным решениям. Важный пример технологической революции – это автономный контейнеровоз Yara Birkeland в Норвегии, полностью лишённый экипажа. По данным проекта, платформа сокращает выбросы CO₂ до 95 % и снижает аварийность на 40 % благодаря устранению человеческого фактора из цепочки принятия решений [56].

Анализ функционирования локомотивного комплекса железнодорожного транспорта показывает, что влияние человеческого фактора остаётся ключевым риском в отрасли, несмотря на достигнутые успехи в повышении уровня безопасности на 48 %, о чём свидетельствуют данные статистики. Так, по данным ОАО «РЖД», за период с 2017 по 2022 год достигнуто снижение общего уровня инцидентов в локомотивном комплексе, что стало возможным благодаря системной работе по профилактике нарушений, в том числе со стороны локомотивных бригад. За этот период машинистами было предотвращено 477 проездов на запрещающие показания светофоров, 560 потенциальных столкновений на переездах, зафиксировано и своевременно пресечено 4,142 тыс. случаев противоправных действий, выявлено 14,717 тыс. нарушений регламента служебных переговоров и 45,136 тыс. дефектов железнодорожной инфраструктуры [73]. Необходимо сделать вывод, что системная работа в Дирекции тяги позволила добиться определённых успехов по минимизации рисков, связанных с человеческим фактором. Однако, несмотря на положительную динамику, эксплуатационная составляющая риска по-прежнему остаётся высокой. Согласно факторному анализу нарушений безопасности движения и технических отказов в локомотивном комплексе ОАО «РЖД» за 2023 год, значительная доля происшествий напрямую связана с действиями

персонала. Так, по вине локомотивных бригад продолжают происходить проезды запрещающих показаний светофоров, случаи саморасцепов, сходов подвижного состава, событий с пассажирскими поездами, столкновений, обрывов автосцепных устройств и др. (рисунок 1) [14].



Рисунок 1 – Транспортные происшествия и события в локомотивном комплексе, связанные с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта в 2023 году

Анализ технических заключений по транспортным инцидентам, зарегистрированным в период с 2021 по 2023 год, выявил, что в 69 % случаев проездов на запрещающий сигнал основными причинами стали невнимательность и отвлечение от управления. Ещё в 6 % случаев имело место нарушение регламента переговоров, в 5 % – ошибочные действия при приближении к запрещающему сигналу, в 4 % – недостаточное знание инструкций, а в 3 % – неверное управление тормозами [14].

Характерный пример – проезд запрещающего показания светофора 9 января 2023 года на станции Тоннельная Северо-Кавказской железной дороги. Методом диаграммы Исикавы было установлено, что решающими причинами инцидента стали человеческий фактор и недостаточная профилактическая работа с

локомотивными бригадами. Это подтверждает необходимость дальнейшего развития систем подготовки, оценки и обучения локомотивных бригад, включая внедрение комплексной оценки каждой выполненной поездки, совершенствование систем автоведения, развитие систем анализа рисков (рисунок 2) [83].



Рисунок 2 – Причинно-следственные связи проезда запрещающего показания светофора на станции Тоннельная Северо-Кавказской железной дороги

Анализ корреляции между уровнем квалификации, стажем работы локомотивных бригад и допущенными грубыми нарушениями правил безопасности выявляет сохраняющийся высокий риск даже среди опытных машинистов (рисунки 3, 4).

Парадоксально, но, по данным рисунка 4, машинисты со стажем более 10 лет допускают 42 % грубых нарушений, что опровергает стереотип о прямой зависимости «стаж – надёжность». Данный факт указывает на существующие недостатки в системе и технологии эксплуатации подвижного состава. Для снижения подобных рисков целесообразно внедрение систем автоведения поездов и программ регулярного обучения персонала.

В рамках системы менеджмента безопасности движения ОАО «РЖД» (СМБД) реализуются программы поддержания профессиональной компетентности работников локомотивных бригад, эффективность которых оценивается на уровне около 63 % [84, 85].

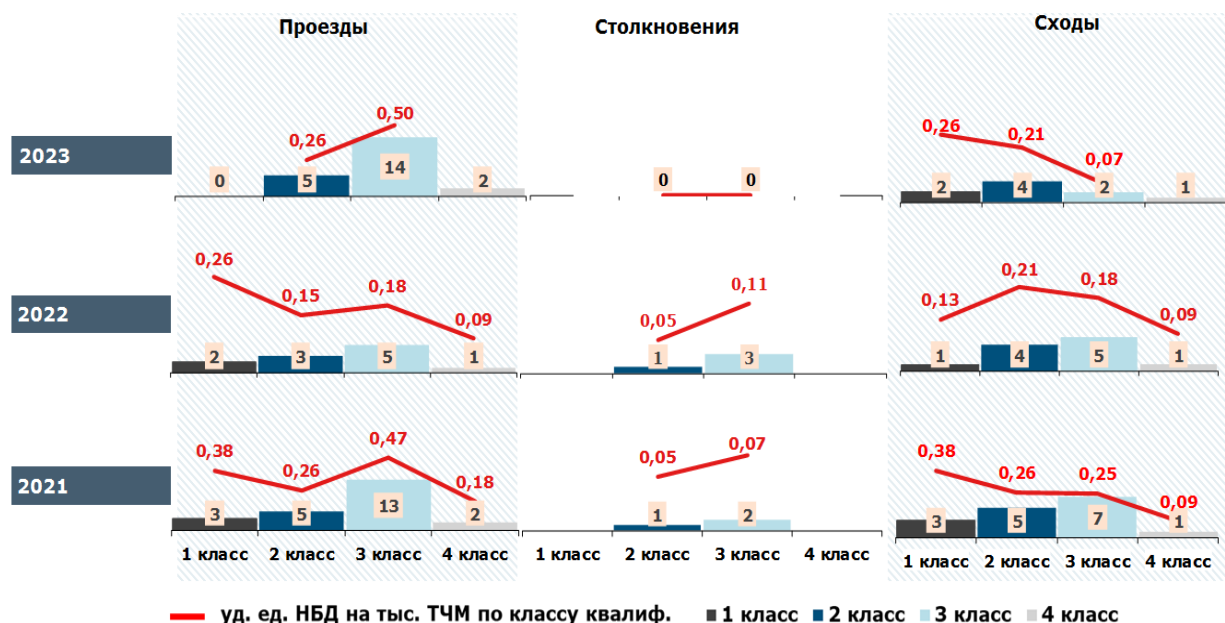


Рисунок 3 – Анализ квалификации машинистов, допустивших грубые нарушения безопасности движения за 2021–2023 гг. [14]

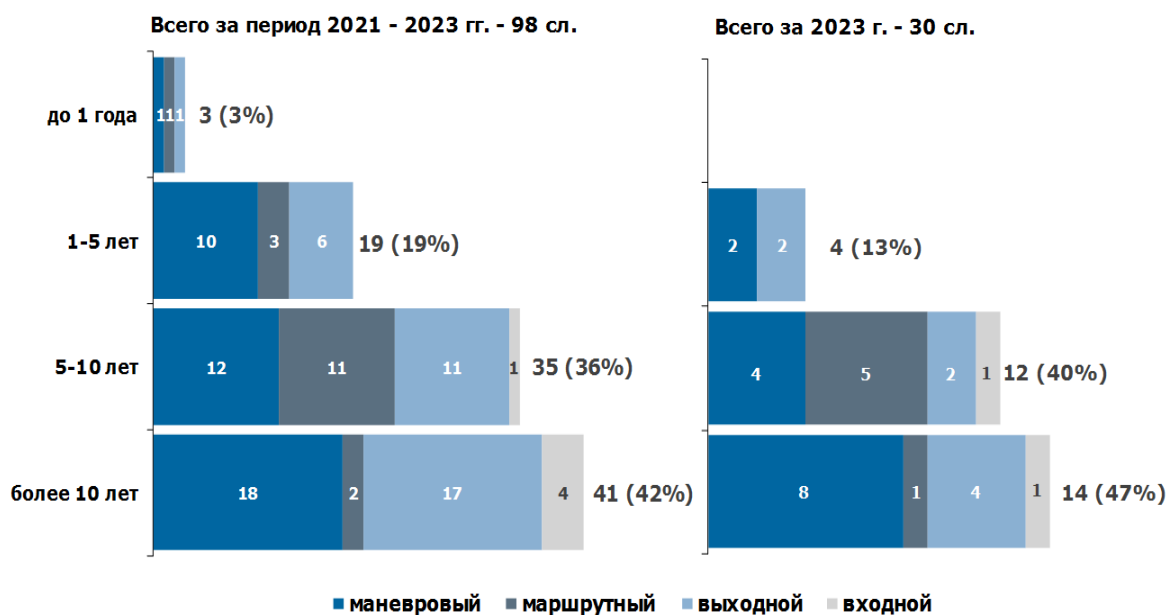


Рисунок 4 – Распределение проездов запрещающих сигналов светофоров по стажу работы машинистов за 2021–2023 гг. [14]

Наименьшая степень соответствия СМБД корпоративным требованиям определена в Красноярской, Дальневосточной и Забайкальской дирекциях тяги (рисунок 5).

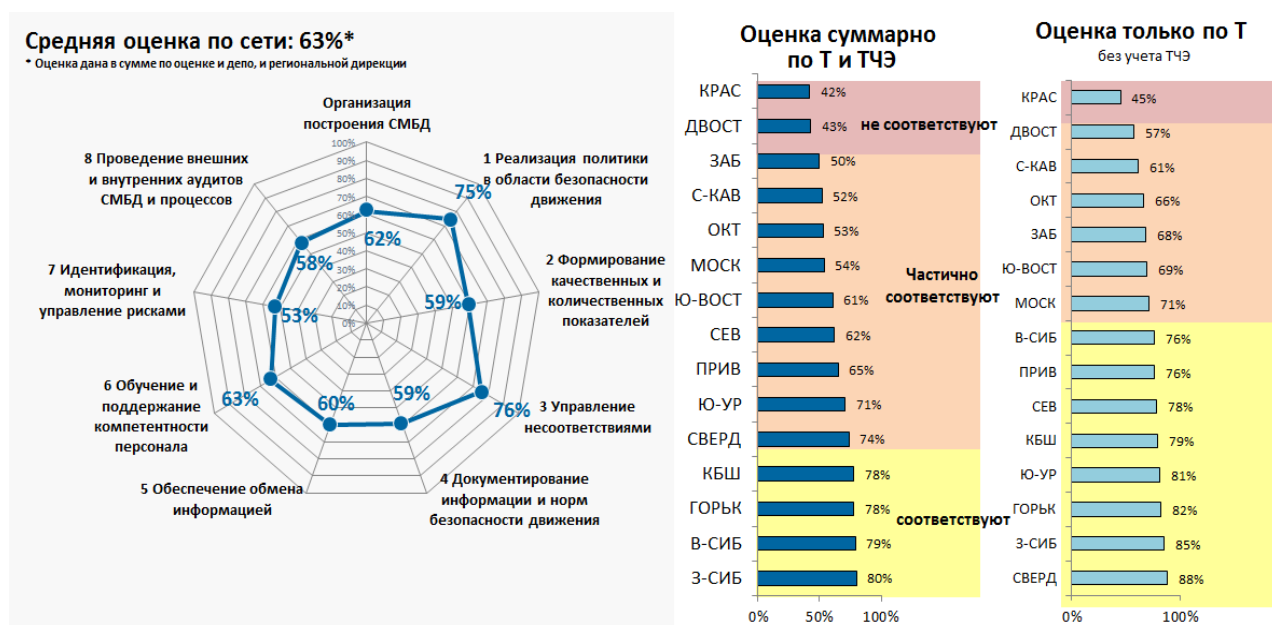


Рисунок 5 – Оценка СМБД в региональных дирекциях тяги и эксплуатационных локомотивных депо [14]

В ходе опроса 14,872 тыс. работников локомотивных бригад 16 региональных дирекций выявлено, что 3 % (446 человек) респондентов указывают на недостаточный уровень знаний нормативной документации, несовершенство системы отбора, обучения и оценки квалификации.

В железнодорожной отрасли действия машиниста определяют не только безопасность, но и энергоэффективность эксплуатации ТПС [86–88]. Плавный разгон и использование рекуперативного торможения позволяют возвращать до 15 % энергии в контактную сеть, что подтверждено опытом эксплуатации электропоездов. Современные системы цифровой поддержки, такие как Railigent (модуль C-DAS), действуют в реальном времени, анализируя данные о профиле пути, нагрузке на двигатель и состоянии инфраструктуры, и дают машинисту рекомендации по оптимальной скорости с целью снижения энергопотребления, износа оборудования и повышения безопасности и плавности хода [89].

Актуальность внедрения системы энергоменеджмента на железнодорожном транспорте обусловлена тем, что ОАО «РЖД» входит в число крупнейших потребителей энергетических ресурсов в России. На рисунках 6, 7 представлены диаграммы, разработанные автором, которые демонстрируют ключевые факторы, дирекции и службы ОАО «РЖД», влияющие на потребление ТЭР [9, 90, 91].

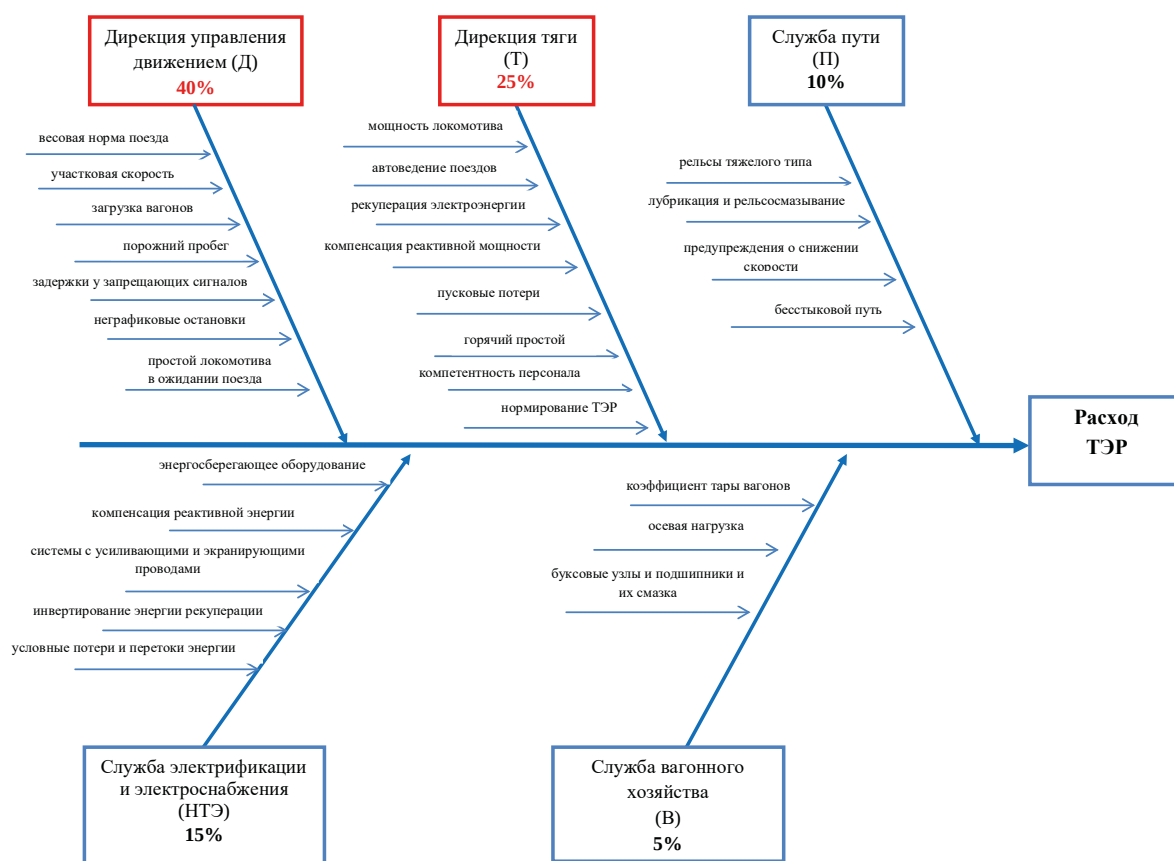


Рисунок 6 – Причинно-следственная диаграмма Исикавы влияния факторов на расход ТЭР

Как видно из данных рисунка 7, наибольшее влияние на энергосбережение в процессе эксплуатации ТПС оказывают 2 функциональных филиала ОАО «РЖД»: Центральная дирекция управления движением (ЦД) и Дирекция тяги (ЦТ). В зоне ответственности ЦД реализуются мероприятия по повышению энергоэффективности за счёт совершенствования технологий эксплуатации ТПС и процессов управления движением: расширяется применение системы построения прогнозных энергосберегающих графиков движения «Эльбрус»,

создаётся единая цифровая платформа координатного управления потоками движения, внедряются технологии тяжеловесного вождения и совершенствуются методы управления на уровне полигона, проводится обучение персонала.

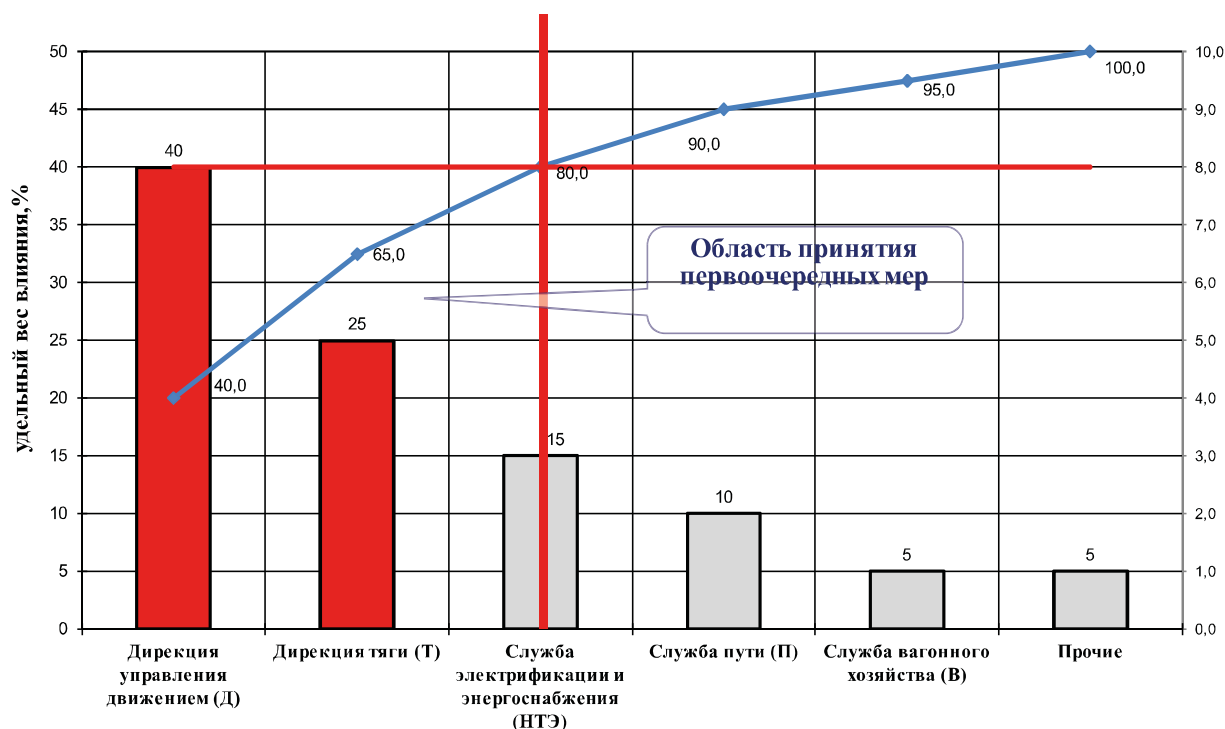


Рисунок 7 – Диаграмма Парето влияния функциональных филиалов ОАО «РЖД» на энергосбережение

В ЦТ применяются современные системы лубрикации в зоне контакта «колесо-рельс», рекуперативное торможение, светодиодное освещение, унифицированная система автоматизированного ведения поездов (УСАВП), тяговые приводы нового поколения, приборы для учёта и анализа энергопотребления, оптимизация работы вспомогательного оборудования, режимно-информационные карты, а также обучение персонала на основе оценки компетенций.

В диссертации А. М. Раковой [86] установлена функциональная связь между показателем квалификации локомотивных бригад и удельным энергопотреблением и сделан вывод о необходимости совершенствования методики прогнозирования расхода электроэнергии на тягу поездов. Исследования и анализ выполненных поездок подтверждают, что в зависимости

от уровня профессионального мастерства машиниста удельный расход энергоносителя может отклоняться от установленной нормы на 10–20 % в сторону как экономии, так и перерасхода [92, 93]. Для минимизации издержек компании на расход ТЭР предложено машинистам с меньшим уровнем квалификации использовать системы автоведения поездов. Для повышения энергоэффективности эксплуатации возможны два взаимодополняющих подхода: оснащение локомотивов УСАВП и проведение обучения по энергосберегающим методам вождения.

Согласно выводам, сделанным в работе Н. Н. Сидоровой [88], в приоритетном порядке необходимо реализовывать организационные мероприятия, направленные на энергосбережение, поскольку они практически не требуют инвестиций. Наибольший эффект следует ожидать от совершенствования системы нормирования энергозатрат, которая структурно содержит три компонента – установление оптимальной нормы, учёт фактического расхода ТЭР и стимулирование, а также обучение локомотивных бригад. При этом уровень квалификации может быть оценён при помощи анализа бортовых средств регистрации параметров движения и работы ТПС.

В диссертации С. П. Железняк [94] в числе определяющих факторов, влияющих на удельный расход ТЭР, указан человеческий фактор: квалификация машиниста, средний стаж работы и его среднеквадратичное отклонение, возраст, физическое и психологическое состояние, в том числе риск искажения информации о фактическом потреблении энергоресурсов, внесённой в маршрут машиниста.

С. В. Малахов в своей работе [95] отмечает, что с ростом опыта машиниста повышается качество ведения поезда, управляющие воздействия машиниста становятся автоматическими и инстинктивными. Он вырабатывает энергооптимальную модель управления ТПС на основе цикла непрерывного обучения и совершенствования навыков и знаний.

Автором настоящего исследования также на практике подтверждено, что значительная экономия электроэнергии может быть достигнута при вождении

неполновесных и неполносоставных поездов за счёт дискретно-адаптивного управления (ДАУ) тяговым электроприводом путём отключения секций электровоза или отдельных ТЭД в зависимости от массы состава. Такая мера, реализованная на участке Батайск – Лихая Северо-Кавказской железной дороги, позволила добиться ощутимого эффекта, особенно при высоком уровне квалификации локомотивных бригад. Данные организационно-технические решения также исследованы в [96, 97].

Таким образом, несмотря на активное внедрение технических и цифровых решений, человеческий фактор продолжает играть немаловажную роль в бесперебойном функционировании системы эксплуатации подвижного состава. Для повышения как безопасности, так и энергоэффективности в процессе эксплуатации ТПС необходимо развивать технологии автоведения и диагностики, внедрять цифровые двойники для мониторинга состояния ТПС, а также системно повышать квалификацию локомотивных бригад, ориентируясь на данные о реальной эксплуатации. Реализация указанных подходов позволит существенно сократить затраты на энергоресурсы и повысить надёжность транспортных средств.

1.3 Модель ведения поезда в системе эксплуатации подвижного состава

Модель ведения поезда – это алгоритм управления движением поезда, реализуемый локомотивной бригадой или автоматизированной системой управления в различных эксплуатационных условиях, включающий в себя закономерности изменения скорости, режимов тяги, выбега и торможения, с учётом профиля пути, сигналов светофоров, расписания и технических ограничений и отказов, направленный на обеспечение безопасности, энергоэффективности и соблюдение графика движения [98–100].

Реализация модели ведения поезда в натурных условиях является важным элементом системы эксплуатации ТПС. Оценка её эффективности требует как имитационного моделирования, так и анализа данных реальной эксплуатации.

Значительный вклад в развитие данной области внесли локомотивные тренажёрные комплексы, позволяющие моделировать значительное количество ситуационных моделей движения различных категорий поездов, фиксировать и анализировать все управляющие воздействия машиниста и параметры безопасности и энергоэффективности при управлении подвижным составом. В настоящее время в ОАО «РЖД» эксплуатируются более 500 тренажёрных комплексов, в том числе 40 различных серий ТПС, моторвагонного подвижного состава и специального самоходного подвижного состава [101, 102]. Система тренажёрной подготовки получила широкое распространение также и в других странах и транспортных отраслях [75, 103]. Так, персонализированные платформы, подобные Siemens Railigent, анализируют стиль управления каждого машиниста и генерируют индивидуальные рекомендации. В Японии для повышения квалификации машинистов сверхскоростных поездов Shinkansen JR East и JR Central внедряют современные VR/AR-технологии. Например, JR East установила тренажёр для отработки аварийных ситуаций в безопасных условиях. Компания считает, что такие симуляторы позволяют моделировать реальные условия эксплуатации и формировать культуру безопасного поведения экипажа [104].

Тренажёрные комплексы обладают высоким уровнем реалистичности и позволяют отрабатывать широкий спектр ситуационных сценариев, однако их информационной базы недостаточно для учёта всего многообразия факторов, влияющих на движение поезда в реальной эксплуатации. В действительности на стиль вождения воздействуют динамические графические задержки, отказы технических средств, переменный род груза, погодные условия, износ инфраструктуры, текущие ограничения скорости и т. д. Следовательно, оценку параметров модели ведения поезда необходимо выполнять в условиях реальной эксплуатации, которая, как правило, затруднительна и осуществляется на основе анализа эмпирических данных, получаемых с бортовых средств регистрации.

Исторически методы оценки управления поездом развивались параллельно с совершенствованием средств регистрации и диагностирования параметров

движения и технического состояния ТПС. На ранних этапах контроля за эксплуатацией локомотивов основным источником информации служили ленты механических и электромеханических самописцев, установленных в кабинах машинистов. На этапе ручной расшифровки интерпретация информации с самописцев осуществлялась техниками-расшифровщиками, которые с помощью линеек, шаблонов и таблиц проводили визуальный анализ бумажных диаграмм. В процессе кропотливой работы специалисты выявляли нарушения в управлении тормозами, грубые ошибки в технологии вождения и несоблюдение перегонного времени хода. Однако такой подход был крайне трудоёмким, субъективным и не позволял обеспечить полноту анализа из-за фиксации ограниченного количества параметров. Кроме того, выявление отклонений в режимах работы оборудования или продольно-динамических реакций было невозможным. С переходом к цифровым устройствам регистрации появилась возможность собирать значительно больше параметров движения и технического состояния локомотива. Это дало импульс к развитию автоматизированных систем обработки данных. Одной из первых таких систем учёта, анализа и расследования нарушений безопасности движения стала АСУНБД и её усовершенствованная версия АСУНБД-2, в которых реализованы функции централизованного сбора, хранения и анализа информации со средств регистрации. АСУНБД-2 позволяет автоматически выявлять нарушения, связанные с превышением скорости, несоблюдением сигналов светофоров, неправильным использованием тормозных устройств и режимов тяги. Система формирует отчёты, выявляет типовые и системные нарушения. Параллельно развивались и специализированные системы мониторинга и анализа технического состояния ТПС. Так, МСУД и её модификации не только управляют работой силовой установки, но и производят регистрацию параметров эксплуатации, тягового оборудования, а также диагностику систем управления ТПС [105]. Современные программные комплексы позволяют автоматически расшифровывать эти данные и выявлять нарушения режимов эксплуатации локомотива. Аналогичный эволюционный путь прошли системы сбора, обработки, анализа и формирования технических норм

удельного потребления энергоресурсов на тягу поездов и маневровую работу – от простых ручных расчётов и опытных норм до интеллектуальных цифровых моделей, на основе информации средств ресурсосбережения ТПС (подробно будут рассмотрены в следующем подразделе).

Таким образом, современная практика расшифровки параметров движения перешла от субъективной ручной интерпретации к комплексному цифровому мониторингу и анализу, позволяющему централизованно контролировать и объективно оценивать действия локомотивных бригад, состояние ТПС, выявлять технические неисправности и потенциальные отказы на ранних стадиях, а также формировать обоснованные рекомендации для повышения эффективности эксплуатации ТПС, в том числе надёжности и энергоэффективности. Эволюция этих систем играет ключевую роль в построении цифровой модели эксплуатации локомотивов, где каждый параметр становится объектом анализа и принятия решений в реальном или близком к реальному времени. Это, в свою очередь, закладывает основу для перехода к предиктивной модели обслуживания и эксплуатации подвижного состава [106, 107].

Современные системы эксплуатации ТПС прошли значительную эволюцию благодаря внедрению технологий регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния локомотивов. В условиях перехода от регламентно-инструктивных к адаптивно-цифровым подходам к управлению возрастает роль объективной информации, получаемой от средств регистрации параметров в процессе эксплуатации ТПС. Эти технологии становятся основой для оптимизации управления, прогнозирования отказов, повышения безопасности и энергоэффективности эксплуатации локомотивов. Ранее основным источником информации об эксплуатационных параметрах в процессе ведения поезда служили данные маршрутных листов, записи машиниста-инструктора (его субъективные наблюдения в процессе выполнения контрольных поездок), а также результаты расшифровки информации лент скоростемеров, которые имели достаточно маленький объём информации (ЗСЛ2М – 8 параметров). В условиях цифровой трансформации на смену этим методам пришло объективное

телеметрическое наблюдение, обеспечиваемое средствами регистрации: КЛУБ-У, БЛОК, КПД-3, САУТ-ЦМ, КИО-САУТ, МСУД, МСУТП, УСАВП и др. Эти системы предоставляют объективные данные о реализуемой модели ведения поезда, что позволяет оценить выполненные поездки в реальных эксплуатационных условиях.

В условиях цифровой трансформации и развития технологий автоматизированного управления транспортом возникает возможность использования данных бортовых систем локомотива для оценки реализуемых моделей ведения поезда с целью обучения локомотивных бригад, а также для обучения самих автоматизированных систем, включая системы автоведения, предиктивной диагностики, а также нейросетевых моделей, применяемых в рамках искусственного интеллекта [108–111]. Данные, получаемые с бортовых регистраторов, становятся ключевым элементом единой обучающей среды, охватывающей как локомотивные бригады, так и интеллектуальные системы управления. Этот подход позволяет не только повысить безопасность и энергоэффективность, но и подготовить основу для создания автономных или полуавтономных систем ведения поездов в будущем [112–114].

Параллельно осуществляется переход от традиционных методов подготовки кадров к информационно-ориентированным моделям профессионального развития в условиях цифровой трансформации железнодорожной отрасли на основании разработанного в 2020 году стратегического документа – Программы развития человеческого капитала ОАО «РЖД» до 2025 года [115]. Ключевой принцип Программы заключается в том, что эффективность эксплуатации подвижного состава напрямую зависит от степени интеграции объективных эксплуатационных данных в процессы оценки, обучения и управления квалификацией локомотивных бригад. Задача Программы заключается не только в формальном повышении квалификационного уровня работников, но и в создании замкнутого цикла управления знаниями, включающего сбор, анализ и интерпретацию информации с бортовых регистраторов, дальнейшее формирование персонализированных образовательных маршрутов и постоянную

актуализацию требований к профессиональным компетенциям с учётом реальной производственной деятельности [116, 117]. Применение аналитических инструментов и методов машинного обучения позволяет осуществлять объективную диагностику профессиональных навыков, выявлять типовые и индивидуальные недостатки в знаниях, а также прогнозировать потенциальные риски, связанные с человеческим фактором. Кроме того, данная Программа закладывает основу для интеграции технологий интеллектуального анализа данных в процессы корпоративного обучения. На практике это выражается в использовании телеметрических данных и цифровых следов деятельности локомотивных бригад для автоматизированного формирования рекомендаций по дополнительной подготовке, разработки адаптивных курсов, а также создания эталонных моделей ведения поезда на различных типах маршрутов и подвижного состава. Таким образом, Программа развития человеческого капитала не только модернизирует подходы к обучению, но и формирует методологическую базу для построения интеллектуальных систем управления знаниями в отрасли.

В условиях активной цифровизации железнодорожной отрасли существенно возрастает значение изучения и анализа моделей ведения поезда как ключевого инструмента повышения надёжности, энергоэффективности и безопасности эксплуатации подвижного состава. Благодаря развитию средств регистрации параметров движения и технического состояния ТПС появилась возможность получать объективные данные о реальных режимах управления локомотивами. Это позволило перейти от эмпирического подхода к научно обоснованному анализу алгоритмов ведения поездов с учётом профиля пути, характеристик тягового подвижного состава, сигнализации, инфраструктурных ограничений и графика движения. Ранее модели ведения поезда формировались преимущественно в ходе опытных поездок, проводимых машинистами-инструкторами совместно с локомотивными бригадами. Основываясь на собственном опыте и профессиональных интуитивных представлениях, они предлагали алгоритмы управления, которые зачастую не являлись энергооптимальными. Оценка продольно-динамических реакций в этих условиях

была затруднена из-за отсутствия средств регистрации соответствующих параметров. Фактический контроль производился лишь эмпирически – по субъективной оценке машиниста локомотива по динамическим ударам и оттяжкам, возникающим в голове состава. При этом оценка происходящего в середине или хвостовой части поезда практически исключалась. Позднее стали применяться динамометрические испытания с использованием тягово-энергетических вагонов, однако и в этом случае данные регистрировались лишь в ограниченном сегменте поезда. Полученные результаты обобщались в виде информационно-режимных карт, которые передавались машинистам для следования определённой модели ведения [118, 119]. Однако такие модели оставались статичными: они не учитывали изменчивость эксплуатационной обстановки, смену сигналов светофоров, особенности графика движения, род перевозимого груза или актуальные инфраструктурные ограничения. Переход к цифровым технологиям, внедрение средств регистрации параметров движения и технического состояния локомотивов, развитие методов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования позволяют реализовать принципиально новый подход. Появилась возможность формировать адаптивные модели ведения поезда, учитывающие широкий спектр факторов в реальном времени [120]. Эти модели подлежат изучению, оценке и корректировке на основе эмпирических данных и накопленных знаний, что обеспечивает высокую точность управления, минимизацию энергозатрат и рост эксплуатационной надёжности.

Полученные телеметрические данные подвергаются последующей обработке с использованием методов интеллектуального анализа, статистической фильтрации и сравнения с расчётной или эталонной моделью. Ключевыми метриками оценки соответствия модели ведения поезда нормативным или эталонным траекториям выступают:

- интегральные параметры (время рейса, расход энергии, частота переходов между режимами);

- динамические отклонения от рекомендуемых траекторий (пики ускорений, избыточные торможения, перегрузки);
- частотный анализ управляющих воздействий (наличие высокочастотных отклонений, свидетельствующих о неустойчивом стиле управления);
- статистические показатели повторяемости и предсказуемости поведения при многократном проходе одного и того же участка пути.

Полученные оценки становятся основой для построения персонализированных профилей управления, которые могут быть использованы как для последующего анализа и оптимизации режимов эксплуатации, так и для автоматизированной адаптации программ обучения или автоматизированных систем с самообучением. Модели ведения поезда в цифровом формате могут использоваться при проектировании систем автоматического и полуавтоматического управления (например, УСАВП, МСУД), а также служить эталоном для оценки профессиональной деятельности локомотивных бригад [121, 122]. При этом моделирование охватывает не только стандартные режимы движения, но и реакции на аварийные или нестандартные ситуации, что особенно важно при разработке сценариев адаптивного или интеллектуального управления движением поездов, приближённого к реальному физическому объекту и внешней среде.

Таким образом, интеграция данных бортовых средств в систему оценки модели ведения поезда и обучения создаёт замкнутый цикл: данные → анализ → оценка → обучение человека и машин → оптимизация эксплуатации. Этот подход не только устраняет текущие недостатки, но и превращает обучение в инструмент непрерывного совершенствования, соответствующий стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД». Перспективным направлением представляется формирование «цифровых профилей» моделей ведения поездов, интегрирующих сведения о локомотивных бригадах, прошедших оценку в соответствии с концепцией единых корпоративных требований (ЕКТ), и данные бортовых систем регистрации, что заложит основу для «умного» железнодорожного транспорта будущего [123].

1.4 Методы технического нормирования энергопотребления и рекуперации в системе эксплуатации локомотивов на основе регистрируемых параметров

Наряду с вопросом изучения и улучшения моделей ведения поезда, критически важным элементом снижения энергоёмкости в системе эксплуатации ТПС остаётся совершенствование процессов технического нормирования расхода и возврата энергоносителей на тягу поездов и маневровую работу. Эволюция методов нормирования демонстрирует как прогресс, так и системные ограничения, требующие интеграции современных технологий диагностики и анализа данных. Исторически система нормирования расхода ТЭР на железнодорожном транспорте прошла путь развития от простых расчётных схем к современным автоматизированным системам, использующим данные средств регистрации параметров движения, систем диагностики и мониторинга технического состояния ТПС.

Первоначально система нормирования основывалась на расчётно-табличных методах, изложенных в приказе МПС СССР № ЦТД-26 от 1977 года [124]. Методика предусматривала расчёт плановых норм ТЭР на базе удельных расходов в предшествующем отчётном «базисном» периоде с использованием корректирующих коэффициентов, отражающих влияние нормообразующих факторов. Положительными сторонами данной системы являлись структурированность подхода, возможность применения на уровне депо или железной дороги, а также относительная простота расчётов. Однако методика опиралась на обобщённые параметры условного «осреднённого» локомотива и постоянные значения коэффициентов, что ограничивало её применимость при анализе энергопотребления конкретных рейсов. Так, влияние температурного режима учитывалось через фиксированный коэффициент, без учёта климатических особенностей регионов и сезонов. Кроме того, метод не предусматривал точной оценки технического состояния локомотива, несмотря на его значительное влияние на удельный расход ТЭР, что приводило к высоким погрешностям и ограничивало возможности применения в оперативной работе.

Анализ научных трудов В. Е. Розенфельда и С. И. Осипова показал, что на расход энергии существенное влияние оказывают такие факторы, как продольный профиль пути, длина перегонов, режимы тяги и торможения, техническое состояние локомотивов и вагонов. При этом использование усреднённых расчётов неизбежно приводит к отклонениям от фактических показателей, особенно в условиях сложного рельефа и неоднородных эксплуатационных условий [125, 126].

Следующий этап развития методик нормирования характеризуется внедрением статистических подходов на основе анализа данных маршрутов машинистов. В рамках научных исследований, проводимых в МИИТе, ОмГУПСе и других отраслевых институтах, нормирование стало рассматриваться как задача множественного корреляционно-регрессионного анализа для учёта воздействия множества факторов на удельный расход ТЭР. Применение статистических методов позволило отказаться от «осреднённого» подхода и учитывать реальное влияние эксплуатационных параметров, таких как масса поезда, уклон пути, погодные условия и техническое состояние подвижного состава. Тем не менее, ограничения также сохранялись, точность моделей зависела от объёма и достоверности входных данных, выборка маршрутов требовала исключения аномалий и выбросов, а сами регрессионные зависимости могли терять актуальность при изменении эксплуатационной среды.

Значительный вклад в теоретическое развитие адаптивных подходов к нормированию внесла диссертация Н. Н. Сидоровой [88], в которой энергопотребление рассматривалось как интегральный показатель, формируемый совокупностью эксплуатационных, технических и организационных факторов. В рамках исследования было показано, что энергоэффективность является функцией не только технического состояния подвижного состава, но и таких факторов, как организация графика движения, использование режимов рекуперации, характер профиля пути и условия вождения. Автор обосновала необходимость перехода от жёстких нормативов к адаптивным системам расчёта, способным гибко реагировать на изменения условий эксплуатации. В

аналогичном направлении развивались исследования Б. Б. Альжанова [127], в которых нормирование электроэнергии в грузовом движении на сети железных дорог Казахстана осуществлялось с применением регрессионного анализа данных маршрутов машинистов. Существенным достижением автора стало внедрение кластеризации маршрутов в зависимости от рельефа – горные и равнинные участки рассматривались отдельно, что позволило значительно повысить точность расчётов. Помимо массы состава и температуры, учитывались такие параметры, как осевая нагрузка, длительность работы в режимах рекуперации и тип тягового подвижного состава.

Особое значение в развитии методологии нормирования имели работы Л. А. Мугинштейна и соавторов [128–131], в которых были предложены методы расчёта удельного расхода ТЭР с использованием математических моделей, основанных на принципе оптимизации движения поездов. С применением принципа максимума Понтрягина было возможно перераспределять время хода по участкам, минимизируя расход энергии за счёт рационального использования инерционных свойств подвижного состава. Разработанные подходы легли в основу программного комплекса автоматизированного рабочего места (АРМ) «Теплоэнергетика», позволив автоматизировать анализ расхода ТЭР и нормирование на уровне эксплуатационного локомотивного депо.

Значительный практический интерес представляют результаты диссертации С. П. Железняк [94], в которой реализован многофакторный подход к нормированию с учётом реальных эксплуатационных и климатических условий. Модель включала параметры износа оборудования, технические характеристики локомотивов, массу и длину состава, данные метеонаблюдений и показатели маршрутов. Применение алгоритмов фильтрации аномалий позволило достичь высокой точности обработки информации (погрешность менее 5 %). Для построения модели использовались данные из маршрутных листов машинистов, показания средств регистрации параметров движения (АСК ВИС, РПРТ), а также классификация по сезонам и типу маршрутов.

В свою очередь, в работе С. А. Маринина [132] предложена оригинальная методика расчёта норм для электровозов переменного тока с учётом пульсаций напряжения в контактной сети, что ранее не учитывалось в нормативных системах. В рамках исследования была создана многоуровневая адаптивная модель, корректирующая значения норм в реальном времени в зависимости от массы состава, уклона, климатических факторов и колебаний напряжения. Верификация проведена на базе депо Красноярск, результаты показали снижение отклонений в расчётах до 20 % и сокращение пикового потребления энергии на 12–15 % за счёт оптимизации режимов тяги. Несмотря на определённые ограничения (не учитывался эффект ветровой нагрузки и особенности «стоп-стартовых» участков), модель продемонстрировала эффективность для внедрения.

Современный этап развития нормирования характеризуется внедрением интеллектуальных систем, использующих методы машинного обучения. Так, в диссертационной работе С. В. Малахова [95] разработан адаптивный алгоритм, объединяющий элементы классического моделирования и машинного обучения (в частности, градиентный спуск), что позволило учитывать широкий спектр факторов: сцепление колёс с рельсами, аэродинамические потери, динамику напряжения в контактной сети и погодные условия. Алгоритм тестировался на данных электровозов серий ЭП20 и 2ЭС6, с дискретностью сбора телеметрических данных до 0,1 секунды. Результаты показали высокую точность моделирования и потенциал применения в системах предиктивного нормирования, а также для построения цифровых двойников маршрутов.

Современная система технического нормирования расхода ТЭР в эксплуатационных локомотивных депо представляет собой комплекс методов, сочетающих традиционные подходы с элементами цифровизации. Её функционирование обеспечивается взаимодействием централизованного планирования, автоматизированных систем и ручных корректировок, однако сохраняются проблемы, связанные с точностью данных, гибкостью алгоритмов и человеческим фактором. Планирование расхода ТЭР, включая электроэнергию с учётом небаланса, осуществляется Департаментом экономики ОАО «РЖД» в

разрезе всех видов движения и маневровой работы филиалов с детальной проработкой по региональным дирекциям и сводом по полигонам железных дорог. При этом учитываются плановые объёмы перевозочной работы, распределение расхода ТЭР по направлениям, а также отдельные объёмы, выполняемые для акционерного общества «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК») и других перевозчиков [133–136]. В региональных дирекциях тяги разработка норм удельного расхода ТЭР для локомотивных бригад возлагается на машинистов-инструкторов или инженеров по теплотехнике. Классификация норм удельного расхода ТЭР представлена на рисунке 8 [133].

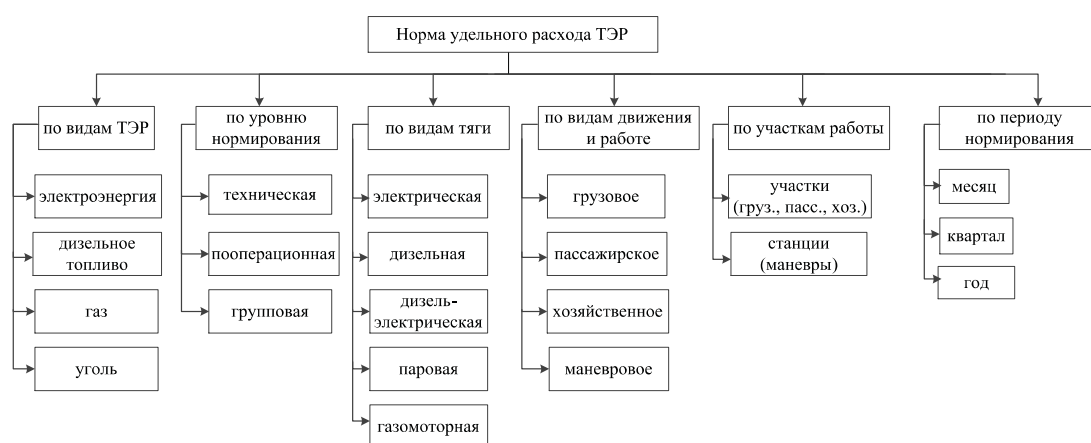


Рисунок 8 – Классификация норм удельного расхода ТЭР

Основой нормирования по поездкам служит задание «основных норм» удельного расхода ТЭР, соответствующих определённым значениям осевой нагрузки, а также «дополнительных» норм по каждому элементу нормирования, число которых может достигать нескольких десятков. Право расхода ТЭР за поездку формируется из суммы произведения фактического объёма перевозочной работы за эту поездку на соответствующую техническую норму удельного расхода ТЭР и расхода ТЭР на выполнение технологических операций, не предусмотренных графиком движения поездов. Расчёт ведётся на основании маршрутных листов машинистов со средневзвешенным уровнем квалификации, что, как правило, увеличивает расчётное значение общего лимита ТЭР для депо и эксплуатационных расходов.

По результатам эксперимента, проведённого автором в эксплуатационном локомотивном депо Лихая, было выявлено, что при переводе машинистов с пассажирского вида движения на грузовой и обратно фактическое потребление электроэнергии увеличивалось до 12 %. Данный эффект обусловлен нарушением устойчивости сформированной модели ведения поезда, адаптированной к специфике определённого режима движения. При смене условий эксплуатации (профиля пути, массы состава, требований к скорости и графику) машинисту требуется время на перестройку индивидуального алгоритма управления – новой модели ведения поезда, соответствующей изменившимся параметрам движения. В этот переходный период снижается энергетическая эффективность и возрастает вероятность отклонений от оптимальных режимов управления. Плановые нормы расхода ТЭР используются для определения потребности в энергоресурсах структурных подразделений в соответствии с планируемым объёмом перевозок с учётом потерь в системах электроснабжения (небаланса) [137–139]. Техническая норма рассчитывается на единицу перевозочной работы, выполняемой ТПС на конкретном участке, а пооперационная норма отражает затраты энергоресурсов на отдельные технологические операции, такие как нагон опоздания, соблюдение временных ограничений скорости, отопление вагонов, маневровая работа, простой на станции и в депо и другие. Для электрифицированных участков наряду с технической нормой устанавливается норматив удельной рекуперации электроэнергии, который зависит от наличия и исправности оборудования рекуперативного торможения на ТПС, климатических условий и других факторов [140, 141]. Например, как показывает практика автора, на энергоёмких уклонах возможно вернуть до 15–20 % затраченной электроэнергии, однако в существующих методиках этот потенциал учитывается фрагментарно.

При разработке технических и пооперационных норм основой служат следующие данные: результаты измерений тягово-энергетической лаборатории на участке; результаты опытных поездок с участием машинистов, демонстрирующих лучшие показатели расхода ТЭР; анализ фактического расхода ТЭР из маршрутов машинистов с наилучшей экономией; а также расчётные данные, полученные с

использованием моделей [142]. Разработанные нормы группируются по видам тяги и движения в табличном виде. Для их введения в автоматизированную систему централизованной обработки маршрута машиниста (ЦОММ) используется перечень нормативно-справочной информации, при этом шаблон предусматривает построение кривой норматива расхода с 2–5 точками зависимости нормы от осевой нагрузки или веса поезда, что в ряде случаев может привести к искажению планового показателя при расчёте по промежуточным значениям. Система нормирования предусматривает также установление дифференцированных норм для ТПС, оборудованных системами ресурсосбережения, и для отдельных категорий пассажирских поездов в зависимости от скорости движения.

Нормы расхода ТЭР обновляются ежеквартально, проверяются ежедекадно и корректируются при утрате актуальности, обусловленной, например, изменением весовых норм поездов, скоростей движения, серий локомотивов, профиля пути, модернизацией техники, внедрением энергосберегающих технологий; при превышении отклонения фактического расхода от нормируемого более чем на 5 %, а также по другим критериям [143]. Практика показывает, что при существующей системе нормирования значителен риск появления замечаний при обработке маршрутов, в том числе при следовании поездов по неполным участкам или при работе с неисправными приборами учёта ТЭР. По итогам 2023 года на Северо-Кавказской железной дороге с замечаниями было обработано более 29 % маршрутов, что снижает объективность нормирования. Нормы, как правило, устанавливаются на полный поезд-участок, что не позволяет дифференцировать расход по отдельным перегонам и анализировать профессионализм локомотивных бригад в динамике. Для мониторинга фактического расхода электроэнергии и топлива используются системы учёта и энергосбережения, такие как счётчики электроэнергии, УСАВП, РПРТ, АПК «БОРТ», АСК ВИС, а также топливомерные линейки и стёкла на тепловозах. Информация фиксируется в маршрутах машинистов, бортовых журналах технического состояния локомотива (форма ТУ-152) и «теплотехнических

дневниках». Эффективность использования ТЭР анализируется на всех уровнях управления, включая сравнение фактического расхода с нормируемыми значениями и оценку экономии или перерасхода энергоресурсов [144, 145]. Основным показателем для эксплуатационных локомотивных депо является выполнение норм удельного расхода электроэнергии и дизельного топлива в целом по видам движения и маневровой работе с учётом небаланса и рекуперации. Для локомотивных бригад показатель результативности рассчитывается как разница между фактическим расходом и правом на его использование за поездку и отчётный период. Для профилактики перерасхода назначаются целевые поездки, тренировки на тренажёрах, включение в группу риска и контроль ведения «теплотехнических дневников» [146]. Оценка расхода, основанная на сравнении с расчётным правом, корректируется машинистом-инструктором. При превышении допустимых пределов результаты ограничиваются установленными процентными значениями, что приближает нормируемый расход к фактическому. Если нормы по операциям отсутствуют, право расхода принимается равным фактическому или усреднённому по депо. Таким образом, ограничениями системы нормирования являются недостаточная автоматизация и высокая зависимость от квалификации инструктора, который может корректировать исходные данные, что снижает объективность нормирования.

Таким образом, система нормирования ТЭР в железнодорожной отрасли прошла путь от простых статичных методов к многофакторным адаптивным моделям, ориентированным на анализ телеметрических данных, учёт эксплуатационных условий и применение интеллектуальных алгоритмов. В условиях цифровизации железнодорожного транспорта перспективным направлением развития системы технического нормирования расхода ТЭР является переход к дифференцированному и пооперационному нормированию с учётом конкретных условий движения, технического состояния локомотива и квалификации машиниста. Использование объективной информации, получаемой со средств регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга,

позволяет значительно повысить точность и обоснованность нормативов, исключив влияние человеческого фактора. Особое значение приобретает анализ лучших практик управления локомотивом, формируемых на основе данных высококвалифицированных машинистов. Интеграция этих решений в единое цифровое пространство ОАО «РЖД» открывает возможности для создания интеллектуальной, адаптивной системы нормирования, обеспечивающей устойчивое энергосбережение и повышение эффективности функционирования системы эксплуатации подвижного состава.

Выводы по главе 1

1. Проведённые обзор и анализ показали, что приоритетными направлениями для транспортной отрасли являются вопросы обеспечения необходимого уровня безопасности, надёжности, энергоэффективности при эксплуатации транспортных средств, в том числе и железнодорожного транспорта, а также снижения влияния человеческого фактора.

2. Для объективной и комплексной оценки соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава необходимо сочетать аналитические инструменты с информацией бортовых систем регистрации параметров эксплуатации локомотивов.

3. В настоящее время остаётся актуальным вопрос оперативной оценки и анализа соблюдения норм и правил при эксплуатации ТПС локомотивными бригадами и выявления причин возникновения критических продольно-динамических реакций в поезде во всех режимах управления ТПС.

4. Анализ данных, полученных средствами регистрации параметров эксплуатации локомотивов, открывает новые возможности по совершенствованию системы технического нормирования потребления и возврата энергоресурсов на тягу поездов и маневровую работу, что позволит повысить точность определения и обоснованность предоставления общего лимита ТЭР для депо.

2 Исследование теоретических подходов и разработка методики оценки модели ведения поезда при эксплуатации тягового подвижного состава

2.1 Критерии оценки модели ведения поезда

Одним из перспективных направлений исследований в системе эксплуатации подвижного состава является совершенствование технологии эксплуатации ТПС на основе оценки и применения модели ведения поезда. Такая модель формируется с учётом анализа реальных поездок посредством расшифровки данных бортовых регистраторов параметров движения и технического состояния ТПС, а также алгоритмов управления, реализуемых локомотивными бригадами. Как было показано в первой главе, на сегодняшний день собирается достаточно большой объём информации об эксплуатации подвижного состава, который необходимо использовать для решения поставленных задач в части объективной оценки и оптимизации модели ведения поезда с учётом комплекса эксплуатационных критериев. Модель ведения поезда характеризуется рядом технических, энергетических и эксплуатационных параметров, отражающих эффективность, безопасность и соответствие установленным режимам работы ТПС. Критерии, влияющие на формирование модели, и источники соответствующих данных представлены в таблице 1.

Параметр «Безопасность движения и эксплуатации подвижного состава» является приоритетным в ОАО «РЖД», поскольку напрямую связан с обеспечением сохранности грузов, транспортной инфраструктуры, экологической безопасности, а также с защитой жизни и здоровья людей, в частности пассажиров. Его оценка осуществляется комплексно на основе анализа следующих критериев: случаев транспортных происшествий (крушения, аварии и др.), событий (инцидентов), связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта (проезд подвижным составом запрещающего показания светофора, саморасцеп автосцепок в поездах, развал груза в пути следования и др.), отказов технических средств (ОТС) 1–3-й

категорий, нарушений при управлении автотормозами и пользовании приборами безопасности (грубые и прочие) [147–149].

Таблица 1 – Критерии оценки модели ведения поезда при эксплуатации ТПС

№	Критерии	Структурные компоненты	Источники информации
1	Безопасность движения и эксплуатации подвижного состава	Транспортные происшествия, события, связанные с нарушением правил безопасности движения, ОТС (1–3-й категорий), нарушения при управлении тормозами (грубые, прочие).	КЛУБ-У, БЛОК, САУТ-ЦМ, УСВП и др. АСУ ЖТ: КАСАНТ, АСУНБД, АС РБ, ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и др.
2	Технологическая стабильность (точность исполнения технологического процесса эксплуатации ТПС)	Технологические нарушения (1–2-й категорий)	АСУ ЖТ: КАСАНТ, ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и др.
3	Надёжность эксплуатации ТПС (соблюдение режимов эксплуатации ТПС)	Нарушения режимов эксплуатации локомотивов	МСУД, МПСУ, САУТ-ЦМ, КЛУБ-У, БЛОК. АСУ ЖТ: АСУНБД
4	Точность хода по расписанию (точность управления с целью соблюдения расписания)	Соблюдение нормативного времени хода по участку (перегону)	АСУ ЖТ: КАСАНТ, АСУНБД, ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и др.
5	Энергоэффективность режима ведения	Потребление и возврат (рекуперация) ТЭР на тягу поездов и маневровую работу	УСВП, РПРТ, АПК «БОРТ», АСК ВИС, АСУ ЖТ: КИХ SAS, ЦОММ и др.
6	Продольная динамика (плавность хода подвижного состава, комфортность перевозки пассажиров).	Продольно-динамические реакции в поезде, их критические значения в различных режимах управления ТПС	Имитационная модель поезда на основе синтеза ПК «Универсальный механизм» и MATLAB/Simulink

В настоящей главе предлагается методология комплексной оценки модели ведения поезда по указанным критериям с использованием математического аппарата нечёткой логики [150, 151].

2.2 Формализация задачи повышения эффективности эксплуатации подвижного состава на основе анализа информации о выполненных поездках

Одна из приоритетных задач, направленных на совершенствование технологии и повышение эффективности эксплуатации ТПС, может быть сформулирована как задача о рациональном выборе модели ведения поезда (назначении локомотивной бригады или определённого алгоритма автоматизированной системы ведения) на рейс в зависимости от категории поезда и типа перевозимого груза на основе анализа информации о выполненных поездках.

В такой постановке она может рассматриваться как многокритериальная задача принятия решений, при которой необходимо из множества доступных моделей ведения поезда выбрать наилучшие варианты для соответствующих планируемых рейсов, обеспечив их оптимальное сопоставление с учётом заданных условий и факторов [152].

Дано множество вариантов моделей ведения поезда, реализуемых локомотивными бригадами (автоматизированной системой ведения):

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_N\}, i = \overline{1:N}, \quad (1)$$

где m_i – i -я модель ведения поезда;

$N = |M|$ – число моделей ведения поезда;

Множество планируемых рейсов:

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_L\}, j = \overline{1:L}, \quad (2)$$

где z_j – j -й планируемый рейс (категория поезда, маршрут, масса, профиль);

$L = |Z|$ – число планируемых рейсов, причём $L \leq N$.

Требуется найти оптимальное соответствие (отображение):

$$h: Z \rightarrow M; h = (z_j, m_i) |_{i \in (1:N); j \in (1:L)}; h \subseteq Z \times M, \quad (3)$$

где h – искомое оптимальное соответствие или инъективное отображение множества Z на множество M ;

(z_j, m_i) – множество пар «планируемый рейс – модель ведения»;

$Z \times M$ – декартово произведение множеств Z и M .

Данная задача имеет множество решений N_h , которое при заданных Z и M может быть оценено как размещение из L различных элементов, выбранных из общей совокупности в N элементов:

$$N_h = A_N^L = \frac{N!}{(N-L)!}, \quad (4)$$

причём если число планируемых рейсов равно числу доступных моделей ведения $|M| = |Z|$, то N_h может быть оценено как число перестановок P_z из L элементов: $N_h = P_z = L!$.

Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена тем, что различные категории поездов (пассажирские, грузовые, хозяйственные и др.) характеризуются своими особенностями и приоритетами по частным критериям качества управления. Например, для пассажирских поездов с организованными группами детей («детские») основное внимание уделяется безопасности, комфортности и точности соблюдения расписания. Для грузовых соединённых поездов ключевым критерием является минимизация продольно-динамических реакций для предотвращения обрыва автосцепных устройств и схода подвижного состава [153, 154].

Ранжирование критериев оценки моделей ведения поезда в зависимости от категорий поездов разработано автором и представлено в таблице 2. Категории поездов приведены согласно [155, 156], с использованием следующих обозначений:

– **пассажирские поезда:** п. 1 – поезда с организованными группами детей (детские); п. 2 – высокоскоростные, скоростные, скорые и пригородные; п. 3 – людские, грузопассажирские, почтово-багажные; п. 4 – прочие, в том числе пригородные (за исключением п. 1–3);

– **грузовые поезда:** гр. 1 – соединённые; гр. 2 – повышенной длины 350–520 осей; гр. 3 – тяжеловесные 8000–9000 тонн и более; гр. 4 – контейнерные, рефрижераторные; гр. 5 – прочие (за исключением гр. 1–4);

– **хозяйственные поезда:** хоз. 1 – восстановительные; хоз. 2 – пожарные; хоз. 3 – прочие (за исключением хоз. 1–2).

Таблица 2 – Ранжирование критериев модели ведения поезда в зависимости от категорий поездов

№	Критерий модели ведения поезда	Категория поезда											
		Пассажирский (п.)				Грузовой (гр.)					Хозяйственный (хоз.)		
		1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3
1.1	Транспортные происшествия	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2	События	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1.3.1	ОТС 1-й категории	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1.3.2	ОТС 2-й категории	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1.3.3	ОТС 3-й категории	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1.4.1	Нарушения при управлении тормозами (грубые)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
1.4.2	Нарушения при управлении тормозами (прочие)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2.1	Технологические нарушения 1-й категории	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
2.2	Технологические нарушения 2-й категории	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
3	Нарушения режимов эксплуатации ТПС	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
4	Точность хода по расписанию	12	11	13	12	13	13	13	11	13	11	11	12
5	Энергоэффективность	13	13	11	13	12	12	12	12	12	12	12	11
6	Продольная динамика (плавность хода)	11	12	12	11	11	11	11	13	11	13	13	13

Приоритетность критериев модели ведения поезда в зависимости от категории определяется шкалой от 1 до 13, где 1 соответствует наивысшей значимости, а 13 – наименьшей. Наивысший приоритет отведён пассажирским поездам с организованными группами детей («детским»). Наименьший приоритет установлен для прочих хозяйственных поездов, в управлении которыми допускается большая гибкость.

Анализ практики назначения локомотивных бригад на конкретные рейсы в зависимости от реализуемых моделей вождения поездов в эксплуатационных локомотивных депо позволил автору на основе метода экспертных оценок сформулировать эвристический алгоритм, отражающий типичный подход, применяемый машинистами-инструкторами при управлении локомотивными бригадами (рисунок 9) [157].

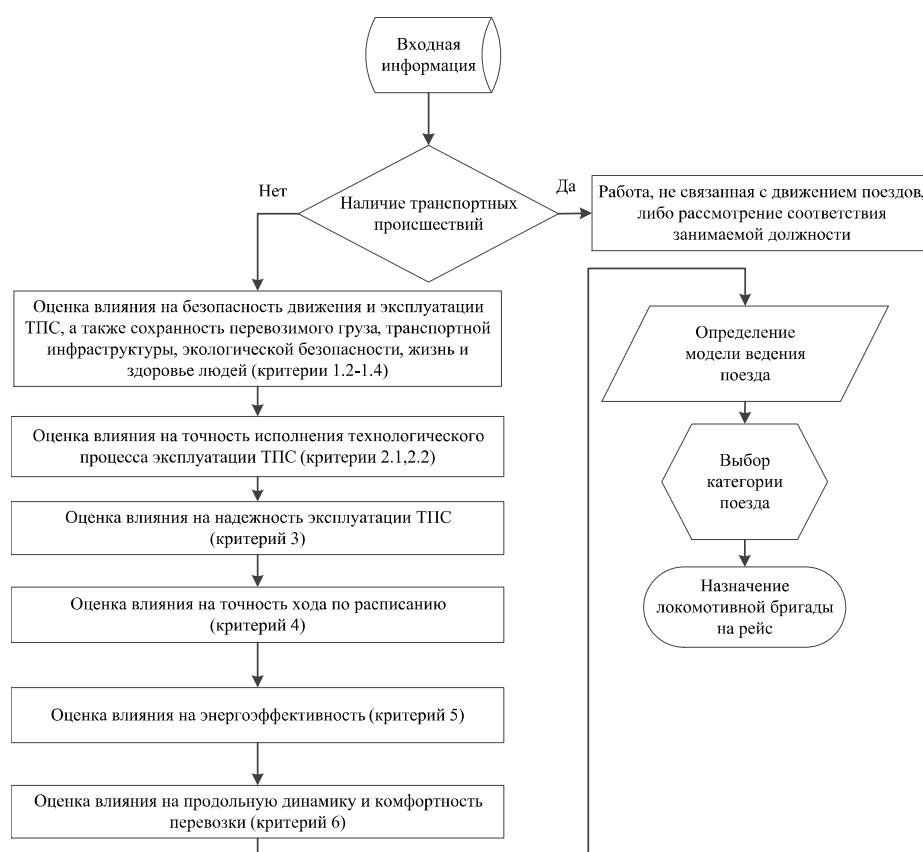


Рисунок 9 – Эвристический алгоритм выбора модели ведения поезда (назначения локомотивных бригад / алгоритма ведения автоматизированной системы) на рейсы различных категорий поездов

На первом этапе оценки модели ведения поезда для допуска к поездной работе отбираются локомотивные бригады, машинисты которых не имеют в профессиональной деятельности транспортных происшествий. При наличии в практике крушений, аварий или инцидентов при перевозке опасных грузов с последствиями, локомотивная бригада отстраняется от работы, связанной с движением поездов, направляется на внеочередную аттестацию, или рассматривается вопрос о соответствии занимаемой должности.

На втором этапе учитываются критерии безопасности движения и эксплуатации подвижного состава (критерии 1–3), обязательные при назначении на любую категорию поезда. Третий этап включает анализ по критериям 4–6, связанным с соблюдением расписания, энергоэффективностью и продольной динамикой в процессе ведения поезда. В результате машинист с наименьшим штрафным баллом на втором этапе и выраженной доминирующей компетенцией по одному из критериев третьего этапа получает приоритет при назначении на рейс определённой категории.

Дальнейшее развитие данного алгоритма может быть выполнено на основе решения оптимизационной задачи о выборе модели ведения поезда и назначении локомотивных бригад на рейсы.

Указанная выше формулировка задачи оптимизации является неполной, поскольку не определён критерий качества выбора h , представляемый в виде функционала (или целевой функции) J , который требуется минимизировать.

С учётом специфики управления локомотивом (таблица 2), модель ведения поезда оценивается комплексом таких показателей:

$$\mathbf{J} = \left| J_p \right|_{p=1}^q, \quad (5)$$

где J_p – частный критерий модели ведения поезда;

q – общее число таких критериев.

Принято решение объединить критерии, отражающие параметры модели № 1–3 (см. таблицу 2), в единый комплексный показатель J_1 – характеризующий безопасность движения, технологическую стабильность и надёжность эксплуатации ТПС. Данный комплексный параметр регламентирован ПТЭ и основными директивными нормативными документами ОАО «РЖД».

J_2 (п. 6 таблицы 2) – определяет продольную динамику (плавность хода) подвижного состава, J_3 (п. 4 таблицы 2) – определяет точность управления с целью соблюдения расписания; J_4 (п. 5 таблицы 2) – характеризует энергоэффективность режима ведения поезда;

Введём операторы, формирующие оценки соответствующих компонентов вектора $\hat{J}$:

$$\hat{J}_p = \Psi^{(p)}(D^{(p)}), p = \overline{1:q}, \quad (6)$$

где $\Psi^{(p)}$ – оператор оценки;

$D^{(p)}$ – совокупность исходных данных, отражающих соблюдение следующих требований: безопасности движения, технологической стабильности и надёжности эксплуатации ТПС ($p = 1$), продольной динамики (плавности хода) ($p = 2$), точности хода (соблюдение расписания) ($p = 3$), энергоэффективности ведения поезда ($p = 4$);

$\hat{J}$ – оценки частных функционалов J .

Данные оценки $\hat{J}$ формируются в дискретные моменты времени, соответствующие установленным контрольным периодам, таким образом, в k -й момент времени формируется оценка p -го показателя i -й модели ведения поезда:

$$\hat{J}_{ip}(k) = F^{(p)}(k)(D^{(p)}(k-1)), i = \overline{1:N}, p = \overline{1:q}, k = \overline{1:\infty}, \quad (7)$$

где $\hat{J}_{ip}$ – частная оценка p -го показателя качества J_p i -й модели ведения поезда в k -й момент времени;

$F^{(p)}$ – функция оценки p -го показателя.

Постановка задачи назначения локомотивных бригад на рейсы, в отличие от алгоритма автоматизированной системы, с учётом категории поезда приводит к необходимости рационального планирования их графика работы, адаптированного под конкретные типы поездов. Такая задача может быть представлена в виде задачи математического программирования, относящейся к области комбинаторной оптимизации.

Для получения корректной задачи примем допущение, что функционал качества, характеризующий выбор варианта назначения локомотивной бригады на рейс из множества возможных, определяется на основе оценок деятельности локомотивной бригады за предыдущий период. Сформулированная выше задача оптимального формирования отображения h с учётом вышесказанного может быть сформулирована как задача принятия решения о рациональном назначении бригады на рейс Ω :

$$h_{(k)} = \Omega_{(k)}(D_{(k-1)}) : J(h) \rightarrow \text{extr}; J(h) = J_k^{\text{прогн}}(h_{(k)}); h_{(k)} \in H_{(k)}; \Omega_{(k)} = \langle h_{(k)}, \hat{J}_{(k)} \rangle, \quad (8)$$

где $H_{(k)}$ – множество всех вариантов назначения локомотивных бригад;

J – комплексный функционал (целевая функция), характеризующий качество принятого назначения бригады на рейс как прогноз:

$$J^* = J_k^{\text{прогн}}(h_{(k)}^*) = \underbrace{\arg \min}_{h_{(k)} \in H_{(k)} : \Omega_{(k)} = \langle h_{(k)}, \hat{J}_{(k)} \rangle} \hat{J}_{(k)} \quad (9)$$

на следующий (k -й) контрольный период при условии принятия $h_{(k)}$ назначения бригады на рейс:

$$J_k^{\text{прогн}} = F(h_{(k)}, D_{(k-1)}), \quad (10)$$

где $h_{(k)} = \left\{ h_{(k)ij} \right\}_{\substack{i=1:N \\ j=1:L}}; h_{(k)} = (z_j; m_i).$

т. е. требуется на основе оценок моделей управления подвижным составом по результатам работы N локомотивных бригад за $k-1$ период осуществить принятие рационального решения $h_{(k)}$ на k -й период эксплуатации. При этом прогнозируемая оценка $J = J_k^{прогн}(h_{(k)})$ формируется с помощью оператора оценки F на основе статистики D за предыдущий $k-1$ контрольный период эксплуатации.

Будем исходить из того, что множество планируемых рейсов относится к нескольким категориям:

$$Z = \left| z_j \right|_{j=1}^L : \forall z_j \in \tilde{Z} = \left(\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_r, \dots, \tilde{z}_B \right), \quad (11)$$

где $\tilde{z}_r, r = \overline{1:B}$ – типы рейсов, B – их число.

Исходя из вышесказанного задача об оптимальном назначении может быть сформулирована следующим образом. Задано множество локомотивных бригад M , множество рейсов Z , каждый из которых относится к одному из конкретных

типов $\tilde{Z}$:

$$\forall z \in Z \exists \tilde{z} \in \tilde{Z} \Rightarrow z \rightarrow \tilde{z} \quad (12)$$

Необходимо на основе данных о работе локомотивных бригад за предшествующий $k-1$ -й период $D_{(k-1)}$ сформировать с помощью процедуры (оператора) F прогноз оценок $\hat{J}_{(k)} = \hat{J}_{(k)p} | p = 1:q$, и на их основе осуществить выбор такого инъективного отображения h , которое обеспечивает оптимальное значение комплексных прогнозируемых оценок на следующем k -м периоде $J_k^{прогн}$ с учётом допущения, что прогноз оценок $\hat{J}_{(k)}$ однозначно определяется оценками на $k-1$ -м периоде:

$$J_k^{прогн} \left(h_{(k)}, D_{(k-1)} \right) \xrightarrow{\quad} extr. \quad (13)$$

$$h: Z \rightarrow M, \forall z \in Z \rightarrow \tilde{z}(z) \in \tilde{Z};$$

$$\hat{J}_k = F \left(h_{(k)}, D_{(k-1)} \right);$$

$$h_{(k)} = \Omega(\hat{J}_k, D_{(k-1)}, Z, \tilde{Z});$$

Здесь $\tilde{z}(z)$ является отображением $\tilde{z}: Z \rightarrow \tilde{Z}$. Для корректной формализации указанной задачи необходимо решить вспомогательную задачу вычисления прогноза:

$$\hat{J}_k = F \left(h_{(k)}, D_{(k-1)} \right). \quad (14)$$

В настоящее время сформулированная выше задача может быть представлена как задача группового принятия решения коллективом машинистов-инструкторов, когда процесс принятия решений включает несколько последовательных этапов. Экспертный подход, который используется в локомотивных депо, автором был формализован в виде процедуры принятия решения и показан выше в виде блок-схемы алгоритма (см. рисунок 9).

Целью разработки нового метода является, во-первых, повышение эффективности принятия решений, поскольку при более точном учёте всех факторов в ряде случаев может быть найдено решение, дающее более высокую оценку прогноза по совокупности факторов, особенно в том случае, если имеется несколько локомотивных бригад примерно одного уровня (с примерно одинаковыми оценками их моделей ведения), а также в том случае, когда на ответственные рейсы не хватает локомотивных бригад с наиболее высоким уровнем квалификации и необходимо осуществлять назначения на соответствующие рейсы из бригад более низкого уровня квалификации, но это требуется сделать таким образом, чтобы минимизировать соответствующие риски. Во-вторых, реализация более гибкой модели позволит в дальнейшем

реализовать автоматизированную систему поддержки принятия решений в рамках модели «Цифровая железная дорога» [158–160].

В отличие от приведённой «грубой» модели принятия решений, рассмотренной выше, предлагаемый подход основан на оценке степени соответствия (эффективности) назначения на конкретный рейс заданного типа конкретной локомотивной бригады:

$$J_{ij} = F(z_j, \bar{z}(z_j), m_i), \quad (15)$$

где J_{ij} – оценка качества назначения i -й модели ведения поезда на j -й рейс типа $r = \bar{z}(z_j)$, здесь r – индекс, характеризующий тип рейса.

Тогда общая оценка

$$\hat{J}(h) = \sum_{j=1}^L J_{ij}, i=1:N, j=1:L, L \leq N, \quad (16)$$

является суммой оценок по каждому назначению.

2.3 Разработка методики оценки эксплуатации тягового подвижного состава с использованием данных регистрации параметров локомотива на основе нечёткой логики

Цель разработки методики заключается в повышении эффективности технологии эксплуатации ТПС путём создания обоснованного инструмента формализованной интегральной оценки моделей ведения поезда на основе совокупности частных критериев, отражающих степень соблюдения регламентов и требований технологии эксплуатации (безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации, энергоэффективность, продольная динамика).

Для решения указанной задачи требуется формализация функции оценки F .

Будем использовать для численной оценки J функцию F на основе математического аппарата нечёткой логики.

Определим функцию F как отображение:

$$F : K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \times r \rightarrow E, F : \mathbb{R}^6 \times \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}^1, \quad (17)$$

где K_1 – показатель безопасности движения; K_2 – показатель технологических нарушений; K_3 – показатель нарушений режимов эксплуатации ТПС; K_4 – показатель соблюдения точности хода по расписанию; K_5 – показатель соблюдения критериев комфортности перевозки пассажиров (продольная динамика); K_6 – показатель энергоэффективности.

Для определения частных показателей $K_p, p = \overline{1:6}$ на основе набора данных $D_{pi}^{(k)}$, где (k) характеризует период времени, p – номер показателя; i – номер локомотивной бригады, вводим частные функции оценки:

$$F_p : D_{pi} \rightarrow K_{pi}. \quad (18)$$

Как было сказано выше, с целью сокращения размерности задачи целесообразным представляется объединение показателей $K_1:K_3$ в один комплексный показатель «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации» – Q_1 ; Q_2 – показатель продольной динамики, Q_3 – показатель точности хода по расписанию, Q_4 – показатель энергоэффективности.

Исходные данные в соответствии с таблицей 2 группируются в четыре группы Q_1 – Q_4 , далее характеризующиеся численными значениями e_1 – e_4 . Поскольку в качестве основного математического аппарата автором предлагается использовать нечёткую логику, в соответствии с теоретическими основами использования теории нечётких множеств и нечёткой логики [161, 162] сгруппированные исходные данные должны быть преобразованы во множество значений функций

принадлежности терм-множеств лингвистических переменных, используемых для вычисления целевых оценок. Полученные путём проецирования на нечёткие шкалы значения термов ЛП (VH, HG, MD, LW, VL) по каждому из четырёх критериев оценки (всего $4 \cdot 5 = 20$ значений) с учётом критериев Фишберна интегрируются в комплексную оценку по предлагаемой методике, в соответствии с общей схемой, представленной на рисунке 10 [163].

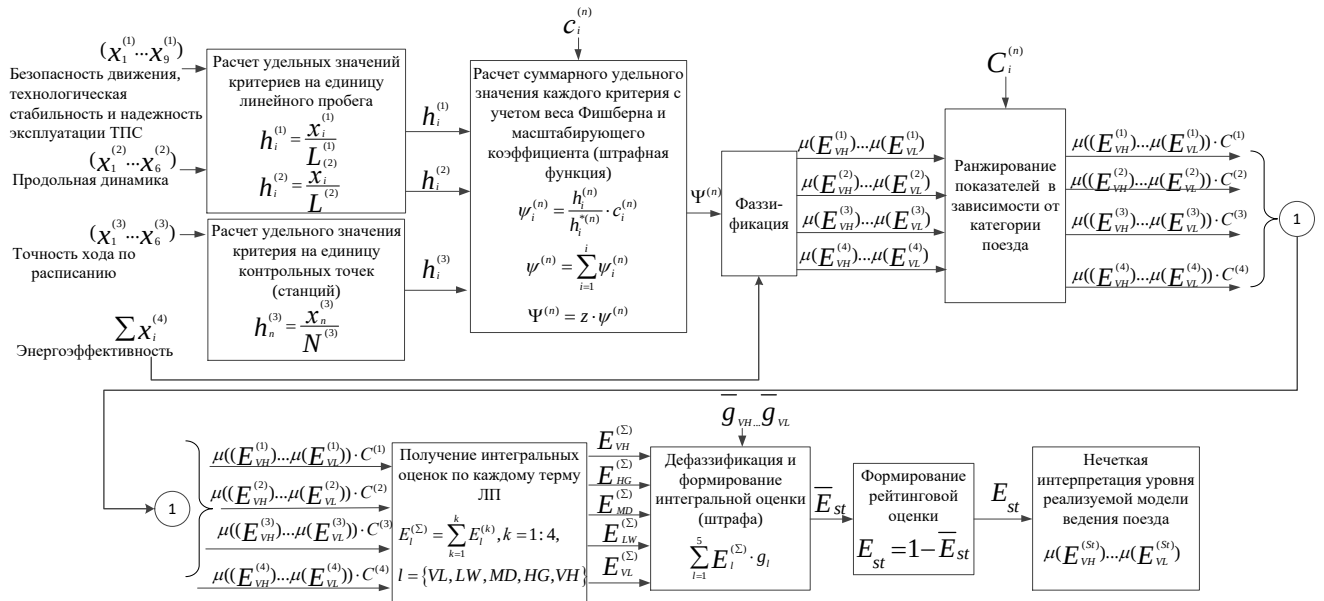


Рисунок 10 – Алгоритм расчёта интегральной оценки модели ведения поезда

Для этого необходимо заранее задать лингвистические переменные и соответствующие им терм-множества. Одним из известных недостатков нечётко-логических подходов является высокая степень субъективности при выборе этих параметров. В связи с этим в данной работе проведён анализ нормативных требований к деятельности локомотивных бригад, установленных документами ОАО «РЖД» и Минтранса, а также собрана и обработана статистическая информация об их работе на участках Северо-Кавказской железной дороги. На основе полученных данных выполнено обоснование параметров лингвистических переменных, используемых в модели.

Для вычисления базовой переменной e_{st} будем использовать математический аппарат нечёткой логики на основе указанных выше частных показателей, каждый из которых будем рассматривать как числовую переменную,

принимающую свои значения на определённом числовом промежутке, а также как множество – носитель лингвистической переменной, состоящей из следующих термов: E_{VH} – «очень высокий»; E_{HG} – «высокий»; E_{MD} – «средний»; E_{LW} – «низкий»; E_{VL} – «очень низкий». Введём лингвистическую переменную E_{st} – «рейтинг модели ведения поезда» по итогам контрольного периода, определённую на основе базовой переменной e_{st} . Универсальным множеством переменной e_{st} является отрезок $[0, 1]$, а множеством значений переменной E_{st} – терм-множество $E_{st} = \{E_{VL}, E_{LW}, E_{MD}, E_{HG}, E_{VH}\}$.

Для более наглядной интерпретации результатов вычислений на основе нечёткой модели, наряду с переменной E_{st} , будем рассматривать сопряжённую с ней переменную $\bar{E}_{st}$ – уровень ошибок при эксплуатации ТПС, очевидно, что $E_{st} = 1 - \bar{E}_{st}$ (таблица 3). Каждый терм из множества E_{st} (или $\bar{E}_{st}$) является именем нечёткого подмножества на отрезке $[0,1]$. Далее будем рассматривать эти нечёткие подмножества как треугольные нечёткие числа [161].

Таблица 3 – Терм-множества сопряжённых лингвистических переменных «рейтинг модели ведения поезда» и «уровень ошибок»

№	Лингвистическая переменная	Лингвистические термы (ЛТ)				
1	«Рейтинг модели ведения поезда», E_{st}	очень высокий (very high) (VH)	высокий (high) (HG)	средний (middle) (MD)	низкий (low) (LW)	очень низкий (very low) (VL)
2	«Уровень ошибок», $\bar{E}_{st}$	очень низкий (very low) (VL)	низкий (low) (LW)	средний (middle) (MD)	высокий (high) (HG)	очень высокий (very high) (VH)

Отметим, что в процессе построения методики расчётов были использованы следующие виды функций принадлежности, представленные на рисунке 11.

Для аналитического описания представленных функций принадлежности использованы следующие соотношения, позволяющие вычислять степени принадлежности для произвольных значений из области определения (таблица 4).

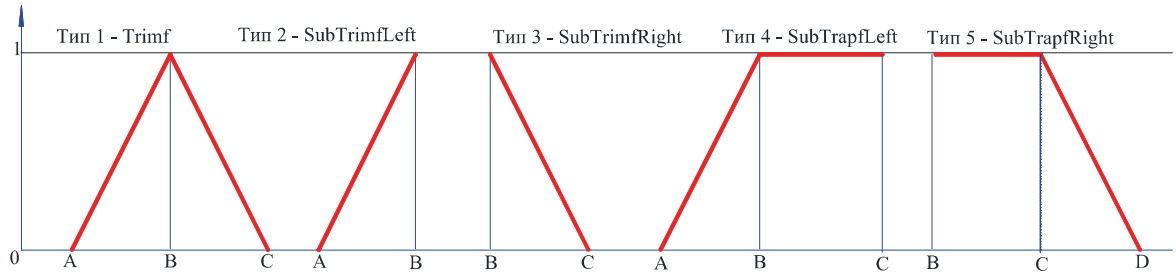


Рисунок 11 – Используемые типы функций принадлежности

Таблица 4 – Аналитическое описание используемых функций принадлежности

№	ФП	Формула ФП	Расчётная формула
1	Треугольная (тип 1) $R^1 \triangleq [A, C]$	$\mu_{R^1}(x) = \begin{cases} 0, x < A; \\ \frac{x-A}{B-A}, A \leq x < B; \\ \frac{C-x}{C-B}, B \leq x \leq C; \\ 0, x > C. \end{cases}$	$\mu_{R^1}(x) = \begin{cases} b_1(x-a_1), \text{если } a_1 \leq x < a_2 \\ 1-b_2(x-a_2), \text{если } a_2 \leq x < a_3 \end{cases}$ где $a_1 = A; a_2 = B; a_3 = C;$ $b_1 = \frac{1}{B-A}; b_2 = \frac{1}{C-B}; x \in R^1$
2	Частичная треугольная левая (тип 2) $R^2 \triangleq [A, B]$	$\mu_{R^2}(x) = \begin{cases} 0, x < A; \\ \frac{x-A}{B-A}, A \leq x \leq B; \\ 0, x > B. \end{cases}$	$\mu_{R^2}(x) = b_1(x-a_1), \text{если } a_1 \leq x \leq a_2$ где $a_1 = A; b_1 = \frac{1}{B-A}; x \in R^2$
3	Частичная треугольная правая (тип 3) $R^3 \triangleq [B, C]$	$\mu_{R^3}(x) = \begin{cases} 0, x < B; \\ \frac{C-x}{C-B}, B \leq x \leq C; \\ 0, x > C. \end{cases}$	$\mu_{R^3}(x) = 1-b_2(x-a_2), \text{если } a_2 \leq x \leq a_3$ где $a_2 = B; a_3 = C; b_2 = \frac{1}{C-B}; x \in R^3$
4	Частичная трапецевидная левая (тип 4) $R^4 \triangleq [A, C]$	$\mu_{R^4}(x) = \begin{cases} 0, x < A; \\ \frac{x-A}{B-A}, A \leq x < B; \\ 1, B \leq x \leq C; \\ 0, x > C. \end{cases}$	$\mu_{R^4}(x) = \begin{cases} b_1(x-a_1), \text{если } a_1 \leq x < a_2 \\ 1, \text{если } a_2 \leq x < a_3 \end{cases}$ где $a_1 = A; a_2 = B; a_3 = C;$ $b_1 = \frac{1}{B-A}; x \in R^4$
5	Частичная трапецевидная правая (тип 5) $R^5 \triangleq [B, D]$	$\mu_{R^5}(x) = \begin{cases} 0, x < B; \\ 1, B \leq x < C; \\ \frac{D-x}{D-C}, C \leq x < D; \\ 0, x > D. \end{cases}$	$\mu_{R^5}(x) = \begin{cases} 1, \text{если } a_2 \leq x < a_3 \\ 1-b_2(x-a_4), \text{если } a_3 \leq x < a_4 \end{cases}$ где $a_2 = B; a_3 = C; a_4 = D;$ $b_2 = \frac{1}{D-C}; x \in R^5$

Графики функций принадлежности терм-множеств сопряжённых лингвистических переменных «рейтинг модели ведения поезда» и «уровень ошибок» показаны на рисунке 12.

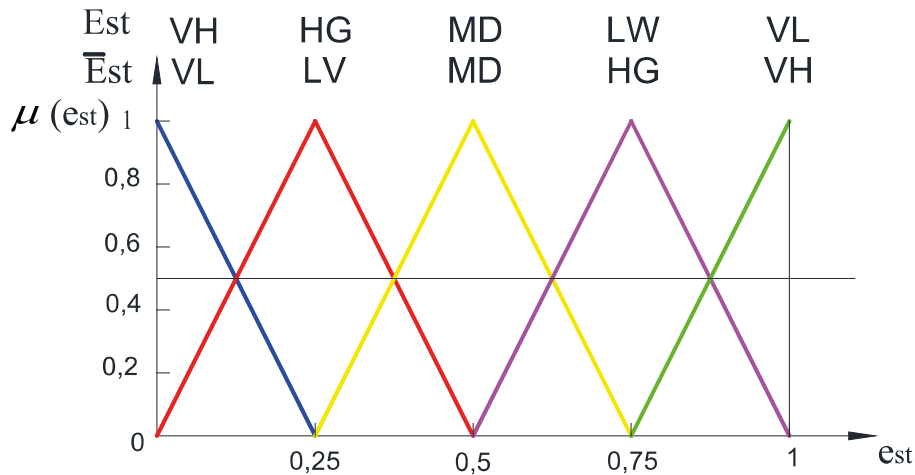


Рисунок 12 – Графики функций принадлежности терм-множеств лингвистических переменных E_{st} , $\bar{E}_{st}$

Формулы для вычисления функций принадлежности каждого терма как треугольного нечёткого числа $x=(a_1, a_2, a_3)$ представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Функции принадлежности подмножеств терм-множества E_{st}

№	Терм-множества E_{st}	Функции принадлежности нечёткого множества E_{st}
1	$E_{VH}(\bar{E}_{VL}), e \in [0; 0,25]$	$\mu(e, E_{VH}) = (e - a_2) / (a_2 - a_1), \text{ если } a_1 \leq e \leq a_2$
2	$E_{HG}(\bar{E}_{LW}), e \in [0; 0,5]$	$\mu(e, E_{HG}) = \begin{cases} (e - a_1) / (a_2 - a_1), & \text{если } a_1 \leq e < a_2 \\ (e - a_3) / (a_3 - a_2), & \text{если } a_2 \leq e < a_3 \end{cases}$
3	$E_{MD}(\bar{E}_{MD}), e \in [0,25; 0,75]$	$\mu(e, E_{MD}) = \begin{cases} (e - a_3) / (a_3 - a_2), & \text{если } a_2 \leq e < a_3 \\ (e - a_4) / (a_4 - a_3), & \text{если } a_3 \leq e < a_4 \end{cases}$
4	$E_{LW}(\bar{E}_{HG}), e \in [0,5; 1]$	$\mu(e, E_{LW}) = \begin{cases} (e - a_4) / (a_4 - a_3), & \text{если } a_3 \leq e < a_4 \\ (e - a_5) / (a_5 - a_4), & \text{если } a_4 \leq e < a_5 \end{cases}$
5	$E_{VL}(\bar{E}_{VH}), e \in [0,75; +\infty]$	$\mu(e, E_{VL}) = (e - a_5) / (a_5 - a_4), \text{ если } a_4 \leq e < a_5$
6	Параметры ФП	$a_1 = 0; a_2 = 0,25; a_3 = 0,5; a_4 = 0,75; a_5 = 1;$

Значение функции принадлежности будем рассматривать как меру истинности соответствующего терма $\mu(e_{st}, E)$. Так же, как и для переменной Est , примем, что каждая лингвистическая переменная имеет треугольную функцию принадлежности, определяемую тройкой чисел $x = (a_1, a_2, a_3)$. Далее определим значения и параметры всех термов с учётом физической сущности каждого из базовых показателей:

$$E_l^{(k)}, k = 1:4, l = \{VL, LW, MD, HG, VH\}; \quad (19)$$

где k – порядковый номер оцениваемого показателя;

l – рассматриваемые термы.

Таким образом: $E_{VL}^{(k)}$ – очень низкий, very low; $E_{LW}^{(k)}$ – низкий, low; $E_{MD}^{(k)}$ – средний, middle; $E_{HG}^{(k)}$ – высокий, high; $E_{VH}^{(k)}$ – очень высокий, very high.

Для построения оценок на основе нечёткой логики и выполнения первичной обработки исходных данных проанализируем показатели, характеризующие введённые выше частные критерии технологии эксплуатации.

2.3.1 Оценка соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС»

Для оценки соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава по данному критерию и расчёта показателей по E^1 был проведён сбор и анализ информации об эксплуатации локомотивов и работе локомотивных бригад на участках Северо-Кавказской железной дороги. Безопасность движения оценивалась на основе предварительно собранной статистики, сгруппированной по девяти частным критериям. В выборку вошли данные за календарный год по всем 10 эксплуатационным локомотивным депо Северо-Кавказской дирекции тяги, охватывающие деятельность 2772 локомотивных бригад с общим линейным пробегом 66,488 млн км (таблица6). Средние значения нарушений, пересчитанные

на 10 тыс. км пробега на одну бригаду, были приняты в качестве базы для оценки и соотнесены с нечёткой шкалой, где уровень MD (MIDDLE) соответствует среднему (т. к. средний уровень квалификации машинистов составил 2,47 балла, что является средним значением по шкале классности). Текущие оценки локомотивных бригад производятся путём сравнения с этой базой, при наличии транспортных происшествий интегральная оценка автоматически снижается до уровня «очень плохо» [163, 164].

Таблица 6 – Сводная таблица частных критериев оценки безопасности движения, технологической стабильности и надёжности эксплуатации ТПС

№	Критерий	Эксплуатационные локомотивные депо (ТЧЭ)										
		1	6	8	11	12	14	16	21	25	27	Итого
1.1	Транспортные происшествия	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.2	События	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
1.3.1	ОТС 1-й категории	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	3
1.3.2	ОТС 2-й категории	0	2	0	2	1	0	1	1	0	1	8
1.3.3	ОТС 3-й категории	0	1	0	3	4	7	0	1	0	5	21
1.4.1	Нарушения при управлении тормозами (грубые)	55	105	62	74	77	95	48	55	28	23	622
1.4.2	Нарушения при управлении тормозами (прочие)	664	1128	754	797	724	1179	558	580	353	258	6995
2.1	Технологические нарушения 1-й категории	31	87	26	21	36	53	31	4	3	4	296
2.2	Технологические нарушения 2-й категории	70	90	26	28	63	174	25	8	4	5	497
3	Нарушения режимов эксплуатации ТПС	20	81	54	42	43	37	47	39	30	20	413
Контингент локомотивных бригад, лб.		271	441	295	318	287	481	215	228	136	100	2772
Линейный пробег, млн лок-км		6,1	10,893	7,076	7,727	6,784	11,237	5,457	5,511	3,304	2,399	66,488

Для формирования сводной оценки по частным показателям $x_1, \dots, x_9$ (считая, что x_0 – транспортные происшествия) выполним предварительное ранжирование

указанных показателей по приоритету на основе экспертных оценок (таблица 7). Для определения степени вклада каждого показателя необходимо определить их веса $c_1, \dots, c_9$. Поскольку сами веса считаем упорядоченными, но дополнительная информация об этих величинах отсутствует, будем данные веса определять по правилу Фишберна [165, 166]:

$$c_i^{(n)} = \frac{2 \cdot (m - i + 1)}{(m + 1) \cdot m}, i = 1 \dots m, \quad (20)$$

где n – номер критерия оценки модели ведения поезда;

i – ранг отдельного показателя;

m – количество оцениваемых показателей.

В результате получаем следующие значения весов: $c_1^{(1)} = 0,2$; $c_2^{(1)} = 0,1778$; $c_3^{(1)} = 0,1556$; $c_4^{(1)} = 0,1333$; $c_5^{(1)} = 0,1111$; $c_6^{(1)} = 0,0888$; $c_7^{(1)} = 0,0666$; $c_8^{(1)} = 0,0444$; $c_9^{(1)} = 0,0222$.

Таблица 7 – Данные для расчёта критерия «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС»

№	Критерий	Число нарушений $x_i^{(1)}$ ед.	Вес $c_i^{(1)}$	Удельный показатель нарушений на 10 тыс. лок-км для 1 лб. $h_i^{*(1)}$, ед.
1.1	Транспортные происшествия	0	-	-
1.2	События	1	0,2	$1,5 \cdot 10^{-4}$
1.3.1	ОТС 1-й категории	3	0,1778	$4,5 \cdot 10^{-4}$
1.3.2	ОТС 2-й категории	8	0,1556	$1,2 \cdot 10^{-3}$
1.3.3	ОТС 3-й категории	21	0,1333	$3,16 \cdot 10^{-3}$
1.4.1	Нарушения при управлении тормозами (грубые)	622	0,1111	$9,355 \cdot 10^{-2}$
1.4.2	Нарушения при управлении тормозами (прочие)	$6,995 \cdot 10^3$	0,0889	1,052
2.1	Технологические нарушения 1-й категории	296	0,0667	$4,452 \cdot 10^{-2}$
2.2	Технологические нарушения 2-й категории	497	0,0444	$7,475 \cdot 10^{-2}$
3	Нарушения режимов эксплуатации ТПС	413	0,0222	$6,212 \cdot 10^{-2}$

Для расчёта параметров соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава предлагается применять штрафную функцию, которая позволяет количественно оценить отклонения от заданных параметров и ограничений. Включение штрафных значений способствует объективному анализу и принятию обоснованных управленческих решений. Штраф отражает степень несоответствия установленным требованиям и используется для вычисления рейтинговой оценки. Расчёт штрафной функции за нарушения требований безопасности, надёжности и технологии эксплуатации подвижного состава будем производить по следующей схеме. Основываясь на данных таблицы 6, вычислим отношение среднего числа нарушений каждой категории на одну локомотивную бригаду к некоторой величине пробега (см. таблицу 7). Таким образом, фактическое (статистическое) значение штрафа на одну модель ведения поезда:

$$\psi_i^{(n)} = \frac{h_i^{(n)}}{h_i^{*(n)}} \cdot c_i^{(n)}, \quad (21)$$

$$\psi^{(n)} = \sum_{i=1}^{N_\psi} \psi_i^{(n)}, \quad (22)$$

где N_ψ – оцениваемые параметры, входящие в критерий оценки модели ведения поезда.

Таким образом, формула (22) для расчёта штрафа по критерию «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС» примет вид:

$$\psi^{(1)} = \sum_{i=1}^9 \frac{h_i^{(1)}}{h_i^{*(1)}} \cdot c_i^{(1)}. \quad (23)$$

Для согласования номинального значения штрафа с нечёткой шкалой введем значение масштабирующего коэффициента $z = 0,5$ (т. к. средний уровень квалификации машинистов составил 2,47). Отношение $\frac{h_i^{(n)}}{h_i^{*(n)}}$ характеризует

степень соответствия номинального $h_i^{*(n)}$ (среднего определённого на основе статистических данных) и фактически оцениваемого $h_i^{(n)}$. Для формирования терм-множеств лингвистической переменной «штрафной рейтинг» введём суммарное номинальное значение штрафа $\Psi^{(n)}$, которое будет вычисляться по формуле (24) при условии $\frac{h_i^{(n)}}{h_i^{*(n)}} = 1$:

$$\Psi^{(n)} = z \cdot \psi^{(n)}. \quad (24)$$

В нашем случае формула (24) примет вид:

$$\Psi^{(1)} = 0,5 \cdot \psi^{(1)}. \quad (25)$$

Для оценки критерия Q_1 введём лингвистическую переменную $E^{(1)}$ – «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС». Построенные исходя из изложенного подхода графики подмножеств терм-множеств лингвистической переменной $E^{(1)}$ представлены на рисунке 13, а формулы для их расчёта – в таблице 8.

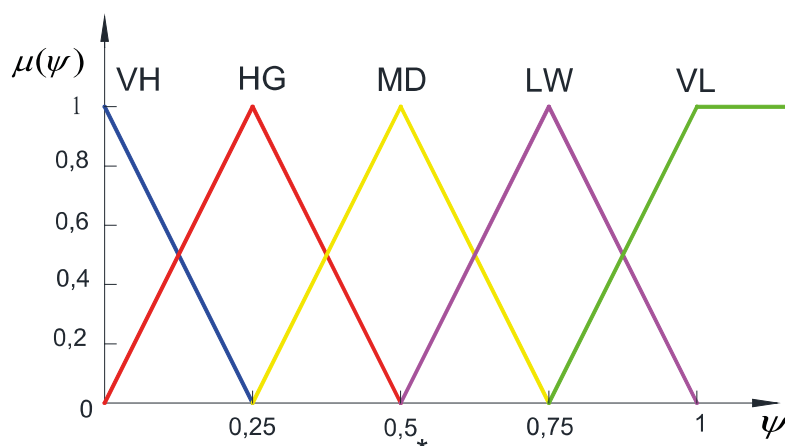


Рисунок 13 – Графики функций принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС»

Таблица 8 – Формулы для расчёта значений функций принадлежности лингвистической переменной «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС»

№	Терм-множества $E^{(1)}$	Функции принадлежности нечёткого множества $E^{(1)}$
1	$E_{VH}(\bar{E}_{VL}), \Psi^1 \in [0; 0,25]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi^1) = \{1 - 4 \cdot \Psi^1\}$
2	$E_{HG}(\bar{E}_{LW}), \Psi^1 \in [0; 0,5]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi^1) = \begin{cases} 4 \cdot \Psi^1, & \text{если } 0 \leq \Psi^1 < 0,25 \\ 1 - 4 \cdot (\Psi^1 - 0,25), & \text{если } 0,25 \leq \Psi^1 \leq 0,5 \end{cases}$
3	$E_{MD}(\bar{E}_{MD}), \Psi^1 \in [0,25; 0,75]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi^1) = \begin{cases} 4 \cdot (\Psi^1 - 0,25), & \text{если } 0,25 \leq \Psi^1 < 0,5 \\ 1 - 4 \cdot (\Psi^1 - 0,5), & \text{если } 0,5 \leq \Psi^1 \leq 0,75 \end{cases}$
4	$E_{LW}(\bar{E}_{HG}), \Psi^1 \in [0,5; 1]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi^1) = \begin{cases} 4 \cdot (\Psi^1 - 0,5), & \text{если } 0,5 \leq \Psi^1 < 0,75 \\ 1 - 4 \cdot (\Psi^1 - 0,75), & \text{если } 0,75 \leq \Psi^1 \leq 1 \end{cases}$
5	$E_{VL}(\bar{E}_{VH}), \Psi^1 \in [0,75; +\infty]$	$\mu_{E^{(1)}}(\Psi^1) = \begin{cases} 4 \cdot (\Psi^1 - 0,75), & \text{если } 0,75 \leq \Psi^1 < 1 \\ 1, & \text{если } \Psi^1 > 1 \end{cases}$

Универсальным множеством для переменной Ψ^1 будет являться отрезок $[0, 1]$, а множеством значений лингвистической переменной $E^{(1)}$ – терм-множество $E^{(1)} = \{E_{VH}, E_{HG}, E_{MD}, E_{LW}, E_{VL}\}$, где E_{VH} – «уровень очень высокий»; E_{HG} – «высокий»; E_{MD} – «средний»; E_{LW} – «низкий»; E_{VL} – «очень низкий».

При этом каждый терм из множества $E^{(1)}$ является именем нечёткого подмножества на отрезке $[0, 1]$. Будем рассматривать эти подмножества как треугольные и трапециевидные нечёткие числа и их частные случаи. Как пример в таблицах 9–11 представлен расчёт, который описан выше, для 10 локомотивных бригад, при этом $R = 1 \dots N$ – рейтинг реализуемой модели ведения поезда, где N – количество локомотивных бригад (алгоритмов ведения поезда).

Таблица 9 – Удельные значения нарушений на 10 тыс. км линейного пробега

№	Класс	Пробег 10 тыс. км	Удельные значения нарушений (на 10 тыс. км)								
			$h_1^{(1)}$	$h_2^{(1)}$	$h_3^{(1)}$	$h_4^{(1)}$	$h_5^{(1)}$	$h_6^{(1)}$	$h_7^{(1)}$	$h_8^{(1)}$	$h_9^{(1)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	6,1123	0,164	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	6,4977	0	0,154	0	0	0	0	0	0	0
3	3	4,2811	0	0	0,234	0	0	0	0	0	0
4	3	6,5646	0	0	0	0,152	0	0	0	0	0,152
5	2	5,2124	0	0	0	0	1,535	0,384	0	0	0

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	2	4,8721	0	0	0	0	0,205	3,284	0,411	0	0,411
7	1	6,1891	0	0	0	0	0	0	0,646	0,323	0
8	1	5,8035	0	0	0	0	0	1,378	0	0	0,172
9	3	5,9458	0	0	0	0	0	0,336	0,336	0,168	0
10	без кл.	5,5574	0	0	0	0	0,36	0,54	0	0	0,36

Таблица 10 – Вычисление оценки модели ведения поезда по критерию «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС»

№	Значения штрафных баллов									$\psi^{(1)}$	$\Psi^{(1)}$	$R^{(1)}$
	$\psi_1^{(1)}$	$\psi_2^{(1)}$	$\psi_3^{(1)}$	$\psi_4^{(1)}$	$\psi_5^{(1)}$	$\psi_6^{(1)}$	$\psi_7^{(1)}$	$\psi_8^{(1)}$	$\psi_9^{(1)}$			
1	218,667	0	0	0	0	0	0	0	0	218,667	109,334	10
2	0	60,847	0	0	0	0	0	0	0	60,847	30,424	9
3	0	0	30,342	0	0	0	0	0	0	30,342	15,171	8
4	0	0	0	6,412	0	0	0	0	0,054	6,466	3,233	7
5	0	0	0	0	1,823	0,032	0	0	0	1,855	0,928	6
6	0	0	0	0	0,243	0,278	0,616	0	0,147	1,284	0,642	5
7	0	0	0	0	0	0	0,968	0,192	0	1,16	0,58	4
8	0	0	0	0	0	0,116	0	0	0,061	0,177	0,089	1
9	0	0	0	0	0	0,028	0,503	0,1	0	0,631	0,316	3
10	0	0	0	0	0,428	0,046	0	0	0,129	0,603	0,302	2

Таблица 11 – Значения терм-множеств функций принадлежности лингвистической переменной «Безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС»

№	$R^{(1)}$	$\Psi^{(1)}$	Значения терм-множеств функций принадлежности				
			VH	HG	MD	LW	VL
1	10	109,334	0	0	0	0	1
2	9	30,424	0	0	0	0	1
3	8	15,171	0	0	0	0	1
4	7	3,233	0	0	0	0	1
5	6	0,928	0	0	0	0,288	0,712
6	5	0,642	0	0	0,432	0,568	0
7	4	0,58	0	0	0,68	0,32	0
8	1	0,089	0,644	0,356	0	0	0
9	3	0,316	0	0,736	0,264	0	0
10	2	0,302	0	0,792	0,208	0	0

2.3.2 Оценка соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «продольная динамика»

Критерий соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава «продольная динамика» отличается от рассмотренных ранее тем, что его прямая количественная оценка затруднена. Он должен оцениваться на основе анализа продольно-динамических реакций при реализации различных режимов управления. В связи с этим для проведения исследований целесообразно использовать методы компьютерного моделирования и имитационные модели, реализуемые в средах моделирования сложных динамических систем MATLAB/Simulink и вычислительной механики «Универсальный механизм». Разработка компьютерной модели поезда представлена в главе 3 настоящей диссертации.

В качестве эмпирической основы (базы оценки) для проведения оценки используются данные, полученные в результате экспериментальных поездок с пассажирскими поездами в границах Северо-Кавказской железной дороги. При этом анализируются продольно-динамические реакции и показатели комфортности на основе методов компьютерного моделирования. Оценка производится по частоте попадания локальных экстремумов функции рывка (второй производной скорости) в установленные диапазоны. Текущий уровень квалификации локомотивной бригады определяется по максимальному значению рывка, зафиксированному за поездку. Величины продольных динамических реакций, возникающих в поезде, если они не выходят за пределы, допускаемые нормативами, не являются эффективным критерием оценки качества динамических процессов, происходящих в поезде. В частности, в грузовом движении, для решения подобных задач, предусматривается введение ряда интегральных критериев, учитывающих колебательный характер процессов и влияние знакопеременных динамических нагрузок на техническое состояние и износ подвижного состава. К таким критериям следует отнести, например, условную разрушаемость вагонов [167].

В пассажирских поездах благодаря малому количеству вагонов и относительно равномерно распределённой по составу массе, а также применению электропневматических тормозов (ЭПТ), величины продольных динамических реакций не превышают нормативных значений. В данном случае на передний план выходит воздействие продольных колебаний и динамических ударных нагрузок на перевозимых пассажиров и локомотивную бригаду. Стандартами, регламентирующими технические требования к подвижному составу, осуществляющему пассажирское движение, нормируется ряд показателей динамического качества железнодорожных экипажей, связанных с обеспечением плавности хода [168, 169]. В переходных режимах движения поезда (разгон, торможение, вход и выход из кривой) в качестве показателей плавности хода в горизонтальной плоскости (продольная составляющая) используются допускаемые значения ускорения и его первой производной – рывка [170, 171]:

$$a \leq [a], \quad \dot{a} \leq [\dot{a}]. \quad (26)$$

где $[a] = 0,7 \text{ м/с}^2$ – допускаемое значение ускорения;

$[\dot{a}] = 0,7 \div 1,0 \text{ м/с}^3$ – допускаемое значение рывка.

В установившемся режиме движения на прямолинейных участках пути с поддержанием постоянной скорости движения в качестве критерия плавности хода используется коэффициент плавности хода по Шперлингу:

$$C = K_f \sqrt[10]{z_0^3 \omega^5} \leq [C], \quad (27)$$

где z_0 – амплитуда колебаний экипажа;

ω – круговая частота колебаний экипажа;

K_f – коэффициент, учитывающий влияние частоты и направления колебаний;

$[C] = 3,25$ – допускаемое в пассажирском движении значение коэффициента плавности хода.

Вертикальные и поперечные колебания вагонов определяются главным образом особенностями их конструкции (рессорным подвешиванием, характеристиками связей кузова с тележками и т. д.), то есть зависят от неизменяемых в процессе управления факторов. Характеристики продольных колебаний (подёргивания) зависят от свойств сцепных приборов и поглощающих аппаратов, а также существенным образом связаны с алгоритмами управления тягой и торможением. Как показывает анализ жалоб пассажиров, нарушение комфортности при перевозке в 90 % происходит в переходных режимах управления локомотивом. По этой причине критерий «продольная динамика», влияющий на плавность хода (комфортность пассажиров), предлагается оценивать по значению рывка [172, 173].

Достоинство данного подхода заключается в возможности с использованием имитационной модели проводить комплексный анализ продольно-динамических реакций и оценивать параметры плавности хода (комфортность перевозки пассажиров) как для реально реализованных режимов управления поездом, так и для альтернативных сценариев движения, сформированных с применением оптимизационных алгоритмов [174, 175]. Это открывает возможность последующей разработки и внедрения рекомендаций по ведению поезда, направленных на повышение профессионального уровня локомотивных бригад, а также позволяет совершенствовать алгоритмы автоматизированных систем управления ТПС.

С применением методов имитационного моделирования были проведены исследования продольно-динамических реакций при следовании пассажирского поезда № 36 «Северная Пальмира» на участке Лихая – Ростов-Главный Северо-Кавказской железной дороги. В общей сложности было проанализировано 78 поездов. В качестве иллюстрации в таблице 12 представлены результаты анализа 10 поездов, выполненных в трёх различных режимах управления: автоматическом с использованием УСАВП, ручном управлении машинистом, а также в комбинированном режиме, предусматривающем взаимодействие автоведения и ручных воздействий локомотивной бригады.

Таблица 12 – Статистические данные, полученные на основе результатов имитационного моделирования продольно-динамических реакций в поезде

№	Дата поездки	Частоты попадания локальных экстремумов функции рывка в заданные диапазоны					
		–1...–0,7	–0,7...–0,35	–0,35...0	0...0,35	0,35...0,7	0,7...1
		$x_1^{(2)}$	$x_2^{(2)}$	$x_3^{(2)}$	$x_4^{(2)}$	$x_5^{(2)}$	$x_6^{(2)}$
Режим автоведения поезда (УСАВП)							
1	23.07.2020	2	8	$3,25 \cdot 10^5$	$3,26 \cdot 10^5$	4	3
2	20.08.2020	0	140	$3,5 \cdot 10^5$	$3,54 \cdot 10^5$	6	1
3	22.08.2020	4	12	$3,67 \cdot 10^5$	$3,86 \cdot 10^5$	12	5
Ручное управление машинистом							
4	30.08.2020	0	52	$3,22 \cdot 10^5$	$3,29 \cdot 10^5$	52	0
5	31.08.2020	0	5	$4,26 \cdot 10^5$	$4,49 \cdot 10^5$	2	0
6	11.09.2020	0	25	$3,47 \cdot 10^5$	$3,58 \cdot 10^5$	4	0
Комбинированный режим (УСАВП + машинист)							
7	03.07.2020	18	59	$3,69 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^5$	13	1
8	04.07.2020	1	2	$3,37 \cdot 10^5$	$3,54 \cdot 10^5$	2	2
9	11.07.2020	4	68	$3,33 \cdot 10^5$	$3,51 \cdot 10^5$	38	15
10	25.07.2020	2	66	$3,39 \cdot 10^5$	$3,52 \cdot 10^5$	30	4

Применим методику, использованную ранее в разделе 2.3.1. Для ранжирования весов переменных используем модель Фишберна. Учитывая при этом, что веса диапазонов попарно симметричны, получим значения:

$$c_1^{(2)} = c_6^{(2)} = 0,25; c_2^{(2)} = c_5^{(2)} = 0,1667; c_3^{(2)} = c_4^{(2)} = 0,0833 \text{ (таблица 13).}$$

Таблица 13 – Данные для расчёта оценок по критерию «продольная динамика»

№	Число локальных экстремумов функции рывка в диапазоне $x_i^{(2)}$, ед.	Вес $c_i^{(2)}$	Удельное число экстремумов рывка на 10 тыс. лок-км $h_i^{*(2)}$, ед.
1	31	0,25	190,2
2	437	0,1667	$2,68 \cdot 10^3$
3	$3,52 \cdot 10^6$	0,0833	$2,16 \cdot 10^7$
4	$3,64 \cdot 10^6$	0,0833	$2,23 \cdot 10^7$
5	163	0,1667	$1 \cdot 10^3$
6	31	0,25	190,2

Выполним оценку конкретных поездок (таблицы 14–15). Вычисление фактического (статистического) значения штрафа на одну локомотивную бригаду выполняется по формулам (21), (22), (24). Таким образом, при $N_{\psi} = 6$ получим:

$$\psi^{(2)} = \sum_{i=1}^6 \frac{h_i^{(2)}}{h_i^{*(2)}} \cdot c_i^{(2)}, \quad (28)$$

$$\Psi^{(2)} = 0,5 \cdot \psi^{(2)}. \quad (29)$$

Для построения функций принадлежности терм-множеств лингвистической переменной $E^{(2)}$ «продольная динамика» применяется методический подход, аналогичный использованному ранее в разделе 2.3.1. Графическое представление функций принадлежности, а также формулы для расчёта их значений соответствуют ранее использованной модели, разработанной для лингвистической переменной $E^{(1)}$ (см. раздел 2.3.1).

Таблица 14 – Вычисление оценки критерия «продольная динамика» на основе моделирования продольно-динамических реакций для выбранных поездок

№	Дата поездки	Частоты попадания локальных экстремумов функции рывка в заданные диапазоны						$\psi^{(2)}$	$\Psi^{(2)}$	$R^{(2)}$
		–1... –0,7	–0,7... –0,35	–0,35... 0	0... 0,35	0,35... 0,7	0,7... 1			
		$\psi_1^{(2)}$	$\psi_2^{(2)}$	$\psi_3^{(2)}$	$\psi_4^{(2)}$	$\psi_5^{(2)}$	$\psi_6^{(2)}$			
Режим автоведения поезда УСАВП										
1	23.07.20	0,161	0,031	0,077	0,075	0,041	0,242	0,627	0,314	4
2	20.08.20	0	0,534	0,083	0,081	0,061	0,081	0,84	0,42	5
3	22.08.20	0,323	0,046	0,087	0,088	0,123	0,403	1,07	0,535	7
Ручное управление машинистом										
4	30.08.20	0	0,198	0,076	0,075	0,532	0	0,881	0,441	6
5	31.08.20	0	0,019	0,101	0,103	0,02	0	0,243	0,122	1
6	11.09.20	0	0,095	0,082	0,082	0,041	0	0,3	0,15	2
Комбинированный режим (УСАВП + машинист)										
7	3.07.20	1,451	0,225	0,087	0,087	0,133	0,081	2,064	1,032	9
8	4.07.20	0,081	0,008	0,08	0,081	0,02	0,161	0,431	0,216	3
9	11.07.20.	0,323	0,259	0,079	0,08	0,389	1,21	2,34	1,17	10
10	25.07.20	0,161	0,252	0,08	0,081	0,307	0,323	1,204	0,602	8

Таблица 15 – Значения терм-множеств функций принадлежности лингвистической переменной «продольная динамика»

№	Дата	$R^{(2)}$	$\Psi^{(2)}$	Значения терм-множеств функций принадлежности				
				VH	HG	MD	LW	VL
Режим автоведения поезда УСАВП								
1	23.07.2020	4	0,314	0	0,744	0,256	0	0
2	20.08.2020	5	0,42	0	0,32	0,68	0	0
3	22.08.2020	7	0,535	0	0	0,86	0,14	0
Ручное управление машинистом								
4	30.08.2020	6	0,441	0	0,236	0,764	0	0
5	31.08.2020	1	0,122	0,512	0,488	0	0	0
6	11.09.2020	2	0,15	0,4	0,6	0	0	0
Комбинированный режим (УСАВП + машинист)								
7	3.07.2020	9	1,032	0	0	0	0	1
8	4.07.2020	3	0,216	0,136	0,864	0	0	0
9	11.07.2020	10	1,17	0	0	0	0	1
10	25.07.2020	8	0,602	0	0	0,592	0,408	0

2.3.3 Оценка соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «точность хода по расписанию»

Одной из приоритетных задач при эксплуатации ТПС и вождении поездов является строгое соблюдение установленной графиком движения точности прохождения контрольных пунктов. Однако по ряду причин, связанных с отказами технических средств, погодными условиями, человеческим фактором, допускаются отклонения от нормативного расписания. Важно анализировать эффективность эксплуатации подвижного состава при перевозке пассажиров и грузов по критерию выполнения графика движения поездов [176, 177].

Обозначим i – общее количество поездок, j – количество контрольных участков (КУ) в каждой поездке (станции, определяемые графиком), k – число отклонений от графика по вине локомотивной бригады, t_{ij}^z и t_{ij}^f – заданное и фактическое времена хода на j -м КУ в i -й поездке. Будем определять отклонение от графика как разность между графиковым временем хода по перегону и фактическим: $t_{ij} = t_{ij}^z - t_{ij}^f$, очевидно, если $\Delta t_{ij} > 0$ – наблюдается опережение

графика, если $\Delta t_{ij} < 0$ – отставание, $i \cdot j \leq k$. Согласно правилам, действующим в ОАО «РЖД», отклонение от графика фиксируется при $|\Delta t| \geq 1$ мин, а при $|\Delta t| \geq 6$ определяется серьёзное отклонение от графика, которое должно расследоваться установленным порядком. Исследование отклонений движения поезда от нормативного графика целесообразно выполнять посредством анализа системы ГИД «Урал – ВНИИЖТ», которая позволяет с дискретностью в 1 минуту выявлять опоздания или опережения по всем контрольным точкам (промежуточным станциям и станциям, где производятся операции по посадке и высадке пассажиров).

В таблице 16 представлены результаты анализа опыта эксплуатации электропоездов ЭП1М с пассажирскими поездами на участке Новочеркасск – Сохранивка Северо-Кавказской железной дороги. Нулевые значения соответствуют следованию согласно расписанию.

Таблица 16 – Результаты анализа данных системы ГИД «Урал – ВНИИЖТ» на предмет соблюдения точности хода по контрольным участкам в границах Северо-Кавказской железной дороги

№	№ поезда	Отклонения от нормативного расписания						
		0	1	2	3	4	5	6 и более
		$x_0^{(3)}$	$x_1^{(3)}$	$x_2^{(3)}$	$x_3^{(3)}$	$x_4^{(3)}$	$x_5^{(3)}$	$x_6^{(3)}$
1	29	8	8	4	0	2	1	0
2	103	9	6	3	3	1	1	0
3	293	4	5	5	5	1	2	1
4	83	9	6	3	2	1	2	0
5	159	5	5	3	3	6	1	0
6	187	5	7	3	4	3	0	1
7	49	9	3	1	7	2	1	0
8	225	1	8	9	4	0	1	0
9	339	6	4	3	6	3	1	0
10	125	5	7	3	4	2	2	0
11	135	6	2	3	8	2	2	0

В настоящей работе рассмотрены как случаи опозданий прибытия поезда на железнодорожные станции, так и факты прибытия ранее времени, установленного

нормативным графиком. Последние влекут значительные риски возникновения неграфиковых остановок поездов у проходных, входных и маршрутных светофоров, необоснованных торможений и перерасхода ТЭР, что является нарушением установленной технологии эксплуатации ТПС. В случае длительных опозданий свыше 6 минут их количество принимается кратным 6 минутам с применением операции математического округления.

Исследования показали, что среднее отклонение от нормативного графика при движении пассажирских поездов за одни сутки составило 1,79 минуты. При этом в 90 % случаев зафиксировано опережение графика, что указывает на склонность локомотивных бригад к формированию временного резерва с целью компенсации возможных нестандартных ситуаций. Однако данная практика сопряжена с повышенным расходом ТЭР и увеличением вероятности возникновения неграфиковых остановок.

Используем подход расчёта, рассмотренный ранее в разделах 2.3.1, 2.3.2. Ранжирование весов переменных выполнено аналогично с использованием модели Фишберна, получены значения: $c_1^{(3)} = 0,048$; $c_2^{(3)} = 0,095$; $c_3^{(3)} = 0,143$; $c_4^{(3)} = 0,19$; $c_5^{(3)} = 0,238$; $c_6^{(3)} = 0,286$ (таблица 17).

Таблица 17 – Данные для расчёта оценок по критерию «точность хода по расписанию»

№	Число отклонений от графика $x_i^{(3)}$, ед.	Вес $c_i^{(3)}$	Удельный показатель отклонений на 10 тыс. контрольных точек $h_i^{*(3)}$, ед.
1	61	0,048	$2,411 \cdot 10^3$
2	40	0,095	$1,581 \cdot 10^3$
3	46	0,143	$1,818 \cdot 10^3$
4	23	0,19	909,091
5	14	0,238	553,36
6	2	0,286	79,051

Вычисление фактического (статистического) значения штрафа на одну локомотивную бригаду выполняется аналогично ранее рассмотренным по формулам (21), (22), (24) (таблицы 18–19). Таким образом, при $N_{\psi} = 6$ получим:

$$\psi^{(3)} = \sum_{i=1}^6 \frac{h_i^{(3)}}{h_i^{*(3)}} \cdot c_i^{(3)} \quad (30)$$

$$\Psi^{(3)} = 0,5 \cdot \psi^{(3)} \quad (31)$$

Таблица 18 – Вычисление оценки показателя «точность хода по расписанию»

№	№ поезда	Отклонения от нормативного графика движения поездов (опоздания и опережения)						$\psi^{(3)}$	$\Psi^{(3)}$	$R^{(3)}$
		1	2	3	4	5	≥ 6			
		$\psi_1^{(3)}$	$\psi_2^{(3)}$	$\psi_3^{(3)}$	$\psi_4^{(3)}$	$\psi_5^{(3)}$	$\psi_6^{(3)}$			
1	29	0,069	0,104	0	0,182	0,187	0	0,542	0,271	2
2	103	0,052	0,078	0,103	0,091	0,187	0	0,511	0,256	1
3	293	0,043	0,131	0,171	0,091	0,374	1,573	2,383	1,192	11
4	83	0,052	0,078	0,068	0,091	0,374	0	0,663	0,332	5
5	159	0,043	0,078	0,103	0,545	0,187	0	0,956	0,478	9
6	187	0,061	0,078	0,137	0,273	0	1,573	2,122	1,061	10
7	49	0,026	0,026	0,239	0,182	0,187	0	0,66	0,33	4
8	225	0,069	0,235	0,137	0	0,187	0	0,628	0,314	3
9	339	0,035	0,078	0,205	0,273	0,187	0	0,778	0,389	6
10	125	0,061	0,078	0,137	0,182	0,374	0	0,832	0,416	7
11	135	0,017	0,078	0,274	0,182	0,374	0	0,925	0,463	8

Таблица 19 – Значения терм-множеств функции принадлежности «точность хода по расписанию»

№	№ поезда	$R^{(3)}$	$\Psi^{(3)}$	Значения терм-множеств				
				VH	HG	MD	LW	VL
1	29	2	0,271	0	0,916	0,084	0	0
2	103	1	0,256	0	0,976	0,024	0	0
3	293	11	1,192	0	0	0	0	1
4	83	5	0,332	0	0,672	0,328	0	0
5	159	9	0,478	0	0,088	0,912	0	0
6	187	10	1,061	0	0	0	0	1
7	49	4	0,33	0	0,68	0,32	0	0
8	225	3	0,314	0	0,744	0,256	0	0
9	339	6	0,389	0	0,444	0,556	0	0
10	125	7	0,416	0	0,336	0,664	0	0
11	135	8	0,463	0	0,148	0,852	0	0

Для построения функций принадлежности терм-множеств лингвистической переменной $E^{(3)}$ «точность хода по расписанию» применяется методический подход, аналогичный использованному ранее в разделах 2.3.1 и 2.3.2. Графическое представление функций принадлежности, а также формулы для расчёта их значений соответствуют ранее использованным моделям, разработанным для лингвистических переменных $E^{(1)}$ и $E^{(2)}$ (см. разделы 2.3.1, 2.3.2).

2.3.4 Оценка технологии эксплуатации подвижного состава по критерию «энергоэффективность»

Для оценки критерия технологии эксплуатации подвижного состава «энергоэффективность» Q_4 введем соответствующую лингвистическую переменную $E^{(4)}$ – «энергоэффективность», характеризующую отклонение расхода электроэнергии от нормы. В качестве базовой переменной $e_4 = \Delta A = \Psi^{(4)}$ определим отклонение значения расхода энергии от установленной нормы:

$$\Delta A = \frac{(A^{norm} - A^{fact})}{A^{norm}} \cdot 100 \%, \quad (32)$$

где ΔA – отклонение от нормы;

A^{norm} – нормативный расход ТЭР;

A^{fact} – фактический расход ТЭР.

$E^{(4)} = \{E_{VH}, E_{HG}, E_{MD}, E_{LW}, E_{VL}\}$, где исходя из практики нормирования расхода ТЭР примем E_{VH} – существенная экономия; E_{HG} – большая экономия; E_{MD} – значение близкое к норме; E_{LW} – большой перерасход; E_{VL} – критический перерасход [143]. График функций принадлежности лингвистической переменной «энергоэффективность», представлен на рисунке 14, а формулы для расчёта значений функций принадлежности в таблице 20, при следующих параметрах ФП: $a_1 = -5$; $a_2 = -2,5$; $a_3 = 0$; $a_4 = 2,5$; $a_5 = 5$

Таблица 20 – Формулы для расчёта значений функций принадлежности лингвистической переменной «энергоэффективность»

№ п/п	Терм-множества $E^{(4)}$	Функции принадлежности нечёткого множества $E^{(4)}$
1	$E_{VL}(\bar{E}_{VH}),$ $e_4 \in [-\infty; -2,5]$	$\mu_{E^{(4)}}(e_4) = \begin{cases} 1, & \text{если } e_4 < -5 \\ 1 - 0,4 \cdot (e_4 + 5), & \text{если } -5 \leq e_4 \leq -2,5 \end{cases}$
2	$E_{LW}(\bar{E}_{HG}),$ $e_4 \in [-5; 0]$	$\mu_{E^{(4)}}(e_4) = \begin{cases} -0,4 \cdot (-e_4 - 5), & \text{если } -5 \leq e_4 < -2,5 \\ 1 - 0,4 \cdot (e_4 + 2,5), & \text{если } -2,5 \leq e_4 \leq 0 \end{cases}$
3	$E_{MD}(\bar{E}_{MD}),$ $e_4 \in [-2,5; 2,5]$	$\mu_{E^{(4)}}(e_4) = \begin{cases} 0,4 \cdot (e_4 + 2,5), & \text{если } -2,5 \leq e_4 < 0 \\ -0,4 \cdot (e_4 - 2,5), & \text{если } 0 \leq e_4 \leq 2,5 \end{cases}$
4	$E_{HG}(\bar{E}_{LW}),$ $e_4 \in [0; 5]$	$\mu_{E^{(4)}}(e_4) = \begin{cases} 1 - 0,4 \cdot (-e_4 + 2,5), & \text{если } 0 \leq e_4 < 2,5 \\ -0,4 \cdot (e_4 - 5), & \text{если } 2,5 \leq e_4 \leq 5 \end{cases}$
5	$E_{VH}(\bar{E}_{VL}),$ $e_4 \in [2,5; +\infty]$	$\mu_{E^{(4)}}(e_4) = \begin{cases} 1 - 0,4 \cdot (-e_4 + 5), & \text{если } 2,5 \leq e_4 < 5 \\ 1, & \text{если } e_4 > 5 \end{cases}$

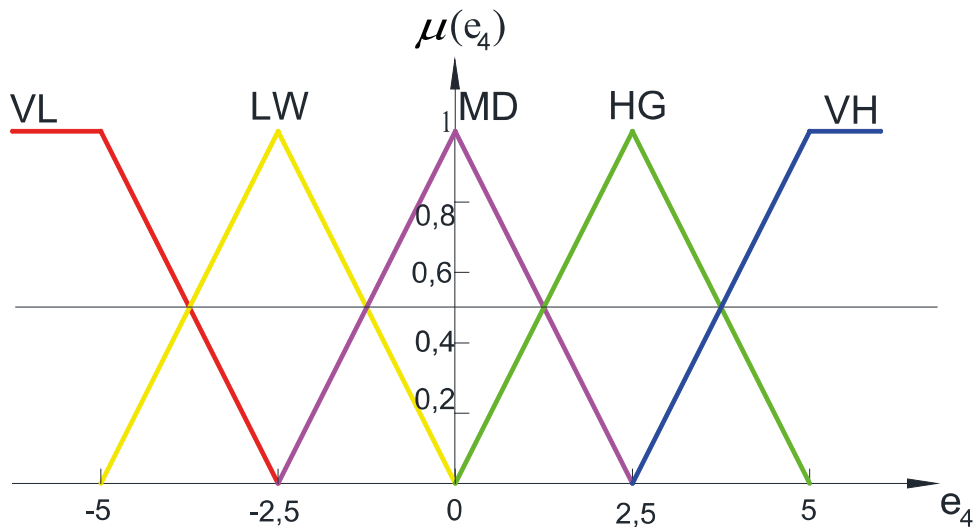


Рисунок 14 – Графики функций принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «энергоэффективность»

Пример расчёта значений функции принадлежности лингвистической переменной «энергоэффективность» представлен в 4 главе диссертации при расчёте комплексной оценки модели ведения поезда, реализуемой локомотивной бригадой пассажирского поезда.

Комплексная оценка модели ведения поезда формируется посредством дефаззификации суммарных значений по каждому из термов лингвистических переменных с учётом весов Фишберна в зависимости от приоритетности требований при управлении ТПС определённой категории поезда (см. рисунок 10). В качестве способа выполнения процедуры дефаззификации использован выбор чёткого числа, соответствующего максимуму функции принадлежности [161, 162].

В качестве примера, при оценке эксплуатации локомотивов с целью выбора энергоэффективной модели управления ТПС для ведения грузопассажирского поезда, приоритетность показателей в структуре комплексной оценки устанавливается в следующем порядке: «безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС», «энергоэффективность», «продольная динамика», «точность хода по расписанию». В соответствии с моделью Фишберна веса критериев принимают значения: $C^{(1)} = 0,4$; $C^{(2)} = 0,2$; $C^{(3)} = 0,1$; $C^{(4)} = 0,3$ (см. рисунок 10). Выбор модели ведения поезда при назначении на другую категорию поезда аналогичен и представлен в 4 главе, отличие состоит в распределении весов Фишберна.

Выводы по главе 2

1. Систематизация первичной информации средств объективного контроля и данных АСУ ЖТ, а также анализ реализуемых моделей ведения поезда показали возможность совершенствования технологии эксплуатации ТПС.

2. Обоснована целесообразность интеграции традиционных инструментов оценки выполненных поездок с перспективными методами интеллектуального анализа реализуемых моделей ведения поезда, основанными на применении методов нечёткой логики.

3. Разработана и апробирована универсальная методика оценки и выбора реализуемых моделей ведения поезда в зависимости от категории рейса с использованием нечётко-логических методов обработки информации, получаемой

от бортовых систем регистрации параметров эксплуатации локомотивов и АСУ ЖТ, применяемая во всех видах движения и тяги при управлении тяговым подвижным составом, как локомотивной бригадой, так и системами автоматизированного управления.

4. Проведённое исследование показало, что разработанная методика комплексной оценки модели ведения поезда, основанная на нечётко-логической расчётной модели с учётом значимости критериев, определяемой по формуле Фишберна, в ряде случаев обеспечивает более эффективное решение задачи выбора рациональной модели ведения поезда по сравнению с эвристическим подходом.

3 Разработка комплексной имитационной компьютерной модели поезда

3.1 Структура и назначение комплексной имитационной компьютерной модели

Для исследования электромеханических процессов при движении поезда при реализации различных моделей ведения и оценки энергоэффективности и продольной динамики целесообразно использовать метод имитационного компьютерного моделирования. В условиях лимитированной пропускной способности железнодорожной инфраструктуры, необходимости детального изучения сложных динамических процессов в системе «человек – поезд», а также при моделировании сценариев, потенциально влияющих на безопасность движения, вычислительный эксперимент на сегодняшний день представляет собой важный и зачастую незаменимый инструмент научного исследования. По сравнению с натурными и другими видами экспериментов, имитационное моделирование на персональных ЭВМ обладает рядом существенных преимуществ: низкой стоимостью, высоким быстродействием, возможностью выявления системности исследуемых процессов, высокой адекватностью, гибкостью варьирования структуры и, что наиболее важно, возможностью проведения экспериментов в условиях, которые сложно реализуемы в эксплуатационной практике [178, 179]. В рамках настоящего исследования, для изучения продольно-динамических реакций на предельно допустимых скоростях движения поезда и их влияния на комфортность перевозки пассажиров, потребовалось провести 78 натурных испытаний. Это обусловлено высокой плотностью движения поездов по графику, необходимостью следования по удалению за впереди идущими поездами на жёлтый и красно-жёлтый огни локомотивного светофора, что приводило к дополнительным торможениям и, как следствие, снижению чистоты эксперимента.

Комплексная модель исследуемого пассажирского поезда включает электровоз переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями

постоянного тока серии ЭП1М и 16 вагонов в составе: 15 двухэтажных вагонов (13 купейных серии № 61-4465, 1 купейного штабного серии № 61-4472, 1 вагона-ресторана № 61-4473) и 1 вагона-автомобилевоза серии № 61-4517 [180, 181]. Схема размещения вагонов соответствует реальному исследуемому физическому объекту – скорому фирменному поезду № 36 «Северная Пальмира» сообщением Санкт-Петербург – Адлер формирования Октябрьского филиала АО «ФПК» (рисунки 15, 16).

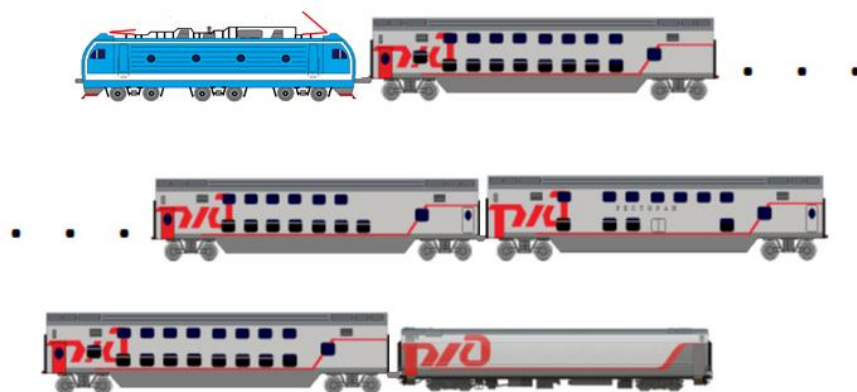


Рисунок 15 – Схема размещения локомотива и вагонов в имитационной компьютерной модели



Рисунок 16 – Скорый фирменный поезд № 36 «Северная Пальмира» сообщением Санкт-Петербург – Адлер

Технические характеристики пассажирских вагонов представлены в таблице 21 [182], а электровоза ЭП1М – в [183].

Таблица 21 – Технические характеристики пассажирских вагонов производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод» (ОАО «ТВЗ»)

№	Параметры	Модель вагона			
		61-4465	61-4472	61-4473	61-4517
1	Масса, т	64,8	68	63	61,6
2	Количество осей, ед.	4	4	4	4
3	Длина по осям автосцепок, мм	26232	26232	26232	25500
4	Ширина кузова наружная, мм	3154	3154	3154	3104
5	Высота, мм	5250	5250	5250	4350
6	Конструкционная скорость, км/ч	160	160	160	160
7	База вагона, мм	19000	19000	19000	17000
8	База тележки, мм	2500	2500	2500	2400
9	Тип сцепного устройства	БСУ-3	БСУ-3	БСУ-3	СА-3
10	Тормозная система	дисковая	дисковая	дисковая	колодочная

Управляемая электромеханическая модель построена на основе интеграции двух программных комплексов – «Универсальный механизм» (ПК УМ) и MATLAB/Simulink [184–186]. ПК УМ предназначен для автоматизации исследований механических систем, представленных в виде совокупности абсолютно упругих и твёрдых тел, связанных между собой силовыми и кинематическими связями. К объектам данной категории относятся локомотивы и вагоны. Метод подсистем, который реализован в программном обеспечении, позволяет упростить процедуру ввода кинематических и инерционных свойств сложного объекта, в частности модели пассажирского поезда, что сокращает трудоёмкость моделирования и ускоряет процесс исследования. Благодаря функции анимации движения, реализованной в процессе численного решения уравнений движения, а также возможности вывода результатов моделирования в реальном времени для каждой подвижной единицы, командно-инструкторский состав эксплуатационных локомотивных депо получил возможность проводить визуальный анализ моделей ведения поезда и принимать соответствующие

корректирующие управленческие решения. MATLAB/Simulink и пакет SimPowerSystem содержат набор блоков для построения виртуальных моделей электротехнических устройств и устройств силовой электроники. Интерфейс комплекса позволяет не только имитировать работу этих устройств, но и проводить анализ их характеристик и динамических параметров.

Объединение двух комплексов для моделирования механической и электрической подсистем модели осуществляется через S-функцию ПК УМ, подключаемую к *Simulink* с помощью библиотечного блока S-function (библиотека *Function&Tables*) и управляемую через входные параметры, в качестве которых выбраны силы тяги (рекуперации) и торможения вагонов и локомотива. Возможность задания произвольного количества параметров делает модель гибкой и пригодной для исследования широкого спектра сценариев. В нашем случае для решения поставленных задач в качестве выходных параметров выбраны сила тяги, скорость, расстояние, проходимое поездом, ускорение и значение рывка подвижных единиц.

Для корректного обмена данными между комплексами необходим программный код, написанный на языке MATLAB в ПК УМ, под названием m-файл. Он управляет S-функцией и генерируется автоматически при подготовке к экспорту в MATLAB/Simulink. В работах [184, 185] рассматривается связь через инструмент UM MATLAB Import, однако, при его использовании возникает ряд проблем, связанных с экспортом элементов из пакета силовой электроники SimPowerSystem. По этой причине было принято решение использовать инструмент ПК УМ CoSimulation из модуля UM Control, который отлично себя зарекомендовал, начиная с шестой версии программного обеспечения.

В единой комплексной модели объединены три подсистемы: электрическая, механическая и тормозная, которые включают 5 блоков: исходные данные, тягово-тормозные характеристики локомотива, электропневматический тормоз, модель поезда ПК УМ, модуль учёта расхода и возврата рекуперированной электроэнергии (рисунок 17).

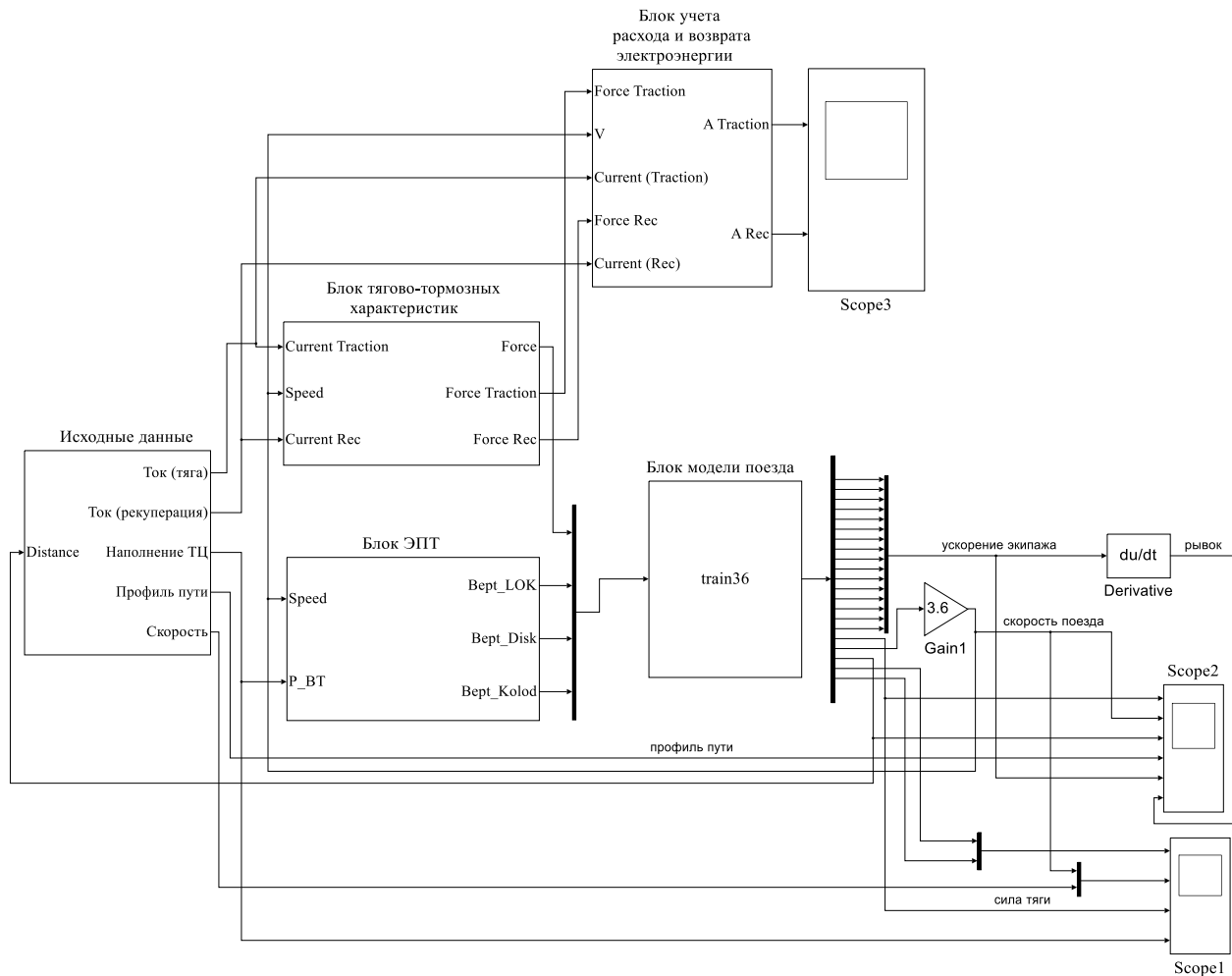


Рисунок 17 – Модель поезда, разработанная в MATLAB/Simulink

Макрогеометрия пути (план и профиль) формируется в ПК УМ. План состоит из прямых участков, кривых, стрелочных переводов и значений коэффициентов трения в контакте колеса с рельсом. Для создания переходных элементов смежных участков, возвышения наружного рельса и уширения колеи используется поточечный ввод элементов пути. Профиль создаётся из отрезков с заданной длиной, тангенсом угла уклона и радиусом скругления стыка со следующим участком. По данным Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры был смоделирован участок Лихая – Ростов-Главный протяжённостью 163 км (рисунки 18, 19) с учётом всех параметров кривых на участке. Допустимая скорость движения грузовым поездам установлена 80 км/ч, пассажирским – 120 км/ч.

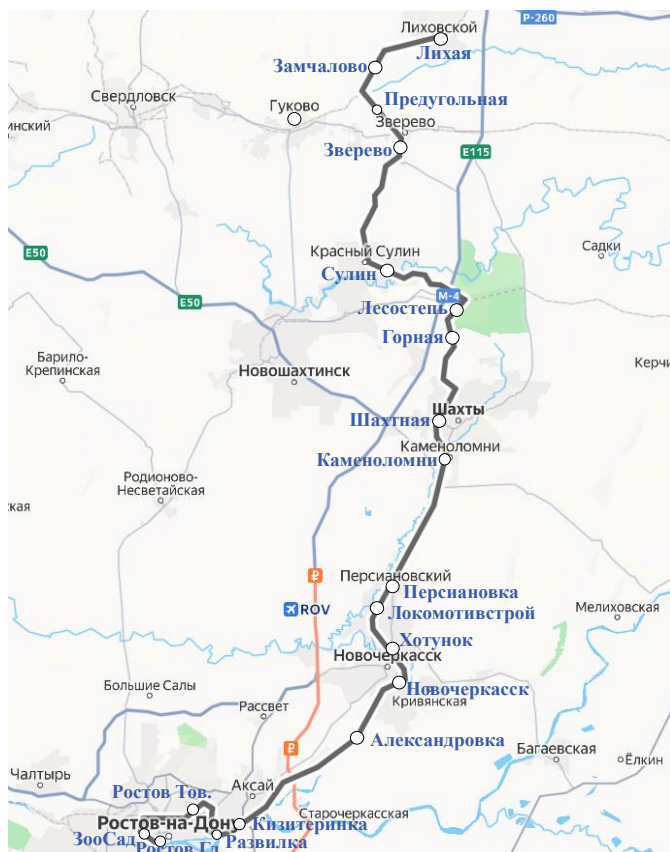


Рисунок 18 – Участок Лихая – Ростов-Главный Северо-Кавказской железной дороги с отдельными пунктами.

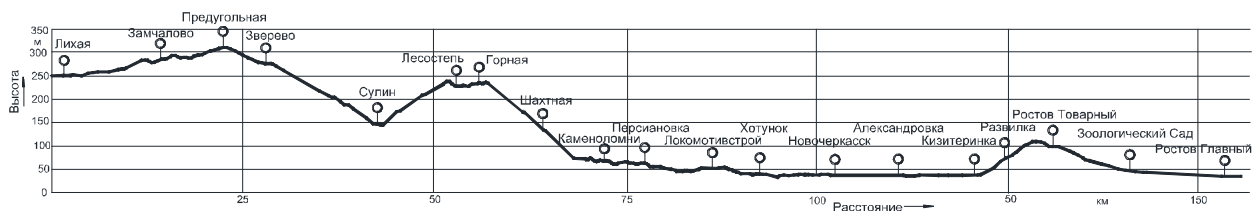


Рисунок 19 – Продольный профиль пути участка Лихая – Ростов-Главный Северо-Кавказской железной дороги

В качестве исходных данных для формирования управляющих воздействий при движении могут использоваться как параметры, полученные с УСАВП и других средств регистрации параметров движения, так и рассчитанные значения различных эксплуатационных характеристик. Блок регистрации параметров движения и автоведения (РПДА) осуществляет фиксацию более 40 основных характеристик, отражающих техническое состояние, энергопотребление, работу

пневматических систем и др. Сбор данных осуществляется с устройств УСАВП, КЛУБ-У и САУТ-ЦМ с дискретностью 1 раз в секунду и сохраняется в накопителе объёмом 64 Мб, что эквивалентно примерно 5000 км пробега локомотива. С помощью автоматизированного рабочего места по расшифровке параметров движения и автоведения (АРМ РПДА) производится считывание и расшифровка данных с последующей оценкой энергетических показателей модели ведения поезда (рисунок 20).



Рисунок 20 – Интерфейс АРМ РПДА

Данные для моделирования, полученные посредством записи регистратора УСАВП, структурируются в формате двумерной таблицы *Look-UP Table (2D)* и включают значения токов ТЭД в режимах тяги и рекуперации, давления в тормозных цилиндрах, скорости движения. Дополнительно в модель интегрируются параметры продольного профиля пути (рисунок 21). Именно такой подход позволяет воспроизвести движение реального поезда и исследовать множество процессов.

Благодаря высокой точности измеряемых параметров [187, 188], данные, полученные посредством регистратора, фактически являются уникальным ресурсом для проведения всестороннего исследования процессов, связанных с движением поезда, и оценки ключевых показателей работы ТПС.

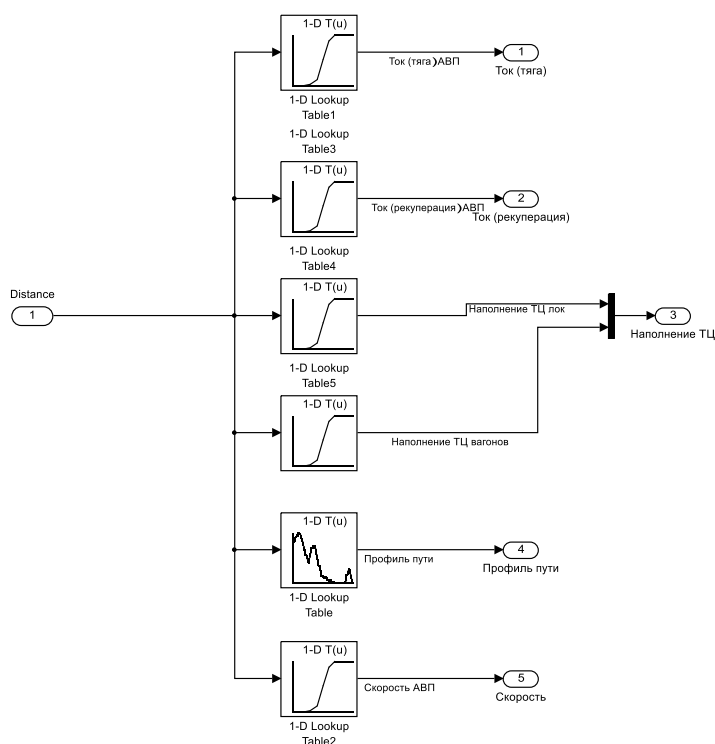


Рисунок 21 – Входная информация РПДА УСАВП, используемая при моделировании процессов движения поезда

3.2 Компьютерная модель механической части

Модели механической части электровоза и пассажирских вагонов разработаны в ПК УМ с применением модулей расчёта продольной динамики поезда *UM Train* и динамики рельсовых экипажей *UM Loco*. При моделировании объектов подвижного состава важно чётко понимать задачи исследования. Поезд представляет собой сложную электромеханическую систему с большим числом степеней свободы, движение которой описывается десятками дифференциальных уравнений, что значительно увеличивает время расчётов и затраты компьютерных ресурсов. Для анализа процессов продольных колебаний подвижного состава необходимо и достаточно использовать упрощённое представление экипажей, при котором следует пренебречь поперечной и вертикальной динамикой и принять допущение, что все тела движутся поступательно вдоль одной линии.

Модель электровоза создаётся одномассовой с одной степенью свободы (перемещение вдоль железнодорожного пути) и соединяется с вагонами

биполярными силовыми элементами, которые имитируют поглощающий аппарат и автосцепное устройство (рисунок 22).

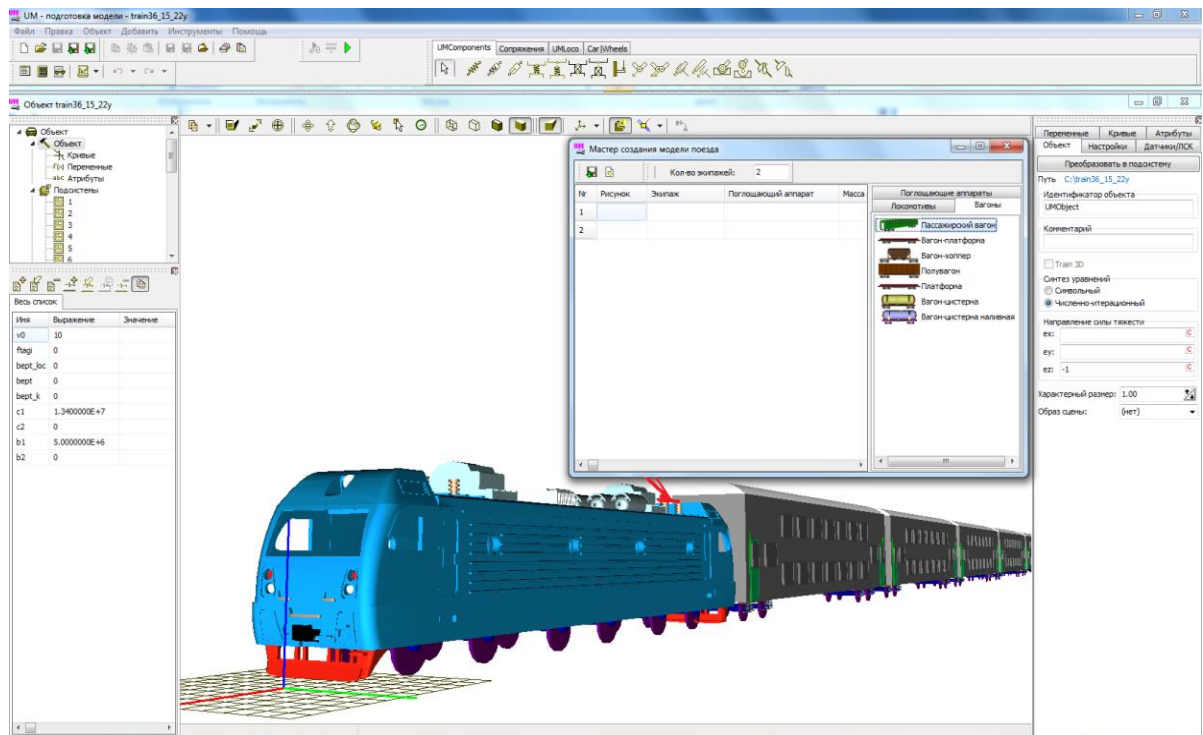


Рисунок 22 – Создание модели пассажирского поезда в ПК УМ

К локомотиву приложена внешняя сила тяги, формируемая в MATLAB/Simulink. Силы сопротивления движению локомотива $W_{\text{л}}$, N и пассажирских вагонов $W_{\text{в}}$, N определяются соответственно формулами из [142]:

$$W_{\text{л}} = 9,81 \cdot (2,4 + 0,009 \cdot v \cdot 3,6 + 0,00035 \cdot (v \cdot 3,6)^2) \cdot m_{\text{л}}, \quad (33)$$

$$W_{\text{в}} = 9,81 \cdot (0,7 \cdot m_{\text{в}} + (8 + 0,16 \cdot v \cdot 3,6 + 0,0023 \cdot (v \cdot 3,6)^2) \cdot 4), \quad (34)$$

где $m_{\text{л}}$ – масса локомотива, т;

$m_{\text{в}}$ – масса пассажирского вагона, т;

v – скорость движения, м/с.

Состав поезда сформирован на основе созданных автором моделей пассажирских вагонов, в которые заложены массогабаритные и технические характеристики двухэтажных вагонов, а также вагона-автомобилевоза производства ОАО «ТВЗ», г. Тверь. Силы сопротивления движению моделируются путём задания дополнительных сил, которые зависят от массы экипажа, его скорости и параметров плана и профиля пути.

3.3 Компьютерная модель электрической части

Управление движением поезда осуществляется электровозом серии ЭП1М, который эксплуатируется на железных дорогах России, электрифицированных на однофазном переменном токе промышленной частоты с номинальным напряжением 25 кВ. На локомотиве реализована система плавного регулирования сил тяги и рекуперативного торможения путём управления углом открытия тиристоры выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП). Моделирование элементов силовой схемы может быть выполнено в пакете MATLAB/Simulink [189].

Расчёт сил тяги и рекуперативного торможения возможно осуществить множеством способов, но для получения наиболее точной модели с высоким быстродействием необходимо воспользоваться проектными характеристиками, приведёнными в руководстве по эксплуатации (РЭ) завода-изготовителя. Этот метод позволяет учесть важные технические ограничения: предел сцепления колеса с рельсом, максимально допустимые токи, лимитированные уставкой реле перегрузки и параметрами блока балластных резисторов (при рекуперации), а также реализовать режим движения локомотива при ослаблении магнитного поля электрической машины.

Блок тяги создан при помощи двумерной таблицы *Look-UP Table (2D)*, в которую заложены значения параметров тяговой характеристики электровоза. На вход таблицы поступают значения скорости электровоза и силы тока на якоре ТЭД, после обработки массивов информации через интерполяционные

вычисления на выходе формируется значение силы тяги (рисунок 23). Блок электродинамического торможения рассчитывает силу аналогично, но отличие заключается в том, что массивы информации содержат данные рекуперативной характеристики.

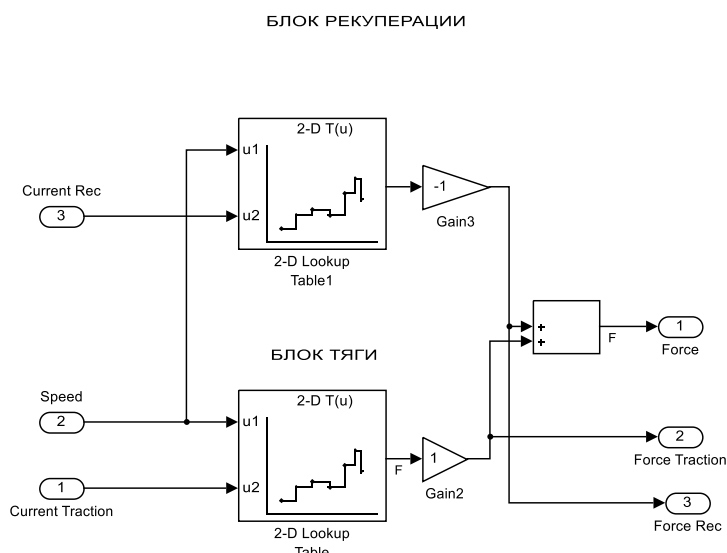


Рисунок 23 – Блоки тяги и рекуперативного торможения в MATLAB/Simulink

После расчёта сила тяги подается в качестве входного параметра в модель поезда ПК УМ, а на выходе формируется значение скорости, которое возвращается в подсистему расчёта управляющих воздействий MATLAB/Simulink. Таким образом, получается замкнутая система управления с обратной связью по скорости и току, обеспечивающая реалистичное моделирование взаимодействия между силовыми установками и динамикой движения поезда.

3.4 Модель блока расчёта тормозных сил

Тормоза поезда являются главным средством обеспечения безопасности движения. Несмотря на широкое применение рекуперативного торможения на современных локомотивах, основными средствами торможения остаются пневматические или электропневматические тормоза (ЭПТ).

Согласно требованиям нормативных документов [156, 190] пассажирские поезда должны эксплуатироваться на ЭПТ. При переводе машинистом ручки крана в положение служебного торможения путь электрического тока протекает через рабочий провод, который подходит к электровоздухораспределителю (ЭВР) каждого вагона. Далее происходит наполнение воздухом из запасного резервуара тормозного цилиндра, который через шток и рычажную передачу передаёт усилие и прижимает колодки к колесу, или клещевой тормозной механизм к фрикционной дисковой накладке, создавая тормозную силу. Благодаря большой скорости распространения электрического тока в цепи, ЭПТ обладает хорошей плавностью, управляемостью, эффективностью и сравнительно меньшей длиной тормозного пути по сравнению с традиционным пневматическим торможением.

Анализ режимов ведения поезда является приоритетной задачей в эксплуатационных локомотивных депо региональных дирекций тяги. От правильного управления машинистом тормозами зависят безопасность и комфорт при перевозке пассажиров и, как следствие, имидж компании ОАО «РЖД». По этой причине возникает необходимость добавления подсистемы управления ЭПТ в модель поезда, а благодаря данным, полученным из РПДА, появляется возможность комплексной оценки тормозных процессов и модели ведения поезда. Для получения наиболее точной модели, отражающей физические процессы, протекающие при торможении, необходимо воспользоваться действительной силой нажатия на колодку, которая зависит от конструкции подвижного состава и величины давления в цилиндрах.

Поскольку ЭПТ является прямодействующим и неавтоматическим (в процессе торможения не происходит разрядки тормозной магистрали), при расчёте тормозной силы достаточно определить её зависимость от давления в цилиндрах без моделирования сложных пневматических переходных процессов в магистральных сетях. Расчёт произведён в соответствии с рекомендациями [192, 193]. Тормозная сила поезда складывается из тормозных сил локомотива $B_{\kappa}^{\text{лок}}$ и вагонов, оборудованных колодочным $B_{\kappa}^{\text{ваг}}$ и дисковым $B_{\text{диск}}^{\text{ваг}}$ тормозами:

$$B = B_{\kappa}^{лок} + B_{\kappa}^{ваз} + B_{диск}^{ваз}, \quad (35)$$

Для колодочного тормоза тормозная сила определяется выражением:

$$B_{\kappa}^{ваз} = m_{\kappa} \cdot K_{доп} \cdot \varphi_{\kappa}, \quad (36)$$

где m_{κ} – количество тормозных колодок, действующих на ось;

$K_{доп}$ – допускаемая сила нажатия колодки на колесо, кН;

φ_{κ} – коэффициент трения тормозной колодки.

Допускаемая сила нажатия колодки на колесо зависит от усилия, развиваемого на штоке тормозного цилиндра:

$$P_{шт} = \frac{K_{доп} \cdot m_1}{n \cdot \eta_{рп}}, \quad (37)$$

где m_1 – число тормозных колодок, действующих от одного тормозного цилиндра;

n – передаточное число тормозной рычажной передачи;

$\eta_{рп}$ – коэффициент полезного действия рычажной передачи.

Усилие на штоке тормозного цилиндра также может быть вычислено через соотношение:

$$P_{шт} = \frac{\pi \cdot d_{тц}^2}{4} \cdot p_{тц} \cdot \eta_{тц} \cdot 10^6 - F_{пр} - F_{ар}, \quad (38)$$

где $p_{тц}$ – расчётное давление воздуха в тормозном цилиндре, МПа;

$d_{тц}$ – диаметр тормозного цилиндра, м;

$\eta_{тц}$ – коэффициент, учитывающий потери на трение в тормозном цилиндре;

$F_{\text{пр}}$ – усилие отпускной пружины тормозного цилиндра, Н;

$F_{\text{ар}}$ – усилие пружины авторегулятора тормозной рычажной передачи, приведённое к штоку тормозного цилиндра, Н.

Из формул (37), (38) получим выражение для $K_{\text{доп}}$:

$$K_{\text{доп}} = \frac{(p_{\text{тц}} \cdot \pi \cdot d_{\text{тц}}^2 \cdot \eta_{\text{тц}} \cdot 10^6 - 4 \cdot F_{\text{пр}} - 4 \cdot F_{\text{ар}}) \cdot n \cdot \eta_{\text{рп}}}{4 \cdot m_1}, \quad (39)$$

$$F_{\text{пр}} = P_o + l_{\text{ш}} \cdot ж_{\text{пр}}, \quad (40)$$

где P_o – усилие предварительного сжатия отпускной пружины тормозного цилиндра, Н;

$ж_{\text{пр}}$ – жёсткость отпускной пружины, Н/м;

$l_{\text{ш}}$ – расчётный выход штока тормозного цилиндра, м.

$$F_{\text{ар}} = (P_p + l_p \cdot ж_p) \cdot n_p, \quad (41)$$

где P_p – усилие предварительного сжатия пружины авторегулятора, Н;

$ж_p$ – жёсткость пружины авторегулятора, Н/м;

l_p – величина сжатия пружины авторегулятора при торможении, м;

n_p – коэффициент приведения, представляющий собой передаточное число механического привода авторегулятора.

На пассажирских вагонах установлен стержневой авторегулятор, для которого коэффициент приведения равен:

$$n_p = \frac{б}{а}, \quad (42)$$

где $а$, $б$ – размеры плеч горизонтального рычага рычажной передачи;

С учётом (40), (41), (42) для (39) можно записать:

$$K_{\text{доп}} = \frac{(p_{\text{тц}} \cdot \pi \cdot d_{\text{тц}}^2 \cdot \eta_{\text{тц}} \cdot 10^6 - 4 \cdot (P_0 + l_{\text{ш}} \cdot \text{ж}_{\text{пр}}) - 4 \cdot (P_{\text{р}} + l_{\text{р}} \cdot \text{ж}_{\text{р}}) \cdot \frac{\bar{b}}{a}) \cdot n \cdot \eta_{\text{рп}}}{4 \cdot m_1}. \quad (43)$$

Используя данные из источников [142, 193] получим:

$$K_{\text{доп(ваг)}} = 29,066 \cdot P_{\text{тц}} - 1,628, \text{кН}. \quad (44)$$

Коэффициент трения тормозной колодки из композиционного материала ТИИР-300 равен:

$$\varphi_{\text{к(ваг)}} = 0,44 \frac{0,1K_{\text{доп(ваг)}} + 20}{0,4K_{\text{доп(ваг)}} + 20} \cdot \frac{V + 150}{2V + 150}, \quad (45)$$

где V – скорость движения поезда, км/ч.

Подставив (44), (45) в (36), получим зависимость тормозной силы пассажирского вагона от величины давления в тормозном цилиндре:

$$B_{\text{к}}^{\text{ваг}} = 16 \cdot (29,066P_{\text{тц}} - 1,628) \cdot 0,44 \frac{0,1 \cdot (29,066P_{\text{тц}} - 1,628) + 20}{0,4 \cdot (29,066P_{\text{тц}} - 1,628) + 20} \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150}. \quad (46)$$

Согласно [183, 193] для локомотива серии ЭП1М выражение (43) примет вид:

$$K_{\text{доп(лок)}} = 31,37 \cdot P_{\text{тц}} - 0,694, \text{кН}. \quad (47)$$

Коэффициент трения тормозной колодки локомотива из чугуна равен:

$$\varphi_{\text{к(лок)}} = 0,6 \frac{1,6K_{\text{доп(лок)}} + 100}{8K_{\text{доп(лок)}} + 100} \cdot \frac{V + 100}{5V + 100}. \quad (48)$$

Подставив (47), (48) в (36), получим зависимость тормозной силы локомотива от величины давления в тормозном цилиндре:

$$B_{\kappa}^{\text{лок}} = 24 \cdot (31,37 \cdot P_{\text{тц}} - 0,694) \cdot 0,6 \frac{1,6 \cdot (31,37 \cdot P_{\text{тц}} - 0,694) + 100}{8 \cdot (31,37 \cdot P_{\text{тц}} - 0,694) + 100} \cdot \frac{V + 100}{5V + 100}. \quad (49)$$

На двухэтажных вагонах производства ОАО «ТВЗ», установлен клещевой тормозной механизм WZK36M16X10 (рисунок 24), оснащённый фрикционными дисковыми накладками производства немецкого концерна Knorr-Bremse. Дисковый тормоз в отличие от колодочного обладает рядом преимуществ: более высокой эффективностью, отсутствием перегрева и дефекта колёс на поверхности катания, меньшей массой, простотой конструкции и обслуживания, меньшей вибрацией тормозной рычажной передачи, высоким коэффициентом полезного действия (КПД). Именно эти характеристики обусловили необходимость широкого внедрения дисковых тормозных систем на пассажирском подвижном составе в условиях роста скоростей движения [191].

Для дискового тормоза тормозная сила определяется выражением [192]:

$$B_{\text{диск}}^{\text{ваг}} = m_n \cdot K_{\text{дон}}^{\text{диск}} \cdot \varphi_n \cdot \frac{r}{R}, \quad (50)$$

где m_n – количество тормозных накладок, действующих на диск;

$K_{\text{дон}}^{\text{диск}}$ – допустимая сила нажатия накладок на диск, кН;

φ_n – коэффициент трения тормозной накладки;

r – радиус тормозного диска, м;

R – радиус колеса, м.



Рисунок 24 – Клещевой тормозной механизм Knorr-Bremse с фрикционными дисковыми накладками

Общее усилие тормозной колодки рассчитывается по формуле согласно [194]:

$$K_{\text{доп}}^{\text{диск}} = (10 \cdot c \cdot A - 630) \cdot 11,41 \cdot \eta, \quad (51)$$

где c – давление в тормозном цилиндре клещевого механизма, бар;

A – эффективная (рабочая) площадь поршня, см²;

η – КПД тормоза.

В выражении (51) значения 630 (Н) – усилие возвратной (отпускной) пружины тормозного цилиндра; 11,41 – коэффициент приведения механизма.

На двухэтажных пассажирских вагонах серий № 61-4465, 61-4472, 61-4473 установлены диафрагменные тормозные цилиндры 16-го типа. Подставив их технические параметры в (51) и учитывая необходимость пересчёта давления в пневматических цепях поезда из кгс/см² в *бар*, получим зависимость усилия тормозной колодки на дисковую накладку в зависимости от величины давления в тормозном цилиндре:

$$K_{дон}^{диск} = (10 \cdot 0,981 \cdot c \cdot 105 - 630) \cdot 11,41 \cdot 0,97 = 11400 \cdot c - 6972,651, \text{ Н}, \quad (52)$$

где c – давление в тормозном цилиндре клещевого механизма, кгс/см².

Коэффициент трения тормозной накладки равен [192]:

$$\varphi_n = 0,44 \frac{0,1K_{дон}^{диск} + 20}{0,4K_{дон}^{диск} + 20} \cdot \frac{V + 150}{2V + 150}, \quad (53)$$

Подставив (52), (53) в (50), получим зависимость тормозной силы пассажирского вагона, оборудованного дисковым тормозом, от величины давления в тормозном цилиндре в МПа:

$$B_{диск}^{ваг} = 16 \cdot (116,25 \cdot P_{тц} - 6,97) \cdot 0,44 \cdot \frac{0,1 \cdot (116,25 \cdot P_{тц} - 6,97) + 20}{0,4 \cdot (116,25 \cdot P_{тц} - 6,97) + 20} \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \cdot \frac{0,32}{0,475}. \quad (54)$$

Выражения (46), (49), (54) необходимы для формирования тормозной силы в MATLAB/Simulink. Входными параметрами для создания тормозной силы вагона при ЭПТ являются величина давления в цилиндре и скорость движения поезда. Численные значения этих параметров подаются на блок задания функции *Fcn*, который содержит зависимости (46), (49) для колодочного тормоза и (54) для дискового. Для учёта переходных процессов в пневматической и механической частях тормозной рычажной передачи в модель введён блок фиксированной задержки сигнала *Transport delay*, который имитирует инерционность процесса. При отсутствии давления в тормозном цилиндре согласно (39) допустимая действительная сила нажатия колодки на колесо становится отрицательной, и только при появлении некоторого минимального давления, необходимого для создания силы противодействия сжатию пружины, это значение становится положительным. Для исключения отрицательного значения этой силы введён оператор *Compare to zero*. Согласно Правилам [190] нормативные значения

давления для ЭПТ учитываются в кгс/см², однако в формуле (46) это значение в МПа, перерасчёт указанной величины осуществляется оператором Gain, с коэффициентом 0,098066. Тормозная сила локомотива формируется аналогичным образом, только блок задания функции F_{cn} содержит зависимость (49). После расчёта тормозных сил вагонов и локомотива их значения подаются в качестве входных параметров в S-функцию ПК УМ (рисунок 25).

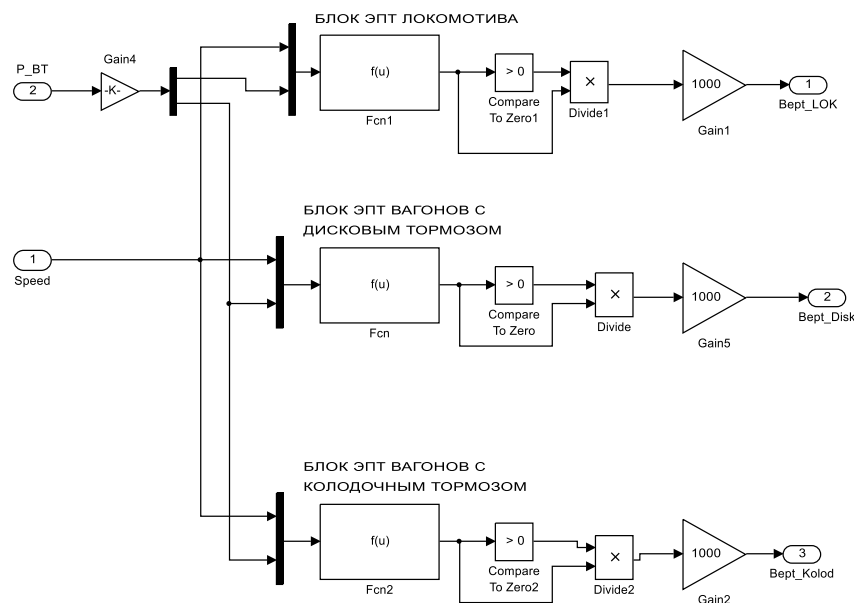


Рисунок 25 – Блок ЭПТ пассажирского поезда с колодочным и дисковым тормозами

3.5 Модель блока учёта расхода энергоресурсов на тягу поезда и возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть

Для оценки энергоэффективности перемещения поезда необходимо иметь достоверную информацию как о потреблении энергоресурсов, так и об их возврате в контактную сеть посредством рекуперации. Процесс преобразования электрической энергии из контактной сети в механическую и далее в поступательное движение поезда (рисунок 26) происходит по следующему пути: контактная сеть, тяговый трансформатор, ВИП, ТЭД, тяговый редуктор, контакт

«колесо-рельс» [195]. Каждый этап при этом сопровождается потерями: электрическими в обмотках ТЭД ($P_{эл}$); в скользящих контактах коллекторно-щёточного аппарата ($P_{щ}$); в стали, возникающими при перемагничивании стальных сердечников и включающими в себя потери на гистерезис и вихревые токи ($P_{маг}$); механическими ($P_{мех}$) и вентиляционными ($P_{вен}$) [196]. К механическим и вентиляционным относят потери на трение вращающихся частей о воздух, потери во вспомогательных машинах на создание потока охлаждающего воздуха, потери в подшипниках и др. В тяговом приводе эти потери выражаются в КПД его элементов. Для большинства из них диапазон изменения КПД незначительный и составляет не более 1 % (тяговый трансформатор, ВИП, тяговый редуктор), а для ТЭД изменяется от 0 до его номинального значения.

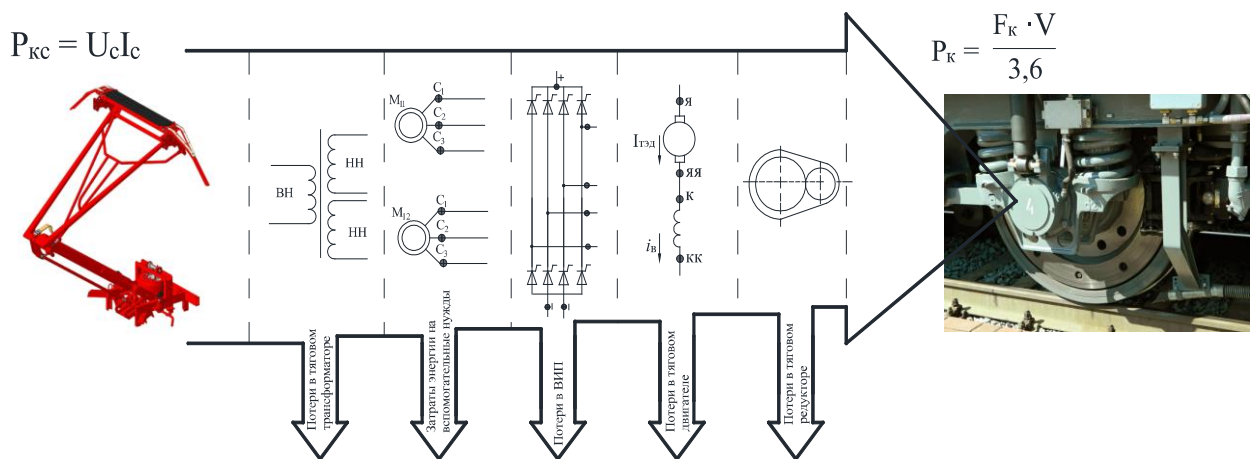


Рисунок 26 – Процесс преобразования энергии в тяговом электроприводе электровоза

При анализе электромеханических характеристик ТЭД НБ-520В установлено, что его КПД при номинальной мощности находится в границах значений от 0,91 до 0,946. Данные характеристики строятся при номинальном напряжении ТЭД 1000 В, а минимальная частота вращения якоря составляет 850 об/мин, что соответствует скорости движения электровоза 50,6 км/ч. Использование представленных характеристик для остальных режимов движения электровоза, существенно затруднено [183].

Для определения общего расхода энергетических ресурсов на тягу поезда необходимо определить выходную касательную мощность локомотива и потери, которые возникают на каждом цикле преобразования энергии.

Таким образом, суммарные потери в ТЭД можно записать как:

$$P_{общ} = P_{эл} + P_{щ} + P_{мех} + P_{маг} + P_{вен} \quad (55)$$

Для определения касательной мощности электровоза необходимо воспользоваться тяговыми характеристиками локомотива, на которых приведена зависимость силы тяги от скорости и тока якоря ТЭД [183]. Таким образом, для определения расхода энергоресурсов при ведении поезда необходимо знать скорость электровоза и ток ТЭД.

Полная мощность, потребляемая из контактной сети, определяется формулой:

$$P_{КС} = U_c I_c, \quad (56)$$

где U_c – напряжение в контактной сети, В;

I_c – ток, потребляемый из контактной сети, А.

Механическая мощность, реализуемая на ободу колеса (касательная мощность), определяется формулой:

$$P_K = \frac{F_K \cdot V}{3,6}, \quad (57)$$

где F_K – касательная сила тяги электровоза, Н;

V – скорость движения электровоза, км/ч.

Из формулы (55) наиболее широкий диапазон изменения имеют электрические потери в обмотках ТЭД, которые определяются формулой:

$$P_{эл} = I^2 \cdot R, \quad (58)$$

Сумма остальных видов потерь изменяется незначительно от тока якоря (для НБ-520В в диапазоне от 18 до 22 кВт согласно анализу информации РПДА), и для дальнейших расчётов можно принять её пропорциональной скорости движения электровоза, тогда общие потери в ТЭД можно определить по формуле:

$$P_{общ} = I_a^2 r_a + I_{\epsilon}^2 r_{\epsilon} + 20 \cdot 10^3 \frac{V}{140}, \quad (59)$$

где I_a – ток якоря ТЭД, А;

r_a – сопротивление якорной цепи, Ом;

I_{ϵ} – ток возбуждения, А;

r_{ϵ} – сопротивление обмотки возбуждения, Ом.

Для определения потреблённой энергии из сети, также необходимо учитывать мощность собственных нужд электровоза $P_{всп}$ (бортовая система, мотор-компрессор, мотор-вентиляторы и т.д.). Тогда формула для определения потребляемой мощности из контактной сети при движении в режиме тяги примет вид:

$$P_{КС} = \frac{\frac{F_K \cdot V}{3,6} + (I_a^2 r_a + I_{\epsilon}^2 r_{\epsilon} + 20 \cdot 10^3 \frac{V}{140}) \cdot 6}{\eta_{ТТ} \cdot \eta_{ВИП}} + P_{всп}^T, \quad (60)$$

где $\eta_{ТТ}$ – КПД тягового трансформатора;

$\eta_{ВИП}$ – КПД ВИП;

$P_{всп}^T$ – мощность собственных нужд электровоза при движении в режиме тяги, Вт.

Определение энергии рекуперации выполняется аналогично. Следует учитывать обратный процесс преобразования механической энергии движения

поезда в электрическую энергию, тогда формула для определения мощности, отданной в контактную сеть примет вид:

$$P_{KC}^{pek} = \left[\frac{F_K \cdot V}{3,6} - (I_a^2 r_a + I_\epsilon^2 r_\epsilon + 20 \cdot 10^3 \frac{V}{140}) \cdot 6 \right] \cdot \eta_{TT} \cdot \eta_{ВПП} - P_{ВСП}^{pek}, \quad (61)$$

где $P_{ВСП}^{pek}$ — мощность собственных нужд электровоза при движении в режиме рекуперации, Вт.

Разработанный в модели блок позволяет с высокой точностью получить эти значения в любой момент времени (рисунок 27).

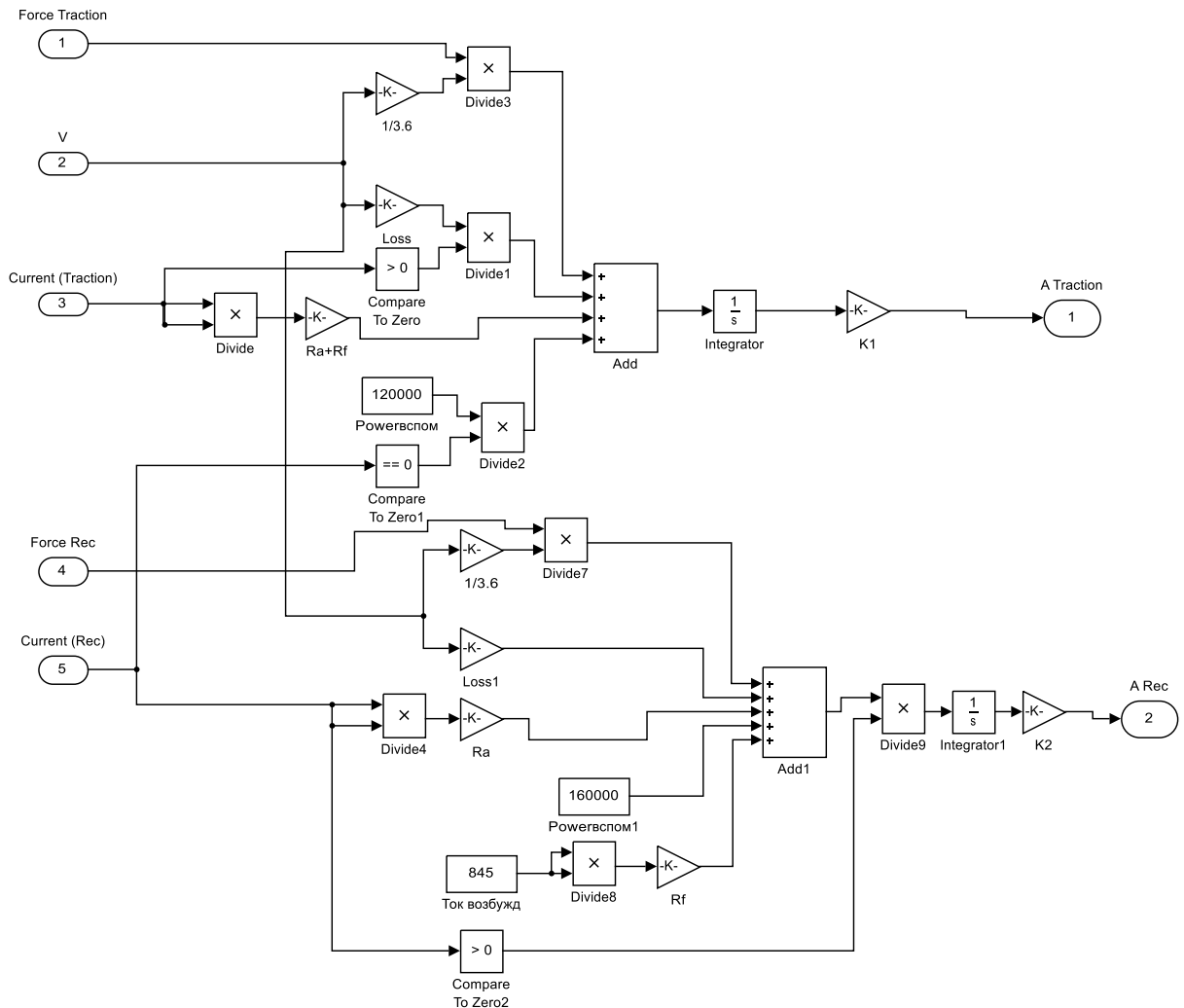


Рисунок 27 – Модуль учёта расхода электроэнергии на тягу поезда и возврата рекуперированной энергии

3.6 Результаты моделирования и проверка адекватности компьютерной модели

На рисунке 28 представлены результаты моделирования движения скорого пассажирского поезда № 36 «Северная Пальмира» сообщением Санкт-Петербург – Адлер на участке Лихая – Ростов-Главный Северо-Кавказской железной дороги.

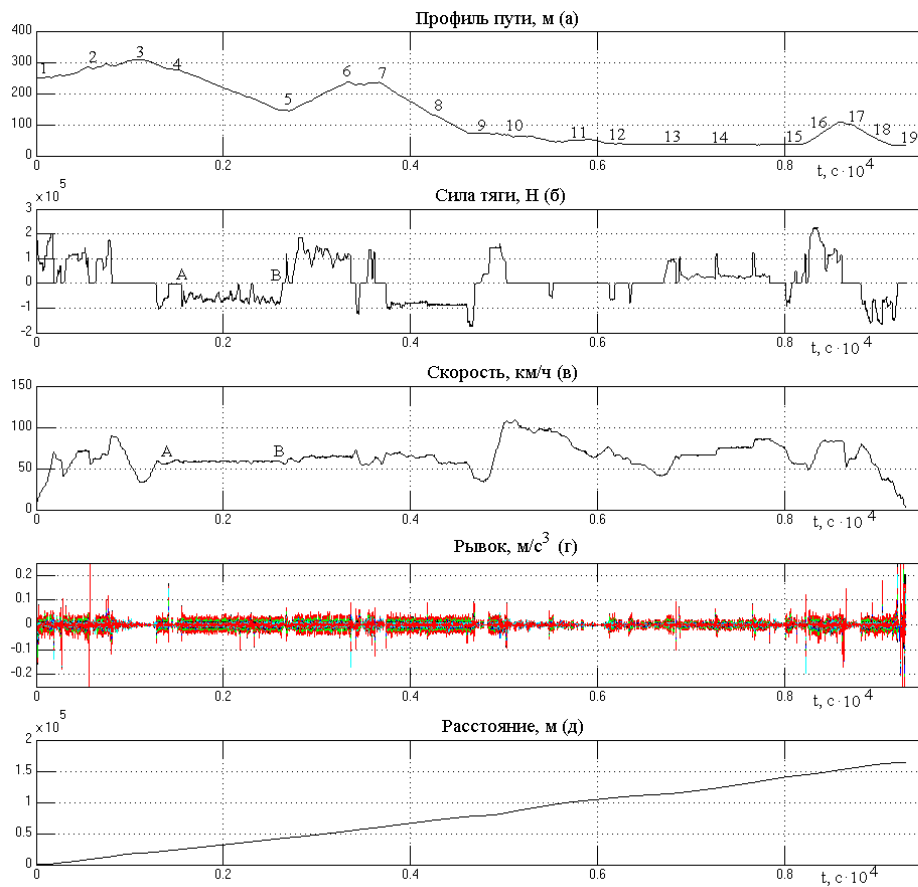


Рисунок 28 – Результаты моделирования:

a – профиль пути; *б* – сила тяги; *в* – скорость поезда; *г* – рывок;

д – расстояние, пройденное поездом

Одним из ключевых требований к имитационной модели является адекватность – способность обеспечивать достоверное отображение заданных свойств объекта-оригинала и не противоречить результатам натурного эксперимента. Верификация модели была проведена путём сопоставления

характера изменения и численных значений кривой скорости движения поезда, расхода и возврата рекуперированной электроэнергии, полученных по данным средств объективного контроля (РПДА и КЛУБ-У) и выходной информации модели на участке Лихая – Ростов-Главный.

Под руководством автора, непосредственно управляющего ТПС, был проведён ряд натурных экспериментов с моделированием различных ситуаций с целью анализа энергоэффективности и продольной динамики при обеспечении требуемого уровня безопасности движения и комфорта перевозки пассажиров.

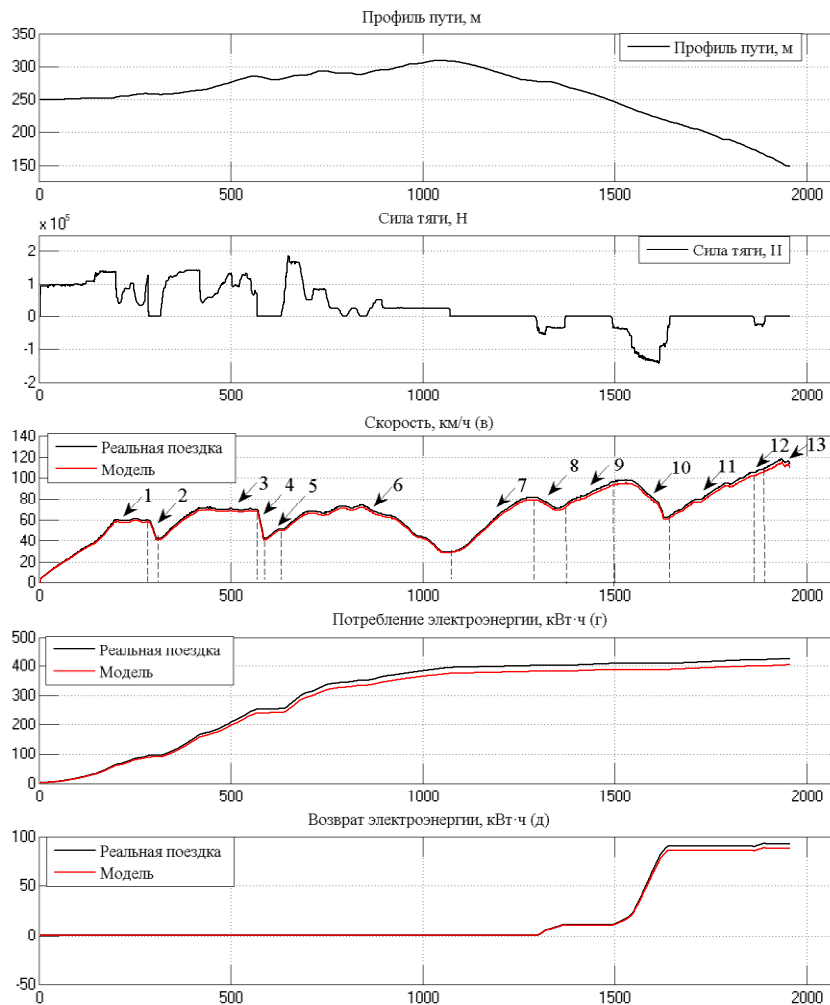


Рисунок 29 – Результаты эксперимента и моделирования:

a – профиль пути; *б* – сила тяги; *в* – скорость поезда; *г* – потребление электроэнергии; *д* – возврат электроэнергии

На рисунке 29 представлены результаты эксперимента и моделирования движения исследуемого объекта на участке Лихая – Сулин, протяжённостью 41 км, во всех режимах управления ТПС. Установлено, что модель достаточно точно и корректно описывает процессы движения, их численные значения и характер изменения во всех шести режимах: тяга (элементы № 1, 3, 6); рекуперативное торможение (элементы № 8, 12); ЭПТ (элементы № 4, 13); пневматическое торможение (элемент № 2), выбег (элементы № 5, 7, 9, 11); рекуперативное торможение в сочетании с ЭПТ (элемент № 10). При анализе графиков скорости, полученных при натурном эксперименте и моделировании, установлено, что погрешность составила 1,65 %. Аналогично, определена адекватность расчёта расхода и возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть (рисунок 29, а, б). Погрешность составила 1,75 %.

Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной компьютерной имитационной модели, построенной на основе применения основных положений теории электрической тяги, механики и электротехники. Корректность принятых допущений, структура модели и стратегия проведения вычислительного эксперимента обеспечивают надёжность полученных выводов и соответствие их целям диссертационного исследования.

Выводы по главе 3

1. Предложен и реализован комплексный подход к моделированию движения поезда как сложного электромеханического объекта за счёт применения программных комплексов «Универсальный механизм» и MATLAB/Simulink, что позволило объединить модели механической и электрической частей в единую систему с обратными связями и обеспечить воспроизведение взаимосвязи процессов управления силовой схемой локомотива и формирования продольно-динамических реакций подвижного состава.

2. Разработана комплексная компьютерная имитационная модель пассажирского поезда, включающая электровоз серии ЭП1М и состав из 16

вагонов, что позволяет комплексно исследовать модель ведения поезда, включая процессы тяги, выбега, рекуперативного, пневматического и электропневматического торможения.

3. При моделировании электрической и механической частей, в частности силовой схемы локомотива и тормозной системы поезда, использованы технические характеристики завода-изготовителя подвижного состава (тяговая, тормозная, электромеханическая характеристики) с учётом всех ограничений.

4. Получены математические зависимости тормозной силы поезда от величины давления воздуха в тормозных цилиндрах для колодочного и дискового тормозов вагона и локомотива, не требующие дополнительных аппроксимаций, что обеспечивает высокую точность и адекватность моделирования процессов при движении поезда.

5. Проведённая верификация подтвердила высокую степень соответствия разработанной комплексной компьютерной модели экспериментальным исследованиям (погрешность не превышает 2 %), что доказывает её адекватность и возможность использования для анализа энергоэффективности, продольной динамики и безопасности движения.

6. Разработанная комплексная компьютерная модель использовалась в эксплуатационном локомотивном депо Лихая Северо-Кавказской железной дороги для оценки моделей ведения поезда локомотивными бригадами и формирования их рейтингов, что имеет практическую значимость для совершенствования технологий эксплуатации.

4 Экспериментальные исследования влияния моделей ведения поезда на технологию эксплуатации с позиции энергоэффективности, безопасности и динамики движения подвижного состава

4.1 Планирование и проведение экспериментальных исследований на участке железной дороги

Анализ проблемной области, представленный в главах 1–3, наряду с разработанной методикой оценки технологии эксплуатации ТПС и результатами имитационного моделирования, позволил перейти к практической реализации предложенных подходов. В частности, обоснована возможность совершенствования технологии эксплуатации ТПС за счёт разработки алгоритмов и методик назначения локомотивных бригад с учётом специфики моделей ведения поезда и требований, предъявляемых к различным типам рейсов.

Важной составной частью исследований является планирование и проведение натурных экспериментальных исследований на участке железной дороги. Именно этот подход позволяет обеспечить достоверную проверку корректности принятых допущений и практическую верификацию предложенных методик.

Для проведения экспериментов был выбран участок Лихая – Ростов-Главный Северо-Кавказской железной дороги, который включает в себя весь набор элементов плана и профиля пути и позволяет исследовать все режимы управления ТПС для различных моделей ведения поезда. Характеристики участка приведены в главе 3. Программа испытаний предусматривала проведение экспериментальных поездок с пассажирским поездом № 36 «Северная Пальмира». Целью являлась оценка выполнения требований безопасности движения, технологической стабильности, надёжности, комфортности перевозки пассажиров, точности хода по расписанию, энергоэффективности в процессе эксплуатации ТПС. При этом в группу испытуемых были включены машинисты с различными моделями ведения поезда, разным уровнем профессиональной

подготовки и квалификации. Продолжительность этой работы составила 4 месяца (рисунок 30) в период с июня по сентябрь 2020 года [197]. Эксперимент проводился с использованием двух ситуационных моделей назначения локомотивных бригад на рейс: первая – с использованием разработанной автором методики отбора с учётом модели ведения и квалификационных характеристик, вторая – традиционная, при которой наряд формировался случайным образом нарядчиком на основе сменно-суточного плана эксплуатационной работы.

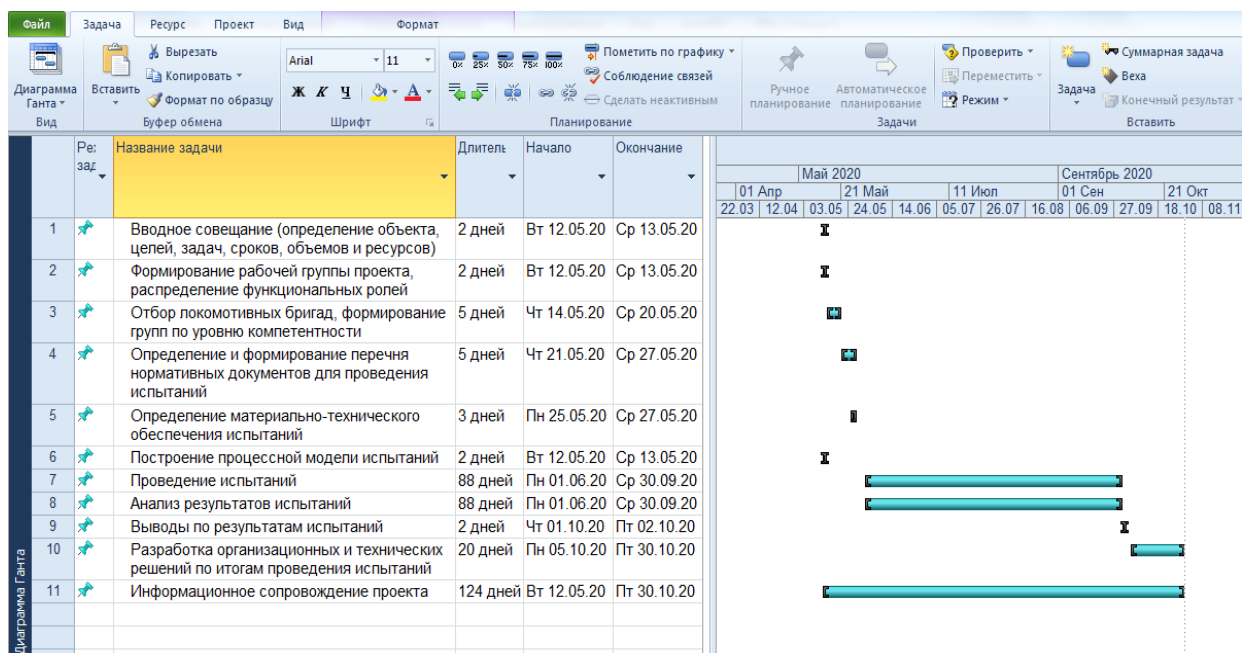


Рисунок 30 – Диаграмма Ганта жизненного цикла реализации экспериментальных исследований

Для определения значений критериев соблюдения технологии эксплуатации ТПС в рамках системы «машинист – локомотив» была проведена оценка процессов управления во всех трёх возможных режимах: с использованием УСАВП, в ручном режиме (управление машинистом) и комбинированном (совместное управление УСАВП и машинистом) [198].

С целью исключения влияния метеорологических факторов (температуры и климатических условий) период проведения экспериментов был ограничен летне-осенним временем года. В указанный период плотность и пропускная

способность на полигоне Северо-Кавказской железной дороги сохранялись практически постоянными, что повысило сопоставимость полученных результатов и их прикладную значимость.



Рисунок 31 – Схема размещения вагонов в составе пассажирского поезда № 36
«Северная Пальмира»

Состав поезда Октябрьского филиала АО «ФПК» включал электровоз серии ЭП1М и 15 вагонов: 13 двухэтажных купейных (серия 61-4465), 1 штабной вагон (серия 61-4472) и 1 вагон-ресторан (серия 61-4473), как показано на рисунке 31. Общая масса состава составляла 1105 тонн, длина – 416 метров. Подробные технические характеристики используемого подвижного состава приведены в руководствах по эксплуатации. Движение поезда выполнялось в строгом соответствии с утверждённым нормативным графиком. Проведение ремонтно-путевых работ на инфраструктуре в рассматриваемый период не осуществлялось. Следование осуществлялось исключительно по главным путям станций и перегонов, отклонения на боковые пути исключались. Также в процессе испытаний не допускались аварийные и нестандартные ситуации, связанные с неисправностями подвижного состава, нарушениями в работе устройств СЦБ, электроснабжения, систем безопасности или состояния пути.

4.2 Анализ экспериментальных исследований соблюдения технологии эксплуатации при приоритетном критерии «продольная динамика»

Проблема продольно-динамических реакций, возникающих в процессе движения поезда, обусловлена их высоким потенциалом риска для безопасности и

надёжности эксплуатации подвижного состава, а также для обеспечения безопасности и комфорта пассажиров. В грузовых поездах, особенно повышенной массы и длины, включая соединённые, неверное управление тягой и торможением может привести к обрывам автосцепных устройств. Эти инциденты сопровождаются значительными временными задержками в продвижении поездопотока и остановкой важнейших транспортных направлений. В пассажирских поездах нарушение плавности хода становится причиной жалоб пассажиров, а также может приводить к травмам различной степени тяжести.

Рациональный выбор модели ведения поезда, направленный на минимизацию продольно-динамических реакций, осуществлялся на основании методики, разработанной во второй главе настоящей диссертации [174]. Исследования выполнялись на базе эксплуатационного локомотивного депо Лихая Северо-Кавказской дирекции тяги. В качестве иллюстрации приведён пример выбора рациональной модели ведения поезда для выполнения специального рейса с организованной группой детей («детский» поезд) на участке Лихая – Ростов-Главный, протяжённостью 163 км. Схема формирования состава приведена на рисунке 31. Согласно методике при выборе модели ведения поезда в дополнение к соблюдению базовых требований по безопасности, надёжности и технологии эксплуатации ТПС, приоритетное значение придаётся параметрам, обеспечивающим комфортность перевозки пассажиров и снижение уровней продольно-динамических воздействий на состав. Обработка данных производилась по результатам работы 21 машиниста электровоза, имеющих допуск к самостоятельному управлению пассажирскими поездами на данном участке. Из них 16 машинистов имеют первый класс квалификации и 5 – второй, стаж работы в должности варьируется от 6 до 29 лет. Исходные данные представлены в таблице 22. Расчёты интегральной оценки технологии эксплуатации ТПС с минимизацией критерия «продольная динамика» представлены в таблицах 23–25.

Таблица 22 – Исходные данные о локомотивных бригадах для выполнения рейса с поездом № 36 «Северная Пальмира»

№	ФИО	Стаж, лет	Класс	Пробег ·10 ⁴ , км	$\Psi^{(1)}$	$\Psi^{(2)}$	$\Psi^{(3)}$	$\Psi^{(4)}$
1	Т.А.В.	6	2	6,1123	0	0,762	0,596	3,297
2	С.А.Ю.	16	1	6,4977	0	0,511	0,456	-0,511
3	О.А.А.	13	1	4,2811	0	0,244	0,6	1,751
4	Б.А.В.	15	1	6,5646	0	0,692	0,615	3,606
5	М.Е.С.	8	2	5,2124	0,016	0,936	0,615	-0,603
6	В.И.В.	18	2	4,8721	0,018	0,822	0,703	-0,966
7	С.Ю.А.	18	1	6,1891	0,028	0,422	0,52	-4,564
8	М.Р.В.	17	1	5,8035	0,029	0,528	0,455	-1,124
9	Т.Д.И.	18	1	5,9458	0,036	0,616	0,355	0,656
10	М.А.А.	10	1	5,5574	0,046	0,74	0,658	-2,898
11	Н.И.С.	17	1	5,944	0,052	0,488	0,748	1,153
12	Т.А.В.	19	1	4,8622	0,052	0,526	0,654	0,05
13	Г.А.Ю.	17	2	5,265	0,08	0,925	0,487	-1,571
14	С.А.В.	20	1	5,9904	0,116	0,766	0,524	0,01
15	К.В.В.	13	1	4,845	0,131	0,742	0,611	-1,806
16	Ч.В.В.	8	2	4,6261	0,141	0,956	0,489	-0,352
17	Ц.А.В.	18	1	5,6089	0,141	0,235	0,698	-2,013
18	Д.А.Н.	19	1	5,5834	0,149	0,328	0,416	1,379
19	Б.В.И.	20	1	5,4597	0,184	0,876	0,663	-0,77
20	М.А.А.	9	1	4,926	0,195	0,248	0,536	2,799
21	Е.С.А.	29	1	6,2245	0,259	0,845	0,385	-0,28

В результате расчётов по разработанной методике в качестве рациональной была определена модель ведения поезда, реализуемая локомотивной бригадой под управлением машиниста О.А.А., рейтинг которой составил $E_{st} = 0,774$ (1-е место в рейтинге). Это значение соответствует высокому уровню соблюдения технологии при минимизации критерия «продольная динамика» $VH=0,096$ и $HG=0,904$. Модель ведения поезда, реализуемая данной бригадой, была успешно апробирована при перевозке организованной группы детей на участке Лихая – Ростов-Главный 31.08.2020 г. в составе скорого фирменного поезда № 36 «Северная Пальмира».

Таблица 23 – Значения термов лингвистических переменных критериев оценки модели ведения поезда

№	Ф.И.О.	Безопасность движения, ...					Продольная динамика					Точность хода ...					Энергоэффективность				
		VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL
1	Т.А.В.	1	0	0	0	0	0	0	0	0,952	0,048	0	0	0,616	0,384	0	0,319	0,681	0	0	0
2	С.А.Ю.	1	0	0	0	0	0	0	0,956	0,044	0	0	0,176	0,824	0	0	0	0	0,796	0,204	0
3	О.А.А.	1	0	0	0	0	0,024	0,976	0	0	0	0	0	0,6	0,4	0	0	0,7	0,3	0	0
4	Б.А.В.	1	0	0	0	0	0	0	0,232	0,768	0	0	0	0,54	0,46	0	0,442	0,558	0	0	0
5	М.Е.С.	0,936	0,064	0	0	0	0	0	0	0,256	0,744	0	0	0,54	0,46	0	0	0	0,759	0,241	0
6	В.И.В.	0,928	0,072	0	0	0	0	0	0	0,712	0,288	0	0	0,188	0,812	0	0	0	0,614	0,386	0
7	С.Ю.А.	0,888	0,112	0	0	0	0	0,312	0,688	0	0	0	0	0,92	0,08	0	0	0	0	0,174	0,826
8	М.Р.В.	0,884	0,116	0	0	0	0	0	0,888	0,112	0	0	0,18	0,82	0	0	0	0	0,55	0,45	0
9	Т.Д.И.	0,856	0,144	0	0	0	0	0	0,536	0,464	0	0	0,58	0,42	0	0	0	0,262	0,738	0	0
10	М.А.А.	0,816	0,184	0	0	0	0	0	0,04	0,96	0	0	0	0,368	0,632	0	0	0	0	0,841	0,159
11	Н.И.С.	0,792	0,208	0	0	0	0	0,048	0,952	0	0	0	0	0,008	0,992	0	0	0,461	0,539	0	0
12	Т.А.В.	0,792	0,208	0	0	0	0	0	0,896	0,104	0	0	0	0,384	0,616	0	0	0,02	0,98	0	0
13	Г.А.Ю.	0,68	0,32	0	0	0	0	0	0	0,3	0,7	0	0,052	0,948	0	0	0	0	0,372	0,628	0
14	С.А.В.	0,536	0,464	0	0	0	0	0	0	0,936	0,064	0	0	0,904	0,096	0	0	0,004	0,996	0	0
15	К.В.В.	0,476	0,524	0	0	0	0	0	0,032	0,968	0	0	0	0,556	0,444	0	0	0	0,278	0,722	0
16	Ч.В.В.	0,436	0,564	0	0	0	0	0	0	0,176	0,824	0	0,044	0,956	0	0	0	0	0,859	0,141	0
17	Ц.А.В.	0,436	0,564	0	0	0	0,06	0,94	0	0	0	0	0	0,208	0,792	0	0	0	0,195	0,805	0
18	Д.А.Н.	0,404	0,596	0	0	0	0	0,688	0,312	0	0	0	0,336	0,664	0	0	0	0,552	0,448	0	0
19	Б.В.И.	0,264	0,736	0	0	0	0	0	0	0,496	0,504	0	0	0,348	0,652	0	0	0	0,692	0,308	0
20	М.А.А.	0,22	0,78	0	0	0	0,008	0,992	0	0	0	0	0	0,856	0,144	0	0,12	0,88	0	0	0
21	Е.С.А.	0	0,964	0,036	0	0	0	0	0	0,62	0,38	0	0,46	0,54	0	0	0	0	0,888	0,112	0

Таблица 24 – Значения термов лингвистических переменных с учётом весов Фишберна.

№	Ф.И.О.	Безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС $C^{(1)} = 0,4$					Продольная динамика $C^{(2)} = 0,3$					Точность хода по расписанию $C^{(3)} = 0,2$					Энергоэффективность $C^{(4)} = 0,1$				
		VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL
1	Т.А.В.	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0,286	0,014	0	0	0,123	0,077	0	0,032	0,068	0	0	0
2	С.А.Ю.	0,4	0	0	0	0	0	0	0,287	0,013	0	0	0,035	0,165	0	0	0	0	0,08	0,02	0
3	О.А.А.	0,4	0	0	0	0	0,007	0,293	0	0	0	0	0	0,12	0,08	0	0	0,07	0,03	0	0
4	Б.А.В.	0,4	0	0	0	0	0	0	0,07	0,23	0	0	0	0,108	0,092	0	0,044	0,056	0	0	0
5	М.Е.С.	0,374	0,026	0	0	0	0	0	0	0,077	0,223	0	0	0,108	0,092	0	0	0	0,076	0,024	0
6	В.И.В.	0,371	0,029	0	0	0	0	0	0	0,214	0,086	0	0	0,038	0,162	0	0	0	0,061	0,039	0
7	С.Ю.А.	0,355	0,045	0	0	0	0	0,094	0,206	0	0	0	0	0,184	0,016	0	0	0	0	0,017	0,083
8	М.Р.В.	0,354	0,046	0	0	0	0	0	0,266	0,034	0	0	0,036	0,164	0	0	0	0	0,055	0,045	0
9	Т.Д.И.	0,342	0,058	0	0	0	0	0	0,161	0,139	0	0	0,116	0,084	0	0	0	0,026	0,074	0	0
10	М.А.А.	0,326	0,074	0	0	0	0	0	0,012	0,288	0	0	0	0,074	0,126	0	0	0	0	0,084	0,016
11	Н.И.С.	0,317	0,083	0	0	0	0	0,014	0,286	0	0	0	0	0,002	0,198	0	0	0,046	0,054	0	0
12	Т.А.В.	0,317	0,083	0	0	0	0	0	0,269	0,031	0	0	0	0,077	0,123	0	0	0,002	0,098	0	0
13	Г.А.Ю.	0,272	0,128	0	0	0	0	0	0	0,09	0,21	0	0,01	0,19	0	0	0	0	0,037	0,063	0
14	С.А.В.	0,214	0,186	0	0	0	0	0	0	0,281	0,019	0	0	0,181	0,019	0	0	0	0,1	0	0
15	К.В.В.	0,19	0,21	0	0	0	0	0	0,01	0,29	0	0	0	0,111	0,089	0	0	0	0,028	0,072	0
16	Ч.В.В.	0,174	0,226	0	0	0	0	0	0	0,053	0,247	0	0,009	0,191	0	0	0	0	0,086	0,014	0
17	Ц.А.В.	0,174	0,226	0	0	0	0,018	0,282	0	0	0	0	0	0,042	0,158	0	0	0	0,02	0,081	0
18	Д.А.Н.	0,162	0,238	0	0	0	0	0,206	0,094	0	0	0	0,067	0,133	0	0	0	0,055	0,045	0	0
19	Б.В.И.	0,106	0,294	0	0	0	0	0	0	0,149	0,151	0	0	0,07	0,13	0	0	0	0,069	0,031	0
20	М.А.А.	0,088	0,312	0	0	0	0,002	0,298	0	0	0	0	0	0,171	0,029	0	0,012	0,088	0	0	0
21	Е.С.А.	0	0,386	0,014	0	0	0	0	0	0,186	0,114	0	0,092	0,108	0	0	0	0	0,089	0,011	0

Таблица 25 – Расчёт итоговой комплексной оценки технологии эксплуатации ТПС при приоритете критерия «продольная динамика»

№	Ф.И.О.	Класс	Пробег ·10 ⁴ , км	Интегральные оценки по каждому терму, $E_l^{(\Sigma)}$					Дефаззифицированные значения, $\sum_{l=1}^5 E_l^{(\Sigma)} \cdot g_l$					Штрафной балл, $\bar{E}_{st}$	Рейтинговый балл, E_{st}	Рейтинг списочного состава, R
				VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL			
1	Т.А.В.	2	6,1123	0,432	0,068	0,123	0,363	0,014	0	0,017	0,062	0,272	0,014	0,365	0,635	12
2	С.А.Ю.	1	6,4977	0,4	0,035	0,532	0,033	0	0	0,009	0,266	0,025	0	0,3	0,7	4
3	О.А.А.	1	4,2811	0,407	0,363	0,15	0,08	0	0	0,091	0,075	0,06	0	0,226	0,774	1
4	Б.А.В.	1	6,5646	0,444	0,056	0,178	0,322	0	0	0,014	0,089	0,242	0	0,345	0,655	9
5	М.Е.С.	2	5,2124	0,374	0,026	0,184	0,193	0,223	0	0,007	0,092	0,145	0,223	0,467	0,533	17
6	В.И.В.	2	4,8721	0,371	0,029	0,099	0,415	0,086	0	0,007	0,05	0,311	0,086	0,454	0,546	15
7	С.Ю.А.	1	6,1891	0,355	0,139	0,39	0,033	0,083	0	0,035	0,195	0,025	0,083	0,338	0,662	8
8	М.Р.В.	1	5,8035	0,354	0,082	0,485	0,079	0	0	0,021	0,243	0,059	0	0,323	0,677	6
9	Т.Д.И.	1	5,9458	0,342	0,2	0,319	0,139	0	0	0,05	0,16	0,104	0	0,314	0,686	5
10	М.А.А.	1	5,5574	0,326	0,074	0,086	0,498	0,016	0	0,019	0,043	0,374	0,016	0,452	0,548	14
11	Н.И.С.	1	5,944	0,317	0,143	0,342	0,198	0	0	0,036	0,171	0,149	0	0,356	0,644	10
12	Т.А.В.	1	4,8622	0,317	0,085	0,444	0,154	0	0	0,021	0,222	0,116	0	0,359	0,641	11
13	Г.А.Ю.	2	5,265	0,272	0,138	0,227	0,153	0,21	0	0,035	0,114	0,115	0,21	0,474	0,526	18
14	С.А.В.	1	5,9904	0,214	0,186	0,281	0,3	0,019	0	0,047	0,141	0,225	0,019	0,432	0,568	13
15	К.В.В.	1	4,845	0,19	0,21	0,149	0,451	0	0	0,053	0,075	0,338	0	0,466	0,534	16
16	Ч.В.В.	2	4,6261	0,174	0,235	0,277	0,067	0,247	0	0,059	0,139	0,05	0,247	0,495	0,505	20
17	Ц.А.В.	1	5,6089	0,192	0,508	0,062	0,239	0	0	0,127	0,031	0,179	0	0,337	0,663	7
18	Д.А.Н.	1	5,5834	0,162	0,566	0,272	0	0	0	0,142	0,136	0	0	0,278	0,722	2
19	Б.В.И.	1	5,4597	0,106	0,294	0,139	0,31	0,151	0	0,074	0,07	0,233	0,151	0,528	0,472	21
20	М.А.А.	1	4,926	0,102	0,698	0,171	0,029	0	0	0,175	0,086	0,022	0	0,283	0,717	3
21	Е.С.А.	1	6,2245	0	0,478	0,211	0,197	0,114	0	0,12	0,106	0,148	0,114	0,488	0,512	19

Для оценки комфортности перевозки пассажиров были проанализированы две поездки методом попарного сравнения. Первый рейс – от 31.08.2020 г., с назначением локомотивной бригады по методике и полным ручным управлением локомотивом, второй – от 23.07.2020 г. с назначением бригады в штатном порядке (нарядчиком, по графику), при этом управление осуществлялось в автоматическом режиме (автоведение). Для второй бригады уровень соблюдения технологии эксплуатации составил $E_{st} = 0,655$ (9-е место в рейтинге), при значениях $MD = 0,38$, $LW = 0,62$, что существенно ниже по сравнению с первой бригадой. Исходные данные для сравнения приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Исходная информация для оценки соблюдения технологии эксплуатации по критерию «продольная динамика»

№ п/п	Дата	Квалификация, стаж	Режим управления ТПС	Погодные условия (видимость, влажность, направление и скорость ветра, температура)
1	31.08.2020	1-й класс, 13 лет	Ручной	Ясно, 24 %, восточный 7 м/с, +19 ⁰ С
2	23.07.2020	1-й класс, 15 лет	Автоведение УСАВП	Ясно, 34 %, северный 2,8 м/с, +22 ⁰ С

Результаты испытаний представлены на рисунках 32, 33 и таблицах 27–29 с дифференцированием по амплитудам колебаний.

Необходимо сделать вывод, что обе поездки – как при ручном управлении машинистом, так и в режиме автоведения с использованием УСАВП, выполнены с соблюдением установленных требований по обеспечению комфортности перевозки пассажиров [171]. Однако при ведении поезда в режиме автоведения, без применения корректирующих ограничительных действий машиниста, было зафиксировано 5 колебаний экипажей в диапазоне $|0,7 - 1|$ м/с³. Это является риском нарушения комфорта пассажиров в случае превышения значения колебаний величиной 1 м/с³.

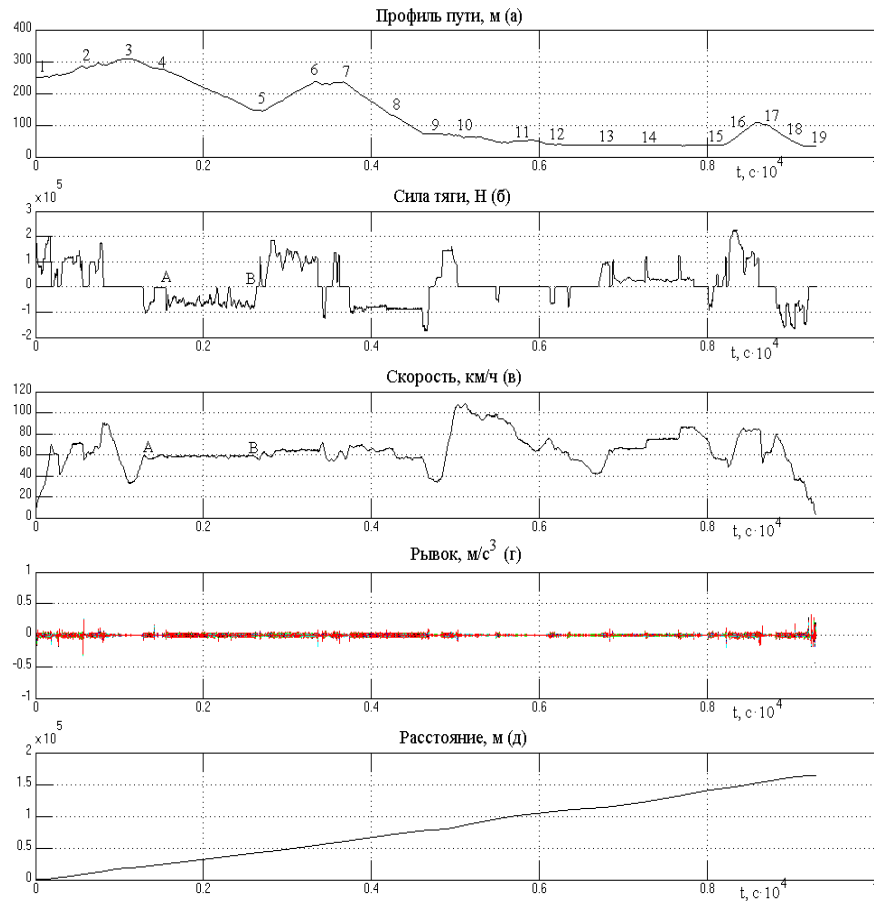


Рисунок 32 – Результаты поездки 31.08.2020 на участке
Лихая – Ростов-Главный с поездом № 36:
а – профиль пути; б – сила тяги; в – скорость; г – рывок;
д – пройденный путь

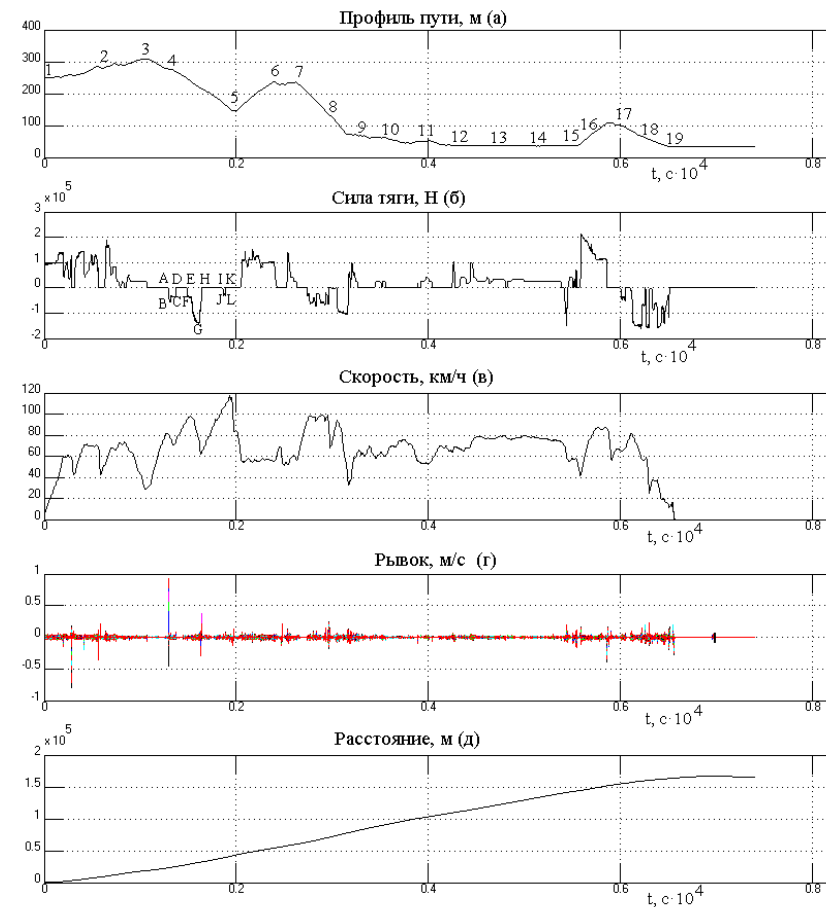


Рисунок 33 – Результаты поездки 23.07.2020 г. на участке
Лихая – Ростов-Главный с поездом № 36:
а – профиль пути; б – сила тяги; в – скорость; г – рывок;
д – пройденный путь

Таблица 27 – Продольно-динамические реакции в пассажирском поезде № 36 при проведении испытаний 31.08.2020

Подвижная единица	Частоты попадания локальных экстремумов функции рывка в заданные диапазоны					
	–1...–0,7	–0,7...–0,35	–0,35...0	0...0,35	0,35...0,7	0,7...1
Локомотив	0	1	$2,707 \cdot 10^4$	$2,764 \cdot 10^4$	0	0
1-й вагон	0	2	$2,693 \cdot 10^4$	$2,777 \cdot 10^4$	0	0
2-й вагон	0	2	$2,682 \cdot 10^4$	$2,788 \cdot 10^4$	0	0
3-й вагон	0	0	$2,691 \cdot 10^4$	$2,78 \cdot 10^4$	0	0
4-й вагон	0	0	$2,674 \cdot 10^4$	$2,797 \cdot 10^4$	0	0
5-й вагон	0	0	$2,68 \cdot 10^4$	$2,791 \cdot 10^4$	0	0
6-й вагон	0	0	$2,676 \cdot 10^4$	$2,795 \cdot 10^4$	1	0
7-й вагон	0	0	$2,662 \cdot 10^4$	$2,808 \cdot 10^4$	1	0
8-й вагон	0	0	$2,643 \cdot 10^4$	$2,828 \cdot 10^4$	0	0
9-й вагон	0	0	$2,653 \cdot 10^4$	$2,818 \cdot 10^4$	0	0
10-й вагон	0	0	$2,642 \cdot 10^4$	$2,829 \cdot 10^4$	0	0
11-й вагон	0	0	$2,642 \cdot 10^4$	$2,828 \cdot 10^4$	0	0
12-й вагон	0	0	$2,636 \cdot 10^4$	$2,834 \cdot 10^4$	0	0
13-й вагон	0	0	$2,637 \cdot 10^4$	$2,833 \cdot 10^4$	0	0
14-й вагон	0	0	$2,659 \cdot 10^4$	$2,812 \cdot 10^4$	0	0
15-й вагон	0	0	$2,653 \cdot 10^4$	$2,817 \cdot 10^4$	0	0
Итого	0	5	$4,263 \cdot 10^5$	$4,49 \cdot 10^5$	2	0

Таблица 28 – Продольно-динамические реакции в пассажирском поезде № 36 при проведении испытаний 23.07.2020

Подвижная единица	Частоты попадания локальных экстремумов функции рывка в заданные диапазоны					
	–1...–0,7	–0,7...–0,35	–0,35...0	0...0,35	0,35...0,7	0,7...1
Локомотив	2	3	$2,047 \cdot 10^4$	$2,025 \cdot 10^4$	0	0
1-й вагон	0	4	$2,039 \cdot 10^4$	$2,033 \cdot 10^4$	0	1
2-й вагон	0	1	$2,035 \cdot 10^4$	$2,038 \cdot 10^4$	0	0
3-й вагон	0	0	$2,039 \cdot 10^4$	$2,034 \cdot 10^4$	0	0
4-й вагон	0	0	$2,03 \cdot 10^4$	$2,043 \cdot 10^4$	0	0
5-й вагон	0	0	$2,041 \cdot 10^4$	$2,032 \cdot 10^4$	0	0
6-й вагон	0	0	$2,036 \cdot 10^4$	$2,036 \cdot 10^4$	2	0
7-й вагон	0	0	$2,042 \cdot 10^4$	$2,031 \cdot 10^4$	0	0
8-й вагон	0	0	$2,03 \cdot 10^4$	$2,042 \cdot 10^4$	1	0
9-й вагон	0	0	$2,036 \cdot 10^4$	$2,037 \cdot 10^4$	0	0
10-й вагон	0	0	$2,029 \cdot 10^4$	$2,044 \cdot 10^4$	0	0
11-й вагон	0	0	$2,031 \cdot 10^4$	$2,042 \cdot 10^4$	0	1
12-й вагон	0	0	$2,031 \cdot 10^4$	$2,042 \cdot 10^4$	0	0
13-й вагон	0	0	$2,026 \cdot 10^4$	$2,046 \cdot 10^4$	0	1
14-й вагон	0	0	$2,019 \cdot 10^4$	$2,054 \cdot 10^4$	0	0
15-й вагон	0	0	$2,029 \cdot 10^4$	$2,044 \cdot 10^4$	1	0
Итого	2	8	$3,254 \cdot 10^5$	$3,262 \cdot 10^5$	4	3

Анализ показал, что наибольшие колебания возникают в переходных режимах, связанных с изменением тяги и торможения. Жалобы пассажиров, зафиксированные региональными дирекциями тяги, а также обратная связь, полученная автором после выполненных им поездок, подтверждают: в 90 % случаев дискомфорт возникает на участках пути со знакопеременным продольным профилем, где длина уклонов и подъёмов меньше длины поезда.

Проанализируем взаимосвязь моделей ведения поезда и возникающих при этом продольно-динамических реакций на перегоне Зверёво – Сулин (участки № 4–5, см. рисунки 32, 33) протяжённостью 19 км. Профиль пути относится к III типу и является затяжным монотонным спуском с несколькими площадками протяжённостью по 800 метров [199]. Аналогичную структуру имеют перегоны Горная – Шахтная (№ 7–8), Шахтная – Каменоломни (№ 8–9), Ростов-Товарный – Зоологический сад (№ 17–18). Знакопеременные сочетания элементов профиля пути на этих участках вызывают значительные критические продольно-динамические реакции в поезде. Для их минимизации необходимо регулировать силы тяги и рекуперативного торможения в момент сжатия и растяжения поезда, в этом заключается эффективность модели ведения поезда и/или квалификация локомотивной бригады при реализации соответствующей модели.

При реализации первой модели ведения поезда – в ручном режиме (см. рисунок 33, б) машинист использует рекуперативное торможение с током на якоре 300–500 А (участок А–В), что позволяет поддерживать среднюю скорость 60 км/ч для следования по расписанию (участок А–В, см. рисунок 33, в), преодолеть временное ограничение скорости 70 км/ч без изменения режимов работы локомотива, исключив переходные процессы, нарушающие плавность хода. При проследовании мест со знакопеременными значениями профиля пути машинист корректирует тормозные усилия, предотвращая снижение МСУД токов на ТЭД до нулевых значений и исключает возникновение динамических ударов и дискомфорта пассажиров и локомотивной бригады.

При реализации второй модели ведения поезда – в режиме автоведения, УСАВП отработывает алгоритм следования на выбеге до максимальной скорости

80 км/ч установленной для 2-го главного пути станции Звереве, далее включает рекуперацию (участок А–В, см. рисунок 33 б) в месте перелома профиля пути, допуская рывок значением $0,96 \text{ м/с}^3$. После проследования станции система автоведения аналогично переходит в режим выбега с последующим достижением максимально разрешенной скорости 100 км/ч (участок D–E) и снова отрабатывается алгоритм рекуперативного торможения (участок E–F). При этом с целью выполнения требований временного ограничения скорости 70 км/ч увеличивает тормозную силу с токами на ТЭД до 580А, применяет ступень торможения ЭПТ величиной $0,7 \text{ кгс/см}^2$ и производит одновременный отпуск тормозов и отключение рекуперации. Такое сочетание режимов работы ТПС приводит к набеганию вагонов на локомотив и ряду инцидентов, связанных с нарушением плавности хода (участок G–H). Стоит отметить, что такая модель ведения поезда циклически повторяется несколько раз на заданном перегоне и аналогичных по своей структуре участках железнодорожного пути. Следование с максимально допустимой скоростью в режиме выбега приводит к нарушению графика движения и прибытию поезда на станцию Сулин ранее расписания на 8 минут, что в условиях высокой плотности движения и лимитированной пропускной способности несёт риски необоснованных торможений и неграфиковых остановок.

При реализации первой модели ведения поезда (в ручном режиме) максимальные значения динамического удара не превышают значения $0,39 \text{ м/с}^3$, в то время как вторая модель (в автоматическом режиме) вызывает колебания до $0,96 \text{ м/с}^3$ и дискомфорт пассажиров. Кроме того, вторая модель ведения поезда ещё и более энергозатратная по причине меньшего удельного использования режима рекуперации (20,2 % против 33,55 % при ручном управлении в первом варианте).

В квазиустановившихся режимах значения колебаний при ручном управлении и автоведении практически одинаковы. Как пример, на участке Новочеркасск – Александровка – Кизитеринка (№ 13–15, см. рисунки 32, 33) продольный профиль пути является практически ровным, без значительных

подъёмов и спусков. Значения колебаний экипажей подвижного состава не превышают $0,21 \text{ м/с}^3$ во всех режимах управления.

Анализ всех 78 поездок с пассажирскими поездами № 36 на участке Лихая – Ростов-Главный в период проведения испытаний позволил сделать вывод, что наилучший результат по исключению высокоамплитудных колебаний, которые несут риски дискомфорта пассажиров, достигнут в ручном режиме (таблица 29). Превышение значений колебаний в комбинированной модели управления обусловлено тем, что машинист имеет высокую материальную мотивацию за экономию энергоресурсов и стремится бескомпромиссно использовать режим рекуперации в ущерб плавности хода, допуская большое количество переходных режимов.

Таблица 29 – Средние значения попаданий локальных экстремумов функции рывка в заданные диапазоны по результатам испытаний

№	Режим управления локомотивом	Частоты попадания локальных экстремумов функции рывка в заданные диапазоны					
		$-1 \dots -0,7$	$-0,7 \dots -0,35$	$-0,35 \dots 0$	$0 \dots 0,35$	$0,35 \dots 0,7$	$0,7 \dots 1$
1	Ручной	0	27,333	$3,65 \cdot 10^5$	$3,79 \cdot 10^5$	19,333	0
2	УСАВП	2	53,333	$3,48 \cdot 10^5$	$3,55 \cdot 10^5$	37,333	3
3	Комбинированный (ручной и УСАВП)	7,667	43	$3,46 \cdot 10^5$	$3,62 \cdot 10^5$	17,667	6

4.3 Анализ экспериментальных исследований соблюдения технологии эксплуатации при приоритетном критерии «энергоэффективность»

Для повышения энергоэффективности эксплуатации локомотивов необходимо осуществлять рациональный выбор локомотивной бригады для конкретного рейса с учётом категории поезда. Основным критерием при этом выступает квалификация машиниста в части энергооптимального ведения поезда, позволяющего снизить расход энергетических ресурсов на тягу. При этом неукоснительное соблюдение требований безопасности движения, надёжности

функционирования ТПС и действующей технологии его эксплуатации остаётся обязательным условием.

Аналогично задаче оптимального назначения локомотивной бригады по критерию минимизации продольно-динамических реакций, был проведён сравнительный анализ двух моделей ведения поезда, реализованных машинистами с различными уровнями квалификации. В первом случае бригада под управлением Б.А.В. была выбрана с использованием разработанной методики, а управление локомотивом осуществлялось в ручном режиме. Её рейтинг составил $E_{st} = 0,765$ (1-е место), что соответствует высокому уровню профессионализма: $VH = 0,06$ и $HG = 0,94$. Во втором случае машинист был назначен на рейс произвольно, без применения методики, с последующим ведением поезда в режиме автоведения. Рейтинговая оценка данной локомотивной бригады составляет $E_{st} = 0,569$ (16-е место в рейтинге), при значениях параметров $MD = 0,724$, $LW = 0,276$ (таблицы 30–32).

Результаты проведённых испытаний приведены на рисунках 34–40 и в таблицах 33–34, с разделением данных по потреблению и рекуперации электроэнергии на отдельных перегонах. Схемы участков железной дороги соответствуют изображениям на рисунках 32, 33. Анализ энергозатрат на тягу поезда по двум сценариям показал, что в первом варианте, при ручном управлении, машинист обеспечил более высокую энергоэффективность движения на 15-и из 18-и перегонах маршрута.

На перегоне Лихая – Замчалово увеличение потребления ТЭР было обусловлено нерасчётливым (нерациональным) торможением при проверке пневматических тормозов [190]. При ступени торможения $0,6 \text{ кгс/см}^2$ снижение скорости составило $16,5 \text{ км/ч}$ (с 60 км/ч до $43,5 \text{ км/ч}$), при нормативе 10 км/ч , что привело к значительной потере кинетической энергии поезда.

Таблица 30 – Значения термов лингвистических переменных с учётом весов Фишберна

№	Т. №	Безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС $C^{(1)} = 0,4$					Продольная динамика $C^{(2)} = 0,1$					Точность хода по расписанию $C^{(3)} = 0,2$					Энергоэффективность $C^{(4)} = 0,3$				
		VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL
1	Т.А.В.	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0,095	0,005	0	0	0,123	0,077	0	0,096	0,204	0	0	0
2	С.А.Ю.	0,4	0	0	0	0	0	0	0,096	0,004	0	0	0,035	0,165	0	0	0	0	0,239	0,061	0
3	О.А.А.	0,4	0	0	0	0	0,002	0,098	0	0	0	0	0	0,12	0,08	0	0	0,21	0,09	0	0
4	Б.А.В.	0,4	0	0	0	0	0	0	0,023	0,077	0	0	0	0,108	0,092	0	0,133	0,167	0	0	0
5	М.Е.С.	0,374	0,026	0	0	0	0	0	0	0,026	0,074	0	0	0,108	0,092	0	0	0	0,228	0,072	0
6	В.И.В.	0,371	0,029	0	0	0	0	0	0	0,071	0,029	0	0	0,038	0,162	0	0	0	0,184	0,116	0
7	С.Ю.А.	0,355	0,045	0	0	0	0	0,031	0,069	0	0	0	0	0,184	0,016	0	0	0	0	0,052	0,248
8	М.Р.В.	0,354	0,046	0	0	0	0	0	0,089	0,011	0	0	0,036	0,164	0	0	0	0	0,165	0,135	0
9	Т.Д.И.	0,342	0,058	0	0	0	0	0	0,054	0,046	0	0	0,116	0,084	0	0	0	0,079	0,221	0	0
10	М.А.А.	0,326	0,074	0	0	0	0	0	0,004	0,096	0	0	0	0,074	0,126	0	0	0	0	0,252	0,048
11	Н.И.С.	0,317	0,083	0	0	0	0	0,005	0,095	0	0	0	0	0,002	0,198	0	0	0,138	0,162	0	0
12	Т.А.В.	0,317	0,083	0	0	0	0	0	0,09	0,01	0	0	0	0,077	0,123	0	0	0,006	0,294	0	0
13	Г.А.Ю.	0,272	0,128	0	0	0	0	0	0	0,03	0,07	0	0,01	0,19	0	0	0	0	0,112	0,188	0
14	С.А.В.	0,214	0,186	0	0	0	0	0	0	0,094	0,006	0	0	0,181	0,019	0	0	0,001	0,299	0	0
15	К.В.В.	0,19	0,21	0	0	0	0	0	0,003	0,097	0	0	0	0,111	0,089	0	0	0	0,083	0,217	0
16	Ч.В.В.	0,174	0,226	0	0	0	0	0	0	0,018	0,082	0	0,009	0,191	0	0	0	0	0,258	0,042	0
17	Ц.А.В.	0,174	0,226	0	0	0	0,006	0,094	0	0	0	0	0	0,042	0,158	0	0	0	0,059	0,242	0
18	Д.А.Н.	0,162	0,238	0	0	0	0	0,069	0,031	0	0	0	0,067	0,133	0	0	0	0,166	0,134	0	0
19	Б.В.И.	0,106	0,294	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0	0	0,07	0,13	0	0	0	0,208	0,092	0
20	М.А.А.	0,088	0,312	0	0	0	0,001	0,099	0	0	0	0	0	0,171	0,029	0	0,036	0,264	0	0	0
21	Е.С.А.	0	0,386	0,014	0	0	0	0	0	0,062	0,038	0	0,092	0,108	0	0	0	0	0,266	0,034	0

Таблица 31 – Расчёт итоговой комплексной оценки технологии эксплуатации ТПС при приоритете критерия «энергоэффективность»

№	Т. №	Класс	Пробег ·10 ⁴ , км	Интегральные оценки по каждому терму $E_l^{(\Sigma)}$					Дефазифицированные значения $\sum_{l=1}^5 E_l^{(\Sigma)} \cdot g_l$					Штрафной балл $\bar{E}_{st}$	Рейтинговый балл E_{st}	Рейтинг списочного состава R
				VH	HG	MD	LW	VL	VH	HG	MD	LW	VL			
1	Т.А.В.	2	6,1123	0,496	0,204	0,123	0,172	0,005	0	0,051	0,062	0,129	0,005	0,247	0,753	3
2	С.А.Ю.	1	6,4977	0,4	0,035	0,5	0,065	0	0	0,009	0,25	0,049	0	0,308	0,692	7
3	О.А.А.	1	4,2811	0,402	0,308	0,21	0,08	0	0	0,077	0,105	0,06	0	0,242	0,758	2
4	Б.А.В.	1	6,5646	0,533	0,167	0,131	0,169	0	0	0,042	0,066	0,127	0	0,235	0,765	1
5	М.Е.С.	2	5,2124	0,374	0,026	0,336	0,19	0,074	0	0,007	0,168	0,143	0,074	0,392	0,608	12
6	В.И.В.	2	4,8721	0,371	0,029	0,222	0,349	0,029	0	0,007	0,111	0,262	0,029	0,409	0,591	13
7	С.Ю.А.	1	6,1891	0,355	0,076	0,253	0,068	0,248	0	0,019	0,127	0,051	0,248	0,445	0,555	18
8	М.Р.В.	1	5,8035	0,354	0,082	0,418	0,146	0	0	0,021	0,209	0,11	0	0,34	0,66	9
9	Т.Д.И.	1	5,9458	0,342	0,253	0,359	0,046	0	0	0,063	0,18	0,035	0	0,278	0,722	5
10	М.А.А.	1	5,5574	0,326	0,074	0,078	0,474	0,048	0	0,019	0,039	0,356	0,048	0,462	0,538	20
11	Н.И.С.	1	5,944	0,317	0,226	0,259	0,198	0	0	0,057	0,13	0,149	0	0,336	0,664	8
12	Т.А.В.	1	4,8622	0,317	0,089	0,461	0,133	0	0	0,022	0,231	0,1	0	0,353	0,647	10
13	Г.А.Ю.	2	5,265	0,272	0,138	0,302	0,218	0,07	0	0,035	0,151	0,164	0,07	0,42	0,58	16
14	С.А.В.	1	5,9904	0,214	0,187	0,48	0,113	0,006	0	0,047	0,24	0,085	0,006	0,378	0,622	11
15	К.В.В.	1	4,845	0,19	0,21	0,197	0,403	0	0	0,053	0,099	0,302	0	0,454	0,546	19
16	Ч.В.В.	2	4,6261	0,174	0,235	0,449	0,06	0,082	0	0,059	0,225	0,045	0,082	0,411	0,589	14
17	Ц.А.В.	1	5,6089	0,18	0,32	0,101	0,4	0	0	0,08	0,051	0,3	0	0,431	0,569	17
18	Д.А.Н.	1	5,5834	0,162	0,54	0,298	0	0	0	0,135	0,149	0	0	0,284	0,716	6
19	Б.В.И.	1	5,4597	0,106	0,294	0,278	0,272	0,05	0	0,074	0,139	0,204	0,05	0,467	0,533	21
20	М.А.А.	1	4,926	0,125	0,675	0,171	0,029	0	0	0,169	0,086	0,022	0	0,277	0,723	4
21	Е.С.А.	1	6,2245	0	0,478	0,388	0,096	0,038	0	0,12	0,194	0,072	0,038	0,424	0,576	16

Таблица 32 – Исходные данные эксперимента с оценкой технологии эксплуатации при приоритетном критерии «энергоэффективность»

№	Дата	Квалификация, стаж	Режим управления ТПС	Погодные условия (видимость, влажность, направление и скорость ветра, температура)
1	30.08.2020	1-й класс, 15 лет	Ручной	Ясно, 60 %, северный 2,1 м/с, +18 °С
2	20.08.2020	1-й класс, 18 лет	Автоведение УСАВП	Ясно, 47 %, северо-восточный 2,8 м/с, +23 °С

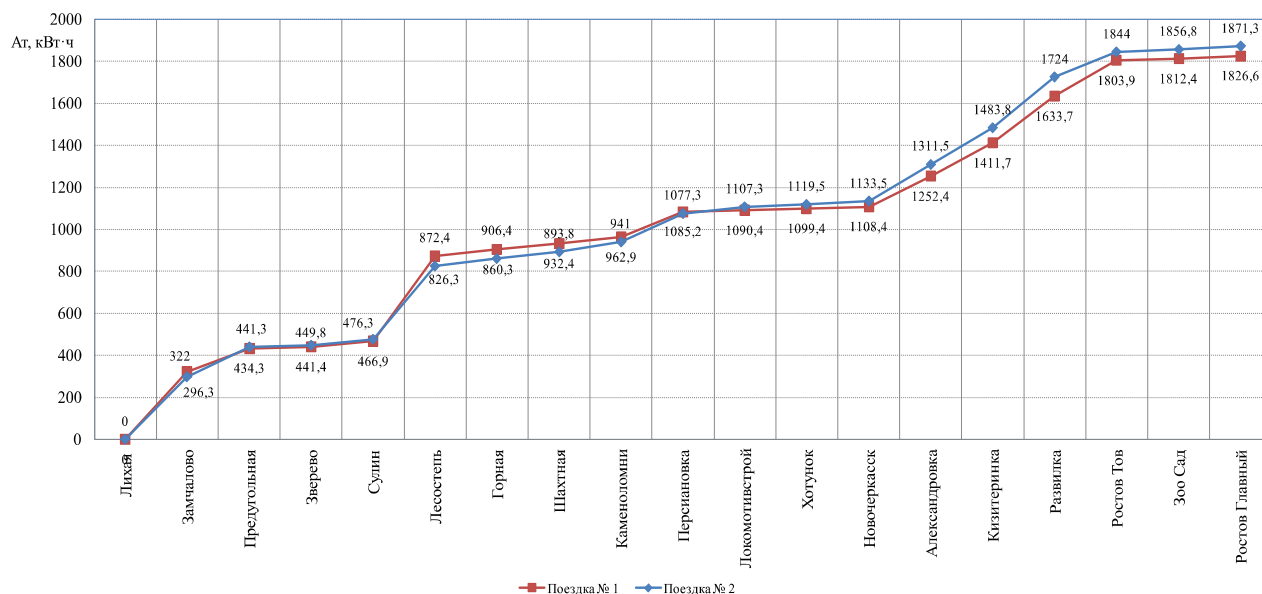


Рисунок 34 – Расход электроэнергии по счётчикам ЭПС

Аналогичная ситуация наблюдается при проверке ЭПТ: при давлении наполнения тормозного цилиндра $1,6 \text{ кгс/см}^2$, скорость была снижена с 70 км/ч до 53,5 км/ч (на 16,5 км/ч при нормативе 10 км/ч). В отличие от этого, второй машинист осуществлял торможения более точно, не допуская лишних потерь энергии на последующий разгон состава (рисунок 36).

Таблица 33 – Результаты эксперимента на участке Лихая – Ростов-Главный Северо-Кавказской железной дороги

№	Участок (перегон)	Расстояние, км	Абсолютные значения энергетических параметров						Удельные значения энергетических параметров					
			Расход ТЭР, А _т , кВт·ч		Рекуперация эл. энергии, А _р , кВт·ч		Расх. ТЭР – рекуп., ΔА _т = кВт·ч		Расход ТЭР, А [*] _т , кВт·ч/км		Рекуперация эл. энергии, А [*] _р , кВт·ч/км		Расх. ТЭР – рекуп., ΔА [*] _т , кВт·ч/км	
			№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1-2	11	322	296,3	0	0	322	296,3	29,273	26,936	0	0	29,273	26,936
2	2-3	7,8	112,3	145	0	0	112,3	145	14,397	18,59	0	0	14,397	18,59
3	3-4	5	7,1	8,5	16,3	0	-9,2	8,5	1,42	1,7	3,26	0	-1,84	1,7
4	4-5	19,2	25,5	26,5	169	78	-143,5	-51,5	1,328	1,38	8,802	4,062	-7,474	-2,682
5	5-6	13,1	405,5	350	0	0	405,5	350	30,954	26,718	0	0	30,954	26,718
6	6-7	3	34	34	3,5	0	30,5	34	11,333	11,333	1,167	0	10,167	11,333
7	7-8	13	26	33,5	137	86,5	-111	-53	2	2,577	10,538	6,654	-8,538	-4,077
8	8-9	7,2	30,5	47,2	137,7	135,8	-107,2	-88,6	4,236	6,556	19,125	18,861	-14,89	-12,31
9	9-10	17,6	122,3	136,3	0	0	122,3	136,3	6,949	7,744	0	0	6,949	7,744
10	10-11	5,1	5,2	30	0	0	5,2	30	1,02	5,882	0	0	1,02	5,882
11	11-12	5,3	9	12,2	0	0	9	12,2	1,698	2,302	0	0	1,698	2,302
12	12-13	5,3	9	14	6,8	0	2,2	14	1,698	2,642	1,283	0	0,415	2,642
13	13-14	13,4	144	178	0	0	144	178	10,746	13,284	0	0	10,746	13,284
14	14-15	17,3	159,3	172,3	29,2	0	130,1	172,3	9,208	9,96	1,688	0	7,52	9,96
15	15-16	5,3	222	240,2	0	0	222	240,2	41,887	45,321	0	0	41,887	45,321
16	16-17	5,6	170,2	120	0	0	170,2	120	30,393	21,429	0	0	30,393	21,429
17	17-18	5,29	8,5	12,8	59,5	47,7	-51	-34,9	1,607	2,42	11,248	9,017	-9,641	-6,597
18	18-19	4,51	14,2	14,5	54,5	46,3	-40,3	-31,8	3,149	3,215	12,084	10,266	-8,936	-7,051
19	Итого	164	1826,6	1871,3	613,5	394,3	1213,1	1477	11,138	11,41	3,741	2,404	7,397	9,006

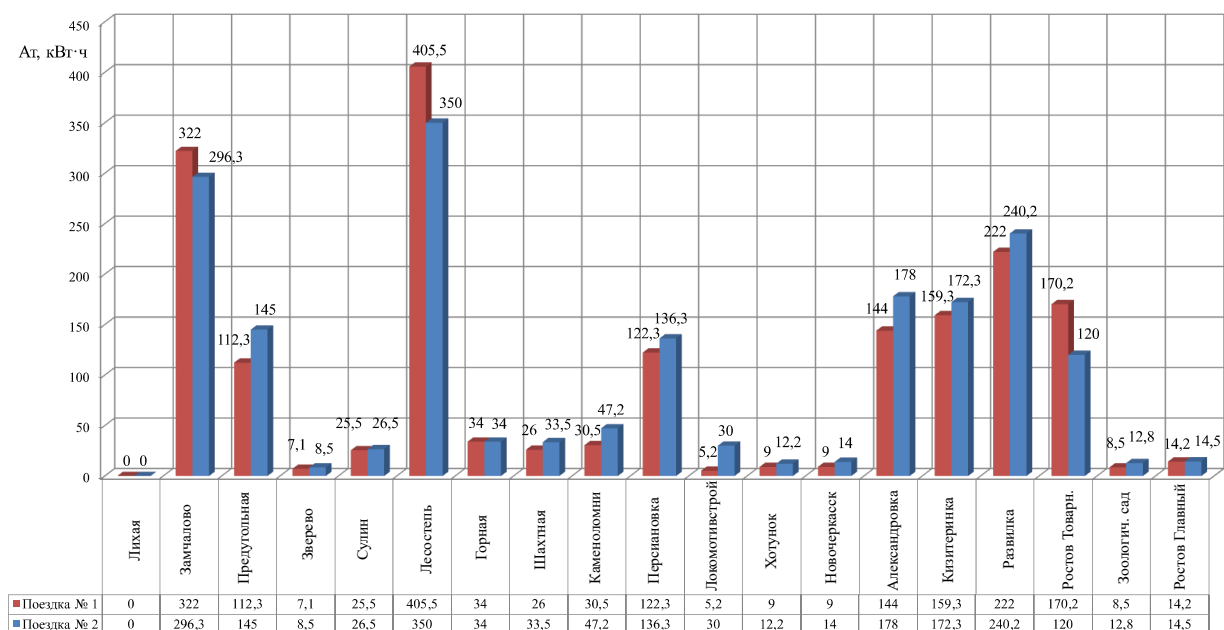


Рисунок 35 – Абсолютное значение потребления ТЭР на тягу по участкам

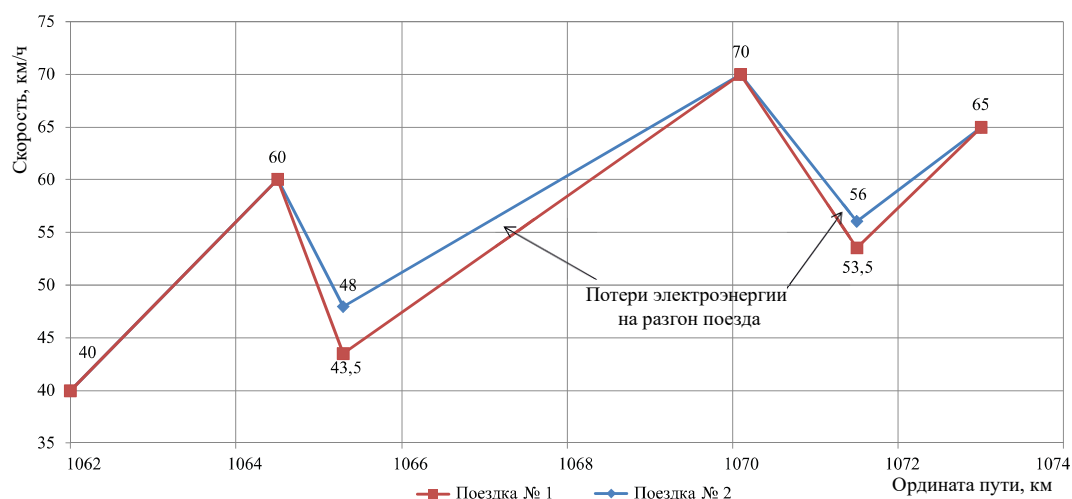


Рисунок 36 – Потери кинетической энергии, связанные с проверкой тормозов в пути следования.

На участке Зверев – Сулин, где путь проходит по непрерывному монотонному спуску, реализация второй модели ведения с использованием УСАВП включала 53,12 % движения на выбеге и 46,88 % в режиме рекуперативного торможения, при средней скорости 95 км/ч, вплоть до максимально допустимой по требованиям инфраструктуры. Однако такой способ не является оптимальным с точки зрения энергосбережения и приводит к

преждевременному прибытию на станцию Сулин с опережением запланированного графика на 8 минут. В отличие от этого, при ручном управлении (первая модель) машинист на участке Зверево – Сулин соблюдает нормативное время следования, достигая 94,12 % ведения в режиме рекуперации и лишь 5,88 % в режиме выбега. На участке Сулин – Лесостепь движение также осуществляется согласно графику, со средней скоростью 61,5 км/ч и током 408 А на якоре ТЭД. Таким образом, при ручном управлении поезд проследует данный перегон за 12 минут, тогда как в режиме УСАВП – за 20 минут, что существенно превышает графиковое значение и ведёт к неоправданной экономии электроэнергии на данном участке. При этом следует подчеркнуть, что подобная экономия, достигнутая за счёт нарушения расписания, во-первых, может повлечь за собой внеплановые торможения и остановки, а во-вторых, не компенсирует общий баланс потреблённой и возвращённой электроэнергии, который в ручном режиме оказался эффективнее.

На перегоне Развилка 1209 км – Ростов-Товарный, машинист в ручном режиме ведёт поезд более энергозатратно, из-за необходимости нагона одной минуты опоздания, по причине следования по удалению за грузовым поездом № 2688 по команде поездного диспетчера. Средняя скорость составляет 83,5 км/ч, средний ток якорей 533,6 А, время занятия перегона 5 минут. При следовании на УСАВП согласно расписанию скорость 67,08 км/ч, токи 456 А, время занятия перегона 6 минут.

Расход электроэнергии по счётчикам ЭПС на участке Лихая – Ростов-Главный в первом варианте составил 1826,6 кВт·ч, что ниже права расхода электроэнергии на 6,42 %, во втором варианте 1871,3 кВт·ч, также с экономией от норматива на 4,13 %. Таким образом, ручной режим оказался на 2,29 процентного пункта или 2,39 % экономичнее автоматизированного.

Анализ возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть показал, что при ручном управлении машинист обеспечивает более энергоэффективное ведение поезда на всех перегонах, где имеется возможность применения данного вида тормоза.

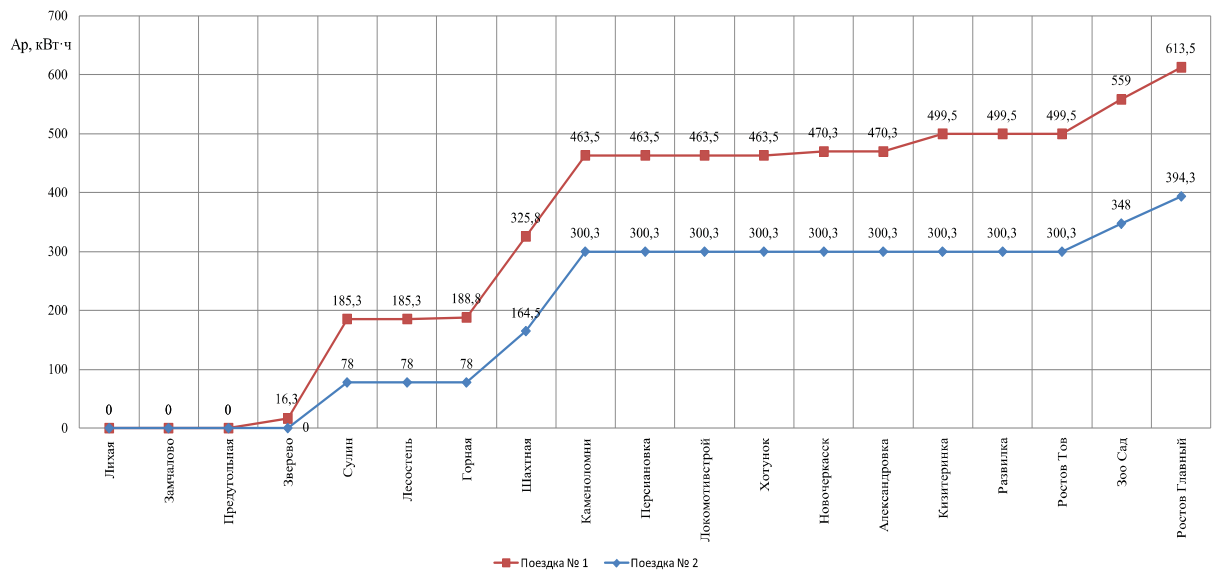


Рисунок 37 – Рекуперация электроэнергии по счётчикам ЭПС

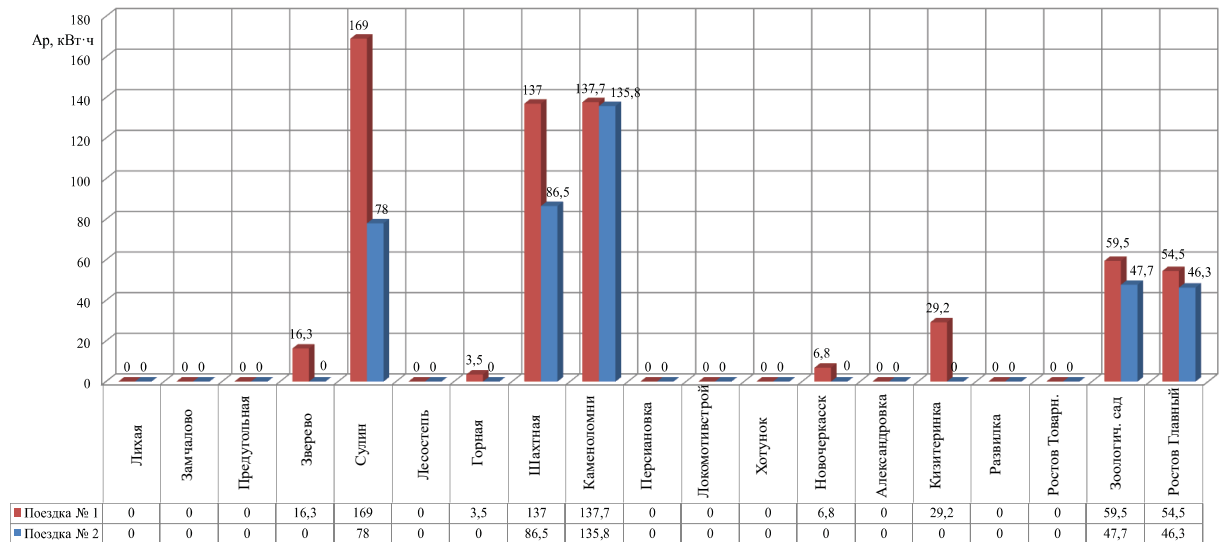


Рисунок 38 – Абсолютное значение возврата электроэнергии в контактную сеть по участкам

По суммарным показателям потребления и возврата электроэнергии (рисунки 39, 40) установлено, что модель ведения поезда, основанная на методике обоснованного назначения локомотивной бригады, на 17,87 % экономичнее по сравнению со случайным распределением локомотивных бригад и управлением в режиме УСАВП преимущественно за счёт увеличения доли рекуперации.

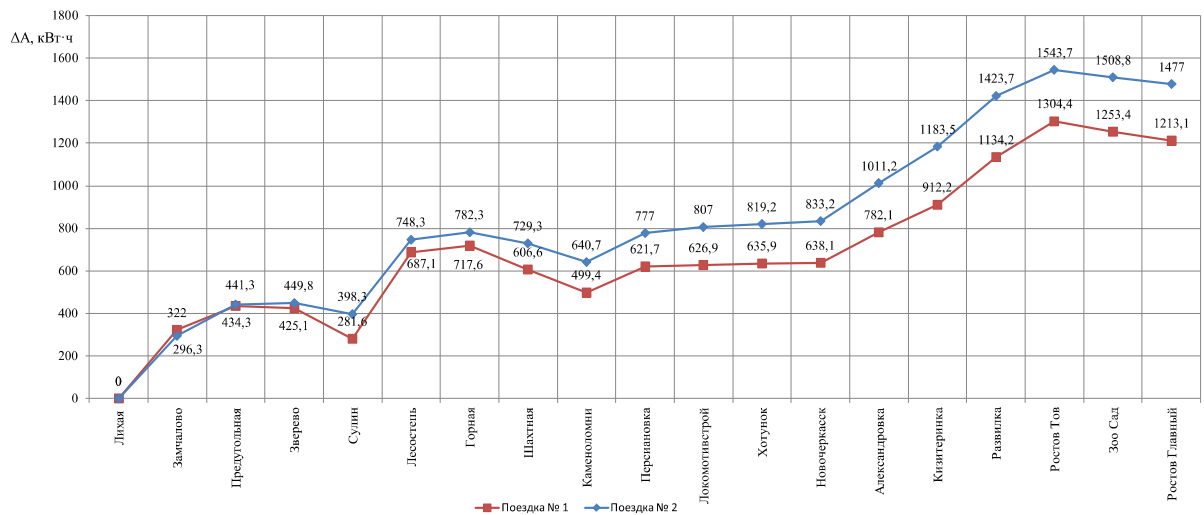


Рисунок 39 – Суммарное абсолютное потребление и возврат электроэнергии в контактную сеть по счётчикам ЭПС

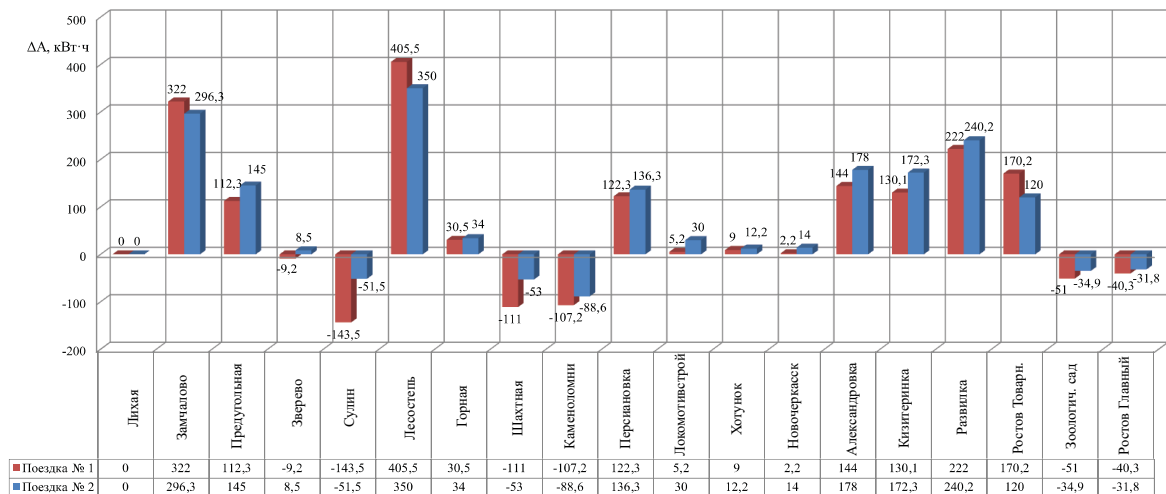


Рисунок 40 – Абсолютное потребление и возврат электроэнергии в контактную сеть по участкам

Практика контрольно-инструкторских поездок и анализ информации средств объективного контроля подтверждают: фактически применяются комбинированные модели, сочетающие ручное управление и автоведение. Посредством ввода временных корректирующих ограничений по скорости и току в систему УСАВП, машинист способен настроить автоматическое ведение по траектории, максимально приближённой к оптимальной с точки зрения энергосбережения, продольной динамики и использования рекуперативного

торможения. Такой подход обеспечивает плавное и энергоэффективное управление.

Анализ 78 поездок пассажирского поезда № 36 на участке Лихая – Ростов-Главный позволил сделать вывод, что в среднем 28 % времени локомотив управляется вручную, а 72 % – в автоматизированном режиме. При этом во всех поездках выявлен факт использования корректировки скорости в УСАВП в сторону снижения на лимитирующих спусках с учётом соблюдения расписания для увеличения показателя рекуперированной электроэнергии. Наиболее экономичным является ручной метод управления поездом машинистами с высоким уровнем квалификации (таблица 34).

Таблица 34 – Результаты испытаний по энергоэффективности на участке Лихая – Ростов-Главный с пассажирским поездом № 36

№	Режим управления ТПС	Расход ТЭР, A_t , кВт·ч	Рекуперация эл. энергии, A_p , кВт·ч	$\Delta A_n = A_t - A_p$, кВт·ч	Удельный расход ТЭР, A^* кВт·ч/км
1	Ручной	1875	645	1230	7,546
2	УСАВП	1936	477	1459	8,951
3	Комбинированный (ручной и УСАВП)	1879	546	1333	8,178

Такие модели могут быть адаптированы в качестве управляющих алгоритмов для многорежимных транспортных средств, интегрируемых в системы автоведения, обеспечивая баланс между безопасностью, энергоэффективностью и продольной динамикой [200–204].

4.4 Совершенствование системы технического нормирования потребления и возврата энергоресурсов на тягу поездов

Как отмечалось в первой главе, одной из ключевых проблем в техническом нормировании расхода и возврата энергоресурсов на тягу поездов и маневровую работу является использование средних значений на основе данных маршрутов машинистов. Такой подход не позволяет объективно оценить существующие

резервы энергосбережения, что приводит к завышенному объёму предоставления ТЭР и росту эксплуатационных затрат.

С целью выявления отклонений фактического потребления электроэнергии от установленных нормативов был проведён анализ 3607 поездок машинистов грузового и пассажирского движения, выполненных в августе 2023 года. При этом соблюдалось условие отсутствия преимуществ одного выборочного наблюдения перед другими: все наблюдения полностью равноправны и равновозможны [205]. На рисунке 41 приведена диаграмма рассеивания, показывающая отклонение фактического потребления ТЭР от плановых значений, рассчитанных ЦОММ. Нулевая линия по оси ординат является установленным нормативным значением потребления энергоресурсов. Отклонения в отрицательную сторону показывают перерасход, а в положительную – экономию ТЭР. Интервальный вариационный ряд представлен в таблице 35.

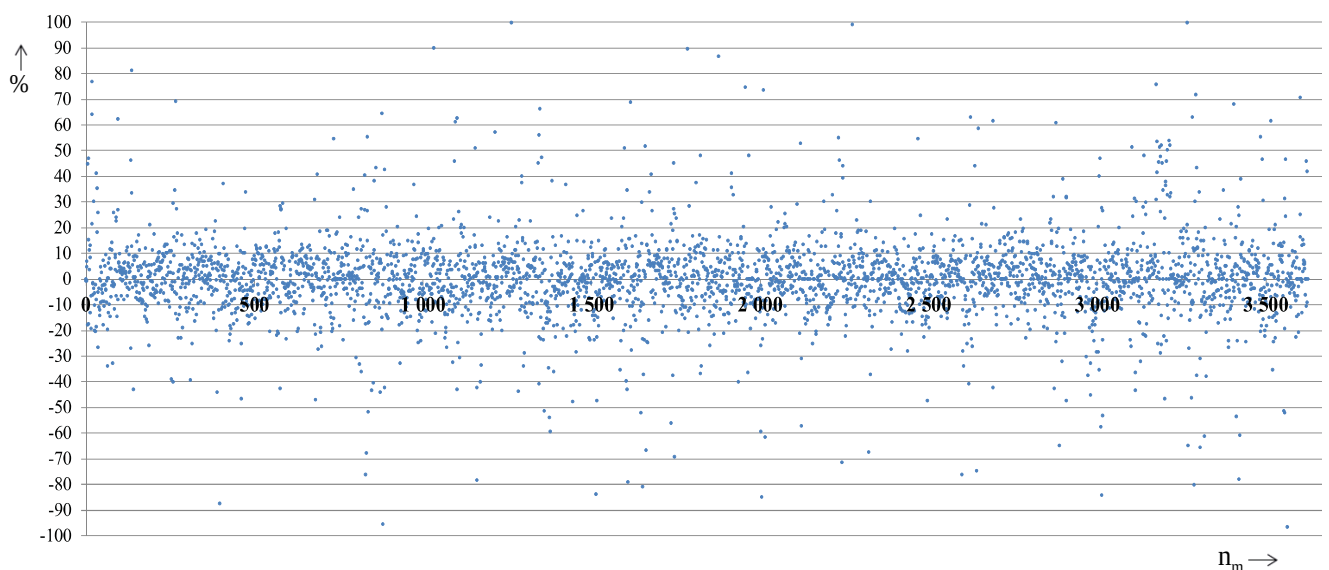


Рисунок 41 – Диаграмма рассеивания, характеризующая отклонение фактического потребления электроэнергии от планового значения

Проведённый анализ показал, что значительные отклонения, превышающие 20 % от нормы, связаны с особенностью системы учёта ТЭР и обусловлены, в частности, включением информации из маршрутов машиниста, оформленных для следования по неполному участку (введённому в ЦОММ), эксплуатацией локомотивов с неисправными приборами учёта потребления ТЭР и др.

Таблица 35 – Интервальный вариационный ряд, описывающий отклонения потребления энергоресурсов от нормы на тягу поездов

№	Граница интервалов x , %	Середина интервала x_m , %	Абсолютная частота n_m	Относительная частота ω_m	Относительная накопленная частота $\sum_m \omega_m$
1	$-100 \leq x < -95$	-97,5	2	0,0006	0,0006
2	$-95 \leq x < -90$	-92,5	0	0	0,0006
3	$-90 \leq x < -85$	-87,5	2	0,0006	0,0012
4	$-85 \leq x < -80$	-82,5	4	0,0011	0,0023
5	$-80 \leq x < -75$	-77,5	5	0,0014	0,0037
6	$-75 \leq x < -70$	-72,5	2	0,0006	0,0043
7	$-70 \leq x < -65$	-67,5	5	0,0014	0,0057
8	$-65 \leq x < -60$	-62,5	5	0,0014	0,0071
9	$-60 \leq x < -55$	-57,5	5	0,0014	0,0085
10	$-55 \leq x < -50$	-52,5	8	0,0022	0,0107
11	$-50 \leq x < -45$	-47,5	9	0,0025	0,0132
12	$-45 \leq x < -40$	-42,5	19	0,0053	0,0185
13	$-40 \leq x < -35$	-37,5	17	0,0047	0,0232
14	$-35 \leq x < -30$	-32,5	18	0,005	0,0282
15	$-30 \leq x < -25$	-27,5	27	0,0075	0,0357
16	$-25 \leq x < -20$	-22,5	77	0,0213	0,057
17	$-20 \leq x < -15$	-17,5	124	0,0344	0,0914
18	$-15 \leq x < -10$	-12,5	253	0,0701	0,1615
19	$-10 \leq x < -5$	-7,5	461	0,1278	0,2893
20	$-5 \leq x < 0$	-2,5	657	0,1821	0,4714
21	$0 \leq x < 5$	2,5	780	0,2162	0,6876
22	$5 \leq x < 10$	7,5	560	0,1553	0,8429
23	$10 \leq x < 15$	12,5	263	0,0729	0,9158
24	$15 \leq x < 20$	17,5	103	0,0286	0,9444
25	$20 \leq x < 25$	22,5	47	0,013	0,9574
26	$25 \leq x < 30$	27,5	34	0,0094	0,9668
27	$30 \leq x < 35$	32,5	27	0,0075	0,9743
28	$35 \leq x < 40$	37,5	15	0,0042	0,9785
29	$40 \leq x < 45$	42,5	15	0,0042	0,9827
30	$45 \leq x < 50$	47,5	17	0,0047	0,9874
31	$50 \leq x < 55$	52,5	14	0,0039	0,9913
32	$55 \leq x < 60$	57,5	5	0,0014	0,9927
33	$60 \leq x < 65$	62,5	10	0,0028	0,9955
34	$65 \leq x < 70$	67,5	4	0,0011	0,9966
35	$70 \leq x < 75$	72,5	4	0,0011	0,9977
36	$75 \leq x < 80$	77,5	2	0,0006	0,9983
37	$80 \leq x < 85$	82,5	1	0,0003	0,9986
38	$85 \leq x < 90$	87,5	2	0,0006	0,9992
39	$90 \leq x < 95$	92,5	1	0,0003	0,9995
40	$95 \leq x < 100$	97,5	3	0,0008	1,0000
	$-100 \leq x < 100$		3607		

Для исключения этих отклонений предусмотрена корректировка информации с присвоением определённых кодов замечаний (№ 3, 6, 38). Например, в августе 2023 года в эксплуатационном локомотивном депо Лихая по коду № 3 («норму расхода ТЭР принять равной фактическому расходу») откорректировано 2,8 % электронных маршрутов машиниста (ЭММ), по коду № 38 («Снятие контроля максимальной разницы нормирования и фактического расхода ТЭР») – 16,4 %, по коду № 6 («Подтверждение фактического расхода ТЭР больше предельно допустимого») – 0 %. За весь 2023 год по всем десяти эксплуатационным локомотивным депо Северо-Кавказской дирекции тяги было обработано 639,422 тыс. маршрутов машиниста, из которых скорректировано по коду № 3 – 5,2 % (33,324 тыс.) и по коду № 38 – 23,92 % (149,111 тыс.). Приведённые отклонения и необходимость их корректировки существенно влияют на объективность установления норм потребления ТЭР. Дисперсия и среднеквадратичное отклонение показывают достаточно большой разброс от математического ожидания, как в сторону экономии, так и в сторону перерасхода ТЭР.

Результаты поездок машинистов с различными моделями ведения поезда и проведённые исследования показывают, что в зависимости от уровня квалификации машиниста величина удельного расхода ТЭР варьируется от –12 % до 12 %. Таким образом, путём определения наиболее энергоэффективных моделей ведения поезда необходимо оптимизировать расчётное значение норматива расхода энергоресурсов на тягу. Максимальные отклонения от математического ожидания (плановых значений ТЭР) необходимо нивелировать путём совершенствования системы учёта расхода ТЭР и введения пооперационного дифференцированного технического учёта по каждому перегону, на основе лучших моделей и результатов энергопотребления.

На рисунках 42, 43 представлены гистограмма и кумулята исследуемой выборки, дисперсия и среднеквадратичное отклонение составили 254,747 и 15,961 соответственно.

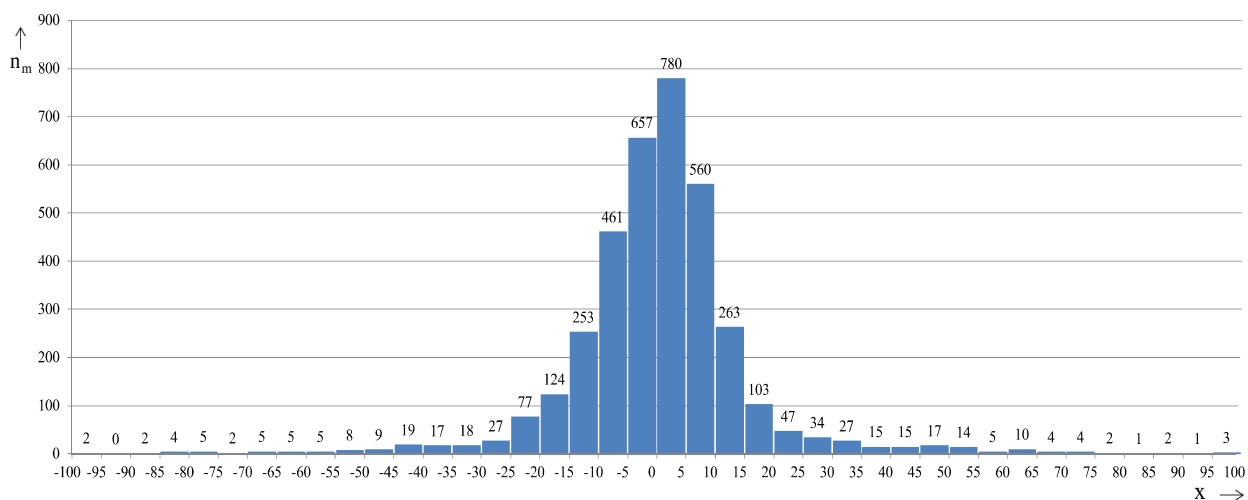


Рисунок 42 – Гистограмма частот отклонений фактического потребления электроэнергии от плановой нормы

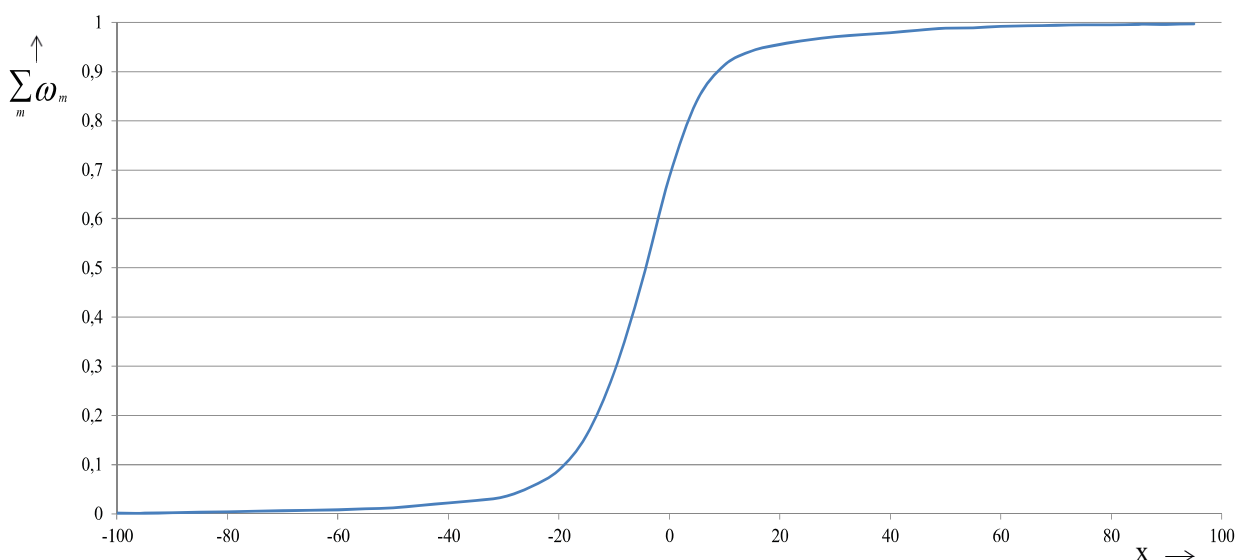


Рисунок 43 – Кумулята вариационного ряда отклонений фактического потребления электроэнергии от плановой нормы

Целью проведённого статистического анализа было установление характерных особенностей закона распределения отклонений фактического расхода энергии от нормативных значений, а также определение его числовых параметров. Это связано с тем, что среднее значение отклонения находится около нуля, однако его разброс при этом может достигать весьма больших значений. Как уже упоминалось ранее, согласно существующей методологии нормирования, пересмотр норм расхода ТЭР осуществляется при отклонении среднего значения от нормативного на 5 % и более. Однако такой подход не учитывает возможный

разброс значений и тот факт, что положительные и отрицательные отклонения (экономия и перерасход) могут взаимно нивелировать (компенсировать) друг друга, показывая в среднем минимальное отклонение от нормы. В результате может складываться иллюзия стабильного соблюдения нормы, несмотря на существование значительных колебаний, свидетельствующих либо о наличии значительных резервов экономии, либо о недостаточном уровне профессиональной подготовки отдельных локомотивных бригад. Это свидетельствует о необходимости корректировки нормативов для конкретных участков и проведения мероприятий по повышению квалификации локомотивных бригад. В этой связи в настоящей работе обоснована усовершенствованная методика нормирования, основанная на пооперационном дифференцированном расчёте норм. Её внедрение позволит не только снизить энергоёмкость перевозочного процесса за счёт актуализации норм потребления ТЭР с учётом выявленных резервов, но и оптимизировать модели ведения поезда путём совершенствования алгоритмов управления ТПС и повышения уровня подготовки машинистов.

Основная сложность использования данного подхода заключается в том, что некоторые поездки, включаемые в первичную выборку, связаны с нестандартными условиями эксплуатации, в частности с отработкой неполного поездоучастка, что вносит искажения в статистическую модель и затрудняет выявление резервов экономии. Это может приводить к искажению закона распределения, в частности формированию островершинной кривой распределения по сравнению с нормальной кривой, обладающей положительным эксцессом [205, 206]. Как известно, эксцесс характеризует частоту появления значений, которые удалены от среднего, то есть насколько много наблюдений находится в «хвостах» распределения [207, 208]. На рисунке 44 показана построенная ранее гистограмма отклонений расхода ТЭР от нормы. Очевидно, что закон распределения, характеризуемый гистограммой, обладает положительным эксцессом. Тогда предположим, что в «хвостах» присутствуют наблюдения, связанные с нестандартными условиями эксплуатации (в частности,

проезд неполного поездоучастка). Для их выявления далее будем использовать усечённые распределения [209, 210].

Как известно, усечённое нормальное распределение случайной величины формируется путём ограничения диапазона её возможных значений в рамках исходного нормального распределения. На рисунке 45 представлены основная гистограмма и три усечённых распределения, сформированные путём исключения из исходной выборки наблюдений с отклонениями от нормы, превышающими соответственно 50 %, 20 % и 10 % (гистограммы и соответствующие кривые Гаусса располагаются снизу вверх по мере сужения диапазонов усечения).

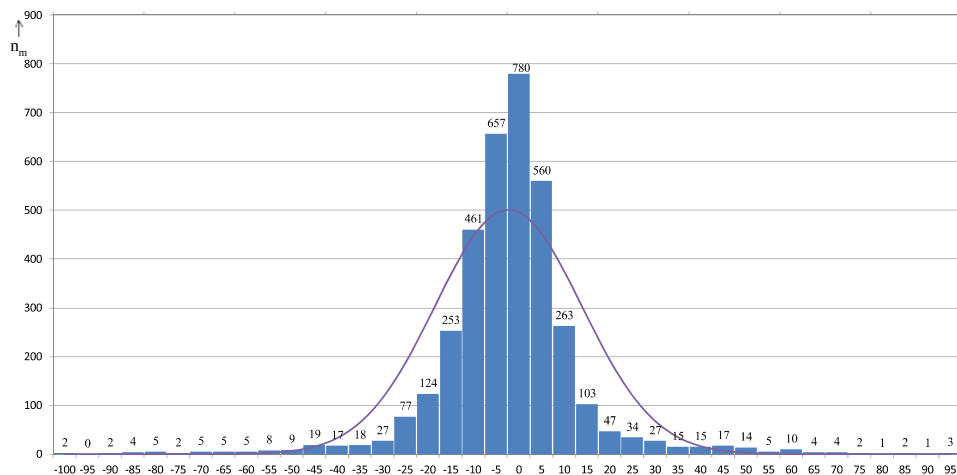


Рисунок 44 – Гистограмма и кривая нормального распределения

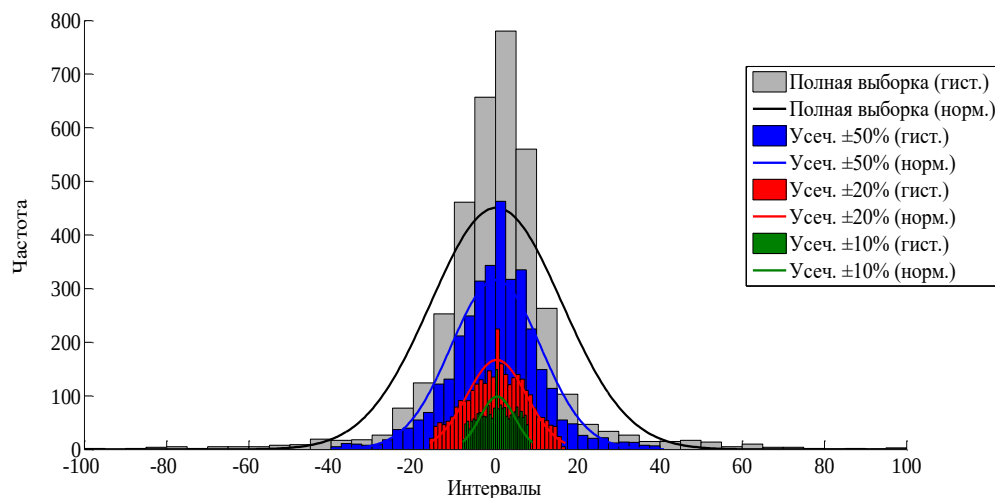


Рисунок 45 – Гистограммы и кривые Гаусса, моделирующие усечённые законы распределения

Анализ показывает, что при исключении значений с отклонением свыше 20 % наблюдается наилучшее соответствие распределения нормальному закону. Это свидетельствует о том, что в пределах данного диапазона отсутствует значимое влияние отдельных эксплуатационных факторов и данные могут считаться свободными от их влияния. Стоит отметить, что необходимость исключения значений с отклонениями более 20 % подтверждается не только статистическим методом, но и результатами анализа маршрутных листов. В результате может быть сделан вывод о том, что отклонения свыше 20 % обусловлены специфическими условиями эксплуатации (неполный поездоучасток, неисправные приборы учёта ТЭР и др.), а оставшиеся данные выборки достоверно характеризуют резервы экономии ТЭР.

Результаты практических поездок показали, что наибольшая экономия ТЭР была достигнута при реализации моделей ведения поезда, применяемых машинистами, обладающими высоким уровнем квалификации в области энергоэффективного управления. Уровень их квалификации был определён с использованием разработанной автором методики. Именно показатели потребления энергии и объёма её возврата в режиме рекуперации, полученные при реализации данных моделей, целесообразно использовать в качестве основы для установления технических норм в эксплуатационных локомотивных депо.

Полученные результаты исследований позволяют предложить пути улучшения существующей методики технического нормирования энергоресурсов с использованием информации современных бортовых средств регистрации параметров движения и работы ТПС. Внедрение объективного контроля на локомотивах позволяет осуществлять дифференцированное нормирование и установить техническую и пооперационную нормы потребления и возврата энергоресурсов для каждого перегона и станции с высокой степенью детализации и точности. Разработанная методика обеспечивает возможность расчёта плановых нормативных значений потребления и возврата энергоресурсов на базе энергооптимальных моделей управления ТПС, применяемых машинистами с высоким уровнем профессиональной подготовки. При этом учитываются все

требования безопасности движения, надёжности эксплуатации, соблюдения технологии и обеспечения плавности хода. На рисунке 46 представлен алгоритм формирования дифференцированных технических норм, где $J(i,k)$ – показатель приведенных энергетических затрат k -й поездки на i -м перегоне.

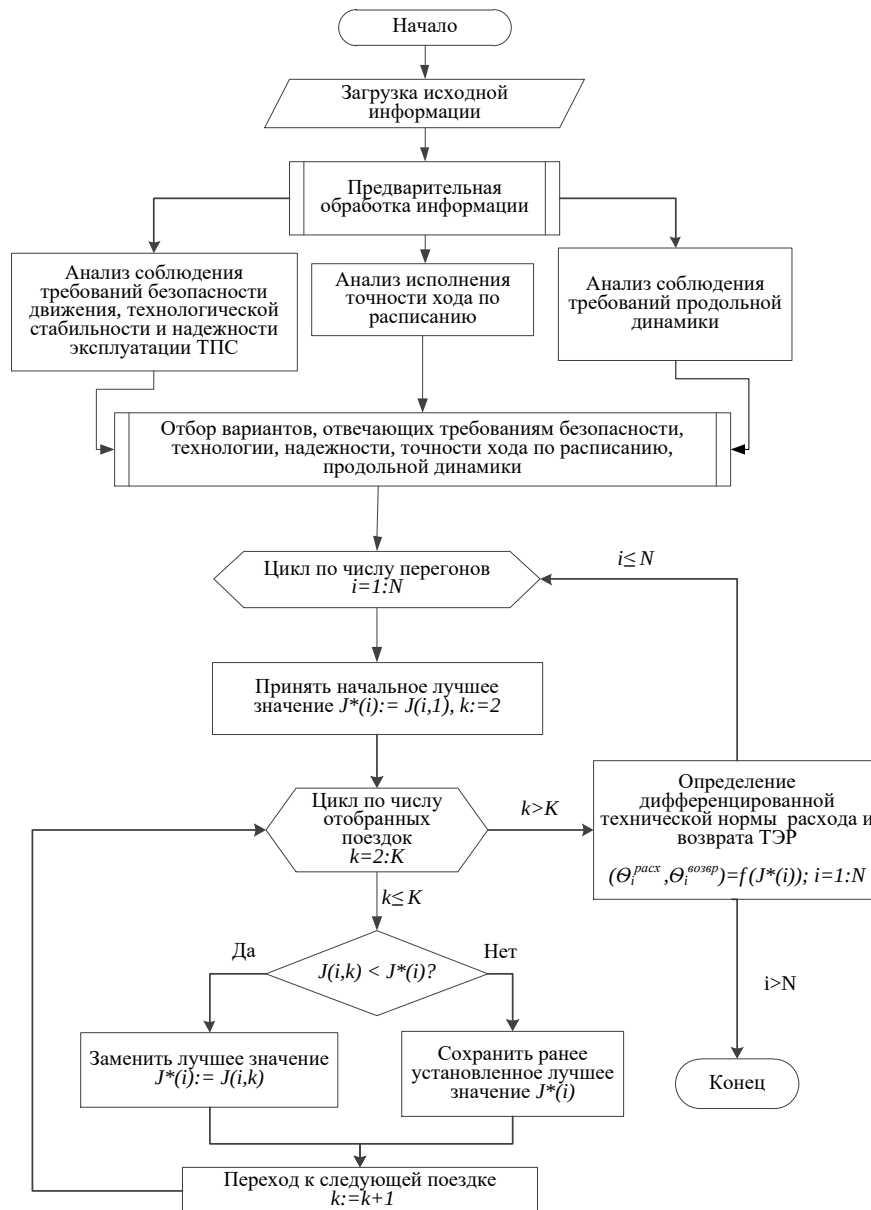


Рисунок 46 – Алгоритм формирования дифференцированных технических норм ТЭР

Представим описание рассматриваемого оптимального процесса движения поезда в виде рекуррентной формулы динамического программирования в дискретной форме:

$$S_{N-k}(y_{N-k}) = \min_{u_{N-k} \in Q(u)} \{F(y_{N-k}, u_{N-k}) + S_{N-k+1}[y_{N-k} + f(y_{N-k}, u_{N-k})]\}, \quad (62)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{N-1} F(y_k, u_k) + \varphi(y_N), \quad (63)$$

где N – общее число шагов;

k – текущий шаг;

y – вектор координат объекта;

u – управление;

S – состояние системы;

Q – функционал качества;

f – вектор-функция, описывающая динамику процесса.

Согласно принципу оптимальности, сформулированному Р. Беллманом, для широкого класса задач справедливо утверждение, что оптимальная стратегия управления не зависит от «предыстории системы», а определяется её состоянием в настоящий момент и целью управления. В данном контексте рассмотрим систему управления с обратной связью, в которой накопленный опыт локомотивных бригад используется для актуализации технических норм и повышения эффективности ведения поездов. При этом предполагается, что эффективность управления в общем случае зависит от установленных норм, поскольку именно они определяют для машинистов ориентиры в части допустимого уровня потребления или экономии энергии:

$$S_{N-k}(y_{N-k}) = \min_{\substack{u_{N-k} \in Q(u) \\ u = u(\Theta)}} \{F(y_{N-k}, u_{N-k}(\Theta)) + S_{N-k+1}[y_{N-k} + f(y_{N-k}, u_{N-k}(\Theta))]\}, \quad (64)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{N-1} F(y_k, u_k(\Theta)) + \varphi(y_N), \quad (65)$$

где Θ – установленные дифференцированные технические нормы.

На основе лучших по энергетическим показателям поездок были разработаны режимно-информационные карты, регламентирующие параметры ведения поездов с соблюдением требований безопасности, надёжности, технологии, точности хода по расписанию, продольной динамики (рисунок 47).

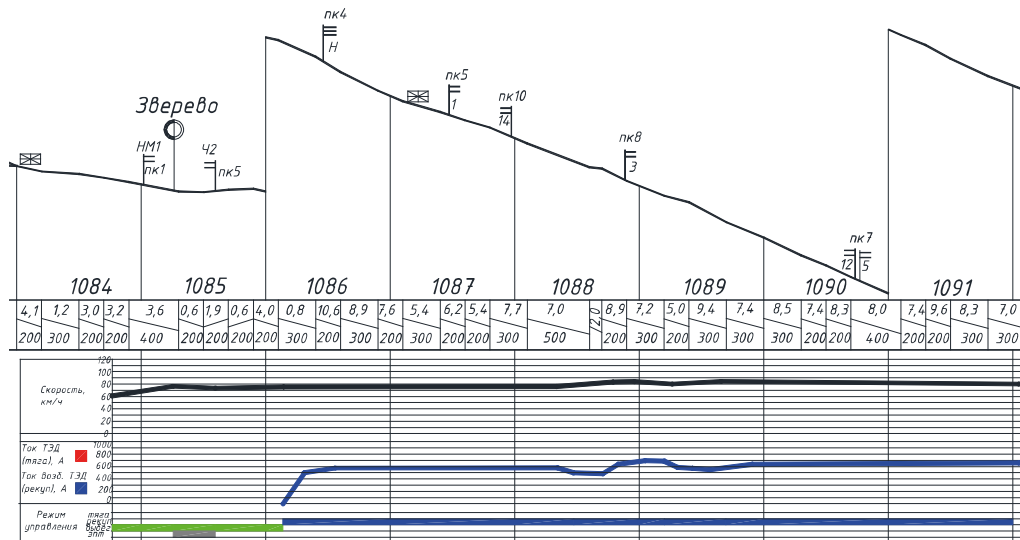


Рисунок 47 – Режимно-информационные карты для вождения поездов

Проведённые исследования и практические испытания, реализованные на базе эксплуатационного локомотивного депо Лихая, позволили уточнить нормативы расхода ТЭР на тягу пассажирских поездов, снизив их на 3,43 %, что свидетельствует о потенциале повышения энергоэффективности при использовании методики и адаптивного подхода к нормированию.

4.5 Совершенствование системы эксплуатации тягового подвижного состава за счёт интеграции методов оценки моделей ведения поезда в технологию технического обучения эффективным и безопасным приёмам вождения поездов

Важным результатом проведённых исследований стало обоснование возможности повышения эффективности системы эксплуатации ТПС путём интеграции в процесс технической учёбы и повышения квалификации

локомотивных бригад инструментов оценки соблюдения технологии эксплуатации на основе разработанной методики. На рисунке 48 представлен алгоритм интеграции методов оценки соблюдения технологии эксплуатации в систему технической подготовки локомотивных бригад. Данная модель была одобрена руководителями ОАО «РЖД» [211, 212] и успешно внедрена в эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги в рамках реализации проекта конкурса «Новое звено» [213].



Рисунок 48 – Алгоритм интеграции методов оценки моделей ведения поезда в технологию технического обучения

Входная информация о соблюдении технологии эксплуатации, полученная средствами объективного контроля и АСУ ЖТ, обрабатывается согласно алгоритму, изложенному в главе 2. На основании полученной интегральной оценки формируется реестр локомотивных бригад с дифференциацией по уровням профессиональной компетентности и выделением слабых («западающих») компетенций. Далее осуществляется группировка работников с аналогичными дефицитами в знаниях и навыках. Для каждой из таких групп разрабатываются персонализированные планы обучения, включающие программы технической учёбы, формы и средства контроля знаний. За группами закрепляются машинисты-инструкторы, обладающие необходимым уровнем квалификации, профессиональными и личностными компетенциями.

В частности, для работников, допустивших нарушения в области соблюдения требований безопасности движения и правил эксплуатации, а также связанные с отказами технических средств, разрабатывается специализированный план обучения. Он охватывает изучение устройства и принципов работы ТПС, порядок действий в аварийных и нестандартных ситуациях. Обучение проводит наиболее квалифицированный по данным вопросам машинист-инструктор. Основными формами подготовки определены теоретические и практические занятия, а также тренажёрная подготовка. Итоговая проверка знаний осуществляется в форме зачётов как на тренажёре, так и на реальном локомотиве.

Эффективность внедрения данной методики и её принятие работниками оценивались с использованием анонимного анкетирования, проведённого среди 200 локомотивных бригад, прошедших обучение по обновлённой технологии. Результаты опроса, представленные в таблице 36, свидетельствуют о высоком уровне одобрения предложенного подхода.

Проведённый анализ соблюдения технологии эксплуатации по критерию обеспечения безопасности движения в эксплуатационном локомотивном депо Лихая Северо-Кавказской дирекции тяги свидетельствует о положительном эффекте от реализованных мероприятий по совершенствованию системы.

Таблица 36 – Результаты анкетирования локомотивных бригад

№	Оцениваемый параметр	Результат
1	Удовлетворённость качеством проведения технических занятий	91,9 %
2	Одобрение закрепления машиниста-инструктора за определённой группой работников	95,59 %
3	Удовлетворённость компетентностью машиниста-инструктора	99,26 %
4	Мотивация (интерес) к посещению технических занятий	74,41 %
5	Средний итоговый балл оценки одобрения перехода на новую технологию (по десятибалльной шкале)	8,5

В отчётном периоде по сравнению с предыдущим годом отмечено двукратное снижение количества событий, обусловленных нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта по вине локомотивных бригад. Количество случаев задержек поездов на станциях посадки и высадки пассажиров сократилось на 5 %, а число системных ошибок в работе снизилось на 75 %. Кроме того, уровень технической подготовки локомотивных бригад, оцениваемый по результатам тестирования в автоматизированной системе оценки уровня знаний (АСПТ), увеличился на 6,38 %, а посещаемость занятий возросла на 3 %, что подтверждает рост вовлечённости локомотивных бригад и результативность внедрённого подхода.

Аналогично была модернизирована процедура подбора локомотивных бригад для прохождения курсов повышения квалификации. Приоритетность направления машинистов на обучение определяется на основе объективной оценки соблюдения технологии эксплуатации ТПС по критерию «Безопасность движения, технологическая стабильность и надёжность эксплуатации ТПС». В качестве основного показателя используется минимальное значение штрафного балла, что позволяет выделить работников с наивысшей степенью соответствия установленным требованиям. Данная методика, реализованная в депо, продемонстрировала явные преимущества по сравнению с ранее применявшимся подходом, основанным преимущественно на стаже работы в должности и субъективных оценках командно-инструкторского состава. Новая система отбора

обеспечивает более точечное и обоснованное направление машинистов на обучение.

Таким образом, в целях повышения эффективности системы эксплуатации ТПС в эксплуатационных локомотивных депо представляется целесообразным внедрение методов оценки моделей ведения поезда и соблюдения технологии эксплуатации в процессы технического обучения и повышения квалификации локомотивных бригад. Предлагаемая процессная модель интеграции базируется на объективной оценке уровня профессиональной подготовки машинистов с использованием разработанной методики. Реализация данной модели позволяет обеспечить целенаправленное и последовательное совершенствование технологии эксплуатации за счёт включения в систему обучения и повышения квалификации локомотивных бригад инструментов, основанных на анализе фактических показателей их производственной деятельности.

Выводы по главе 4

1. Экспериментальные исследования на участке Северо-Кавказской железной дороги с пассажирскими поездами подтвердили практическую эффективность разработанной методики оценки моделей ведения поезда, что позволило выявить резервы повышения эффективности эксплуатации локомотивов, снижения потребления ТЭР и увеличения возврата рекуперированной энергии за счёт совершенствования технологии эксплуатации тягового подвижного состава.

2. Анализ экспериментальных данных показал, что в 90 % случаев нарушение плавности хода пассажирского поезда происходит в переходных режимах управления тягой и торможением при движении по участкам пути со знакопеременными уклонами, длина которых менее длины поезда.

3. Анализ данных систем регистрации параметров эксплуатации локомотивов показал, что в настоящее время преимущественно используется комбинированная модель ведения поезда, при которой путём временного ограничения скорости и силы тока в УСАВП достигается управление, близкое к

рациональному по критериям продольной динамики и энергоэффективности, при этом автоматизированный режим составляет 72 % времени рейса, обеспечивая снижение психофизиологической нагрузки на локомотивную бригаду.

4. В ходе анализа экспериментальных поездок пассажирского поезда № 36 «Северная Пальмира» установлено, что при следовании по лимитирующим спускам осуществляется целенаправленная корректировка скорости в системе УСАВП в меньшую сторону, что обеспечивает увеличение объёмов рекуперированной электроэнергии при безусловном соблюдении расписания. Выявлено, что наибольшие резервы экономии топливно-энергетических ресурсов сосредоточены именно на лимитирующих спусках, при этом удельная доля следования в режиме рекуперации составила 33,55 % от общего линейного пробега при ручном управлении и 20,2 % при автоведении.

5. Установлено, что модель ведения поезда, реализуемая при ручном управлении локомотивом, является наиболее энергоэффективной и обеспечивает высокую плавность хода. Удельный расход топливно-энергетических ресурсов с учётом возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть при ручном управлении оказался ниже на 15,7 % по сравнению с режимом автоведения и на 7,73 % по сравнению с комбинированным режимом управления.

6. На основе анализа потребления электроэнергии в эксплуатационном локомотивном депо усовершенствована система технического нормирования ТЭР с применением метода пооперационного дифференцированного учёта по перегонам, что позволило установить до 12 % отклонений от норм в зависимости от реализуемой модели ведения поезда и скорректировать нормативы в пассажирском движении на 3,43 %.

7. Экспериментальные данные подтвердили адекватность разработанной методики оценки модели ведения поезда, а также доказали её эффективность для совершенствования технологии эксплуатации тягового подвижного состава на основе комплексного учёта факторов движения поезда как электромеханической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведённые обзор и анализ показали, что ключевыми приоритетами для железнодорожного транспорта являются обеспечение безопасности, надёжности и энергоэффективности при эксплуатации подвижного состава, а также минимизация влияния человеческого фактора. Установлено, что для объективной и комплексной оценки соблюдения технологии эксплуатации подвижного состава необходимо сочетать использование аналитических методов с данными бортовых систем регистрации параметров эксплуатации локомотивов.

2. Разработана и апробирована универсальная методика комплексной оценки и выбора моделей ведения поезда, основанная на интеграции аналитических методов и нечётко-логического анализа данных бортовых систем и АСУ ЖТ, что обеспечивает объективность и воспроизводимость результатов, возможность сопоставления ручных, автоматизированных и комбинированных моделей ведения поезда, а также формирование рейтингов их эффективности по совокупности критериев (энергоэффективность, безопасность движения, точность хода по расписанию, продольная динамика). Предложенный подход формирует основу для дальнейшей интеграции методик анализа и обучения в автоматизированные и интеллектуальные системы управления локомотивами, соответствует современным задачам цифровизации железнодорожного транспорта и позволяет существенно повысить эффективность эксплуатации тягового подвижного состава.

3. Разработана комплексная имитационная модель поезда посредством синтеза ПК «Универсальный механизм» и MATLAB/Simulink, позволяющая с высокой точностью, за счёт использования технических характеристик завода-изготовителя подвижного состава, исследовать влияние реализуемой модели ведения поезда на энергоэффективность, безопасность и динамику подвижного состава, что обеспечивает возможность практического применения результатов моделирования в системе эксплуатации локомотивов.

4. Проведена комплексная оценка эксплуатационных данных и различных моделей ведения поезда, реализуемых в условиях реальной эксплуатации, с использованием разработанных методики и комплексной имитационной модели поезда. Установлено, что отклонения фактического потребления топливно-энергетических ресурсов от нормативного уровня могут составлять до 20 % как в сторону экономии, так и перерасхода, что имеет принципиальное значение для разработки критериев объективной оценки технологий эксплуатации и формирования научно обоснованных рекомендаций по повышению энергоэффективности. Подтверждено, что применение данных бортовых систем регистрации параметров движения обеспечивает высокую точность анализа эксплуатационных режимов и служит основой для построения энергоэффективных моделей управления локомотивом (моделей ведения поезда).

5. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили, что возможно реализовать различные модели ведения поезда, которые существенно отличаются по технологии эксплуатации, энергоэффективности и продольно-динамическим реакциям подвижного состава. Доказана возможность выбора и реализации рациональной модели ведения поезда в зависимости от заданного приоритетного критерия с применением разработанной автором методики оценки и выбора модели ведения поезда.

6. Методика оценки и выбора модели ведения поезда использована при разработке энергооптимальных режимно-информационных карт, которые апробированы в эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги, что позволило по сравнению с типовым режимом автоведения снизить удельный расход ТЭР на 15,7 %, минимизировать продольные рывки (не более $0,39 \text{ м/с}^3$) и увеличить долю следования в режиме рекуперации на 13,35 процентного пункта.

7. Экспериментальные исследования, проведённые на полигоне железной дороги с пассажирскими поездами, подтвердили практическую ценность и эффективность разработанной методики оценки моделей ведения поезда, а их результаты послужили основой для разработки эффективных и безопасных

приёмов вождения поездов и корректировки норм расхода энергоресурсов, что позволило обеспечить целенаправленное совершенствование технологии эксплуатации тягового подвижного состава в эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года : утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р // Экономика железных дорог. – 2019. – № 8. – С. 104–148. – ISSN 1727-6500. – EDN HNUXMA.

2. **Солоп, И. А.** Комплекс мероприятий, направленных на достижение качества предоставляемых транспортно-логистических услуг в рамках Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» / И. А. Солоп, Е. А. Чеботарева // Наука и образование транспорту. – 2022. – № 1. – С. 171–175. – EDN UYPRNL.

3. Указ Президента Российской Федерации от 7.05.2018 № 204 (ред. от 21.07.2020) «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период 2024 года». – Текст : электронный // Официальные сетевые ресурсы Президента России [сайт]. – URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 02.03.2026).

4. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : утверждена Распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. Справочно-правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402052/ (дата обращения: 02.03.2026).

5. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года : утверждена Распоряжением Правительства РФ от 8 декабря 2011 г. № 2227-р. – Текст : электронный // Правительство России. Официальный сайт. – URL: <http://government.ru/docs/9282> (дата обращения: 02.03.2026).

6. Стратегия развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 года : утверждена Советом директоров ОАО «РЖД» от 27 декабря 2013 г. № 19 (в ред. Постановления Правительства РФ от 13.10.2022 № 1817). – Текст : электронный // КонсультантПлюс. Справочно-правовая система. – URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 02.03.2026).

7. Государственная программа Российской Федерации «Развитие транспортной системы» : утверждена Постановлением Правительства РФ от 20 декабря 2017 г. № 1596. – Текст : электронный. – URL:

<http://gov.garant.ru/SESSION/PDA/linkProxy?subjectId=71843998&linkType=65537>
(дата обращения: 02.03.2026).

8. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2018. – 115 с.

9. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников [и др.]. – Москва : Издательский дом МИСиС, 2012. – 620 с.

10. Курс на сбережение. Компания «РЖД» ведёт системную работу по экономии энергоресурсов. – Текст : электронный // Гудок. – 10.11.2022. – URL: <https://www.gudok.ru/content/economy/1619386> (дата обращения: 02.03.2026).

11. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : утверждена Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. – Текст : электронный // Правительство России. Официальный сайт. – URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 02.03.2026).

12. Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 79 с.

13. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года : утверждена распоряжением Правительства РФ от 19 марта 2019 г. № 466-р (ред. от 13.10.2022). – Москва : ОАО «РЖД», 2022. – 136 с.

14. Факторный анализ нарушений безопасности движения и отказов технических средств в локомотивном комплексе ОАО «РЖД» за декабрь и 2022 год : материалы отчёта первых заместителей начальников региональных дирекций тяги, 27–28 февраля 2023 г. – Текст : электронный. – Санкт-Петербург, 2022. – Систем. требования PowerPoint. Доступ из локальной сети Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».

15. Актуальные проблемы транспорта в XXI веке : труды III Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 27–28 марта

2024 года. – Новокузнецк : Сибирский государственный индустриальный университет, 2024. – 403 с.

16. **Чикиркин, О. В.** Цифровая трансформация в локомотивном комплексе / О. В. Чикиркин // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 1. – С. 72–77. – ISSN 0044-4448. – EDN CUIINFO.

17. **Хорошевич, А. А.** Цифровизация железной дороги / А. А. Хорошевич // Новости науки и технологий. – 2020. – № 4 (55). – С. 57–66.

18. **Понятов, Д. Н.** Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса / Д. Н. Понятов // Интеллектуальный потенциал XXI века : материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, София, Болгария, 19 мая 2020 года / под общей редакцией А.И. Вострецова. – Нефтекамск : Научно-издательский центр «Мир науки» (ИП Вострецов Александр Ильич), 2020. – С. 39–46. – EDN JIXHRU.

19. **Гурский, М. М.** Применение искусственного интеллекта на транспорте / М. М. Гурский, Н. Д. Берман // Far East Math – 2021 : материалы национальной научной конференции, Хабаровск, 01–30 ноября 2021 года / редакционная коллегия : Е. Г. Агапова (ответственный редактор) [и др.]. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2021. – С. 86–91. – ISBN 978-5-7389-3477-3. – EDN ESDTQN.

20. Эксплуатационно-технические характеристики и обеспечение эксплуатации авиационной техники / Н. А. Баев, А. Н. Биндер, О. Я. Деркач [и др.] ; под редакцией А. Н. Петрова. – Москва : ООО «Широкий взгляд», 2012. – 140 с. – ISBN 978-5-904465-03-2.

21. **Коптев, А. Н.** Синтез систем диагностического управления техническим состоянием бортовых комплексов оборудования летательных аппаратов : электронное учебное пособие / А. Н. Коптев, А. В. Кириллов, А. Н. Тихонов. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет, 2012. – 293 с. – EDN CINVXQ.

22. **Кузнецов, К. В.** Традиционные и перспективные системы технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава / К. В. Кузнецов, Л. М. Ковалева, Д. Е. Медведев // Техник транспорта: образование и практика. – 2022. – Т. 3, № 4. – С. 424–428. – DOI 10.46684/2687-1033.2022.4.424-428.

23. **Далецкий, С. В.** Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации / С. В. Далецкий, О. Я. Деркач, А. Н. Петров. – Москва : Воздушный транспорт, 2002. – 216 с. – ISBN 5-88821-045-5.

24. **Зайцева, И. А.** Повышение эффективности использования магистральных локомотивов на основе развития системы технического обслуживания и ремонта / И. А. Зайцева // Развитие экономической науки на транспорте: новые векторы в постпандемийный период : сборник научных статей международной научно-практической конференции. Том 1. Санкт-Петербург, 2020. – Санкт-Петербург : ООО «Институт независимых социально-экономических исследований – оценка», 2020. – С. 130–136. – ISBN 978-5-6044917-3-7. – EDN IOQENI.

25. **Полякова, А. С.** Историческая эволюция правил технической эксплуатации железных дорог России / А. С. Полякова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: История и право. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 170–184. – DOI 10.21869/2223-1501-2024-14-4-170-184.

26. **Шантаренко, С. Г.** Оптимизация локомотивного комплекса / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустян, А. Т. Осяев // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 8. – С. 49–51. – ISSN 0044-4448. – EDN RACBBD.

27. **Кузнецов, К. В.** Традиционные и перспективные системы технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава / К. В. Кузнецов, А. М. Дроздов // Управление эксплуатационной работой на транспорте : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–16 марта 2022 года. – Санкт-Петербург : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. – С. 217–222. – EDN EFMFJE.

28. **Лакин, И. И.** Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Лакин Игорь Игоревич, 2016. – 195 с.

29. Повышение эффективности технического обслуживания локомотивов / А. В. Грищенко, В. В. Грачёв, В. А. Кручек, М. А. Шрайбер // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 4 (33). – С. 93–97. – ISSN 1815-588X. – EDN RAIWRP.

30. **Гапченко, Н. Н.** Развитие систем бортовой диагностики OBD / Н. Н. Гапченко, Д. А. Павлов, А. А. Пионтковский // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 8-1 (96). – С. 17–18. – ISSN 2412-9755. – EDN WHTVKF.

31. **Григорьев, М. В.** Применение эффективной стратегии технического обслуживания и ремонта автомобилей как способ повышения их эксплуатационной надёжности / М. В. Григорьев, В. В. Демидов // Инженерные решения. – 2020. – № 6 (16). – С. 9–14. – DOI 10.32743/2658-6479.2020.6.16.317.

32. **Кузнецов, С. В.** Системы эксплуатационного контроля бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации / С. В. Кузнецов // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества : сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвящённой 50-летию МГТУ ГА, Москва, 25–26 мая 2021 года. – Москва : ИД Академии Жуковского, 2021. – С. 239–242. – EDN FXCHMH.

33. Современное состояние и актуальные проблемы водного транспорта : сборник статей IV Всероссийской научно-практической студенческой конференции, Казань, 09–10 июня 2022 года / под редакцией И. Р. Салахова. – Казань : Казанский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», 2022. – 210 с. – EDN TVWPFV.

34. **Пушкарёв, Д. О.** Применение нейросетевых экспертных систем для контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния авиационных двигателей / Д. О. Пушкарёв // Информационно-технологический вестник. – 2020. – № 3 (25). – С. 51–59. – DOI 10.21499/2409-1650-2020-25-3-51-59.

35. **Кан, А. В.** Общая постановка задачи мониторинга технического состояния авиационной техники в системах управления безопасностью полётов / А. В. Кан, А. А. Кулешов, В. С. Шапкин // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2023. – № 44. – С. 103–112.

36. Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки / А. А. Авершин, А. М. Агеев, Н. С. Балбекин [и др.]. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2020. – 456 с. – ISBN 978-5-4446-1480-8.

37. **Семенов, А. П.** Цифровизация ремонтного производства тягового подвижного состава / А. П. Семенов, Д. В. Казарин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (45). – С. 93–103. – DOI 10.20291/2079-0392-2020-1-93-103.

38. **Никифорова, Н. А.** Цифровые двойники на транспорте / Н. А. Никифорова // Студенческий вестник. – 2023. – № 21-9 (260). – С. 60–61. – EDN RBCJTC.

39. **Шевченко, Д. В.** Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д. В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2021. – Т. 80, № 2. – С. 91–99. – DOI 10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99.

40. **Прохоров, А.** Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт : корпоративное издание / А. Прохоров, М. Лысачёв ; научный редактор профессор А. Боровков ; Росэннергоатом (Росатом). – Москва : ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с. – ISBN 978-5-98094-008-9.

41. **Макогон, А. С.** Применение цифровых двойников на транспорте / А. С. Макогон, К. И. Доманов // Студент: наука, профессия, жизнь : материалы X Всероссийской студенческой научной конференции с международным участием, Омск, 24 апреля 2023 года. В 5 ч. Ч. 1. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 255–261.

42. **Пудовиков, О. Е.** Предиктивная диагностика подвижного состава на базе инновационной технологии промышленного интернета вещей / О. Е. Пудовиков, В. Н. Тарасова, В. В. Дегтярева // СТИН. – 2023. – № 7. – С. 5–8. – ISSN 0869-7566. – EDN ZCONEC.

43. Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса / О. С. Валинский, А. М. Лубягов, А. Н. Маврин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 3. – С. 26–32. – ISSN 0044-4448. – EDN ZPQNLT.

44. **Бурмистров, Д. В.** Цифровая трансформация ремонтных предприятий. Проект «Умное депо» / Д. В. Бурмистров, С. В. Коркина, А. В. Шпетко // Транспортная наука и инновации : материалы Международной научно-

практической конференции, Самара, 01–02 июня 2023 года. – Самара : Самарский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 16–19. – EDN RLXGSH.

45. **Титов, А. В.** Перспективы технологического развития и внедрения безэкипажных судов / А. В. Титов, Л. Баракат // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 3-1 (41). – С. 94–103. – ISSN 2073-7173. – EDN YMNXNZ.

46. Проблемы цифровизации внутреннего водного транспорта / И. И. Ганчерёнок, Н. Н. Горбачёв, А. О. Ничипорук [и др.] // Научные проблемы водного транспорта. – 2022. – № 70. – С. 110–124. – DOI 10.37890/jwt.vi70.233.

47. **Василюй, Д. В.** Концепция цифровизации портов «умный порт» / Д. В. Василюй // Экономика будущего: тренды, вызовы и возможности : материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием, Казань, 23–24 мая 2024 года. – Казань : ООО «АРТИТЕХ», 2024. – С. 736–742. – EDN GRPKCX.

48. Siemens AG. Siemens Annual Report 2023. Munich: Siemens AG, 2023. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:be1828a9-2368-4c3b-a85f-f1bcb1f14a59/Siemens-Annual-Report-2023.pdf> (дата обращения: 10.04.2026).

49. International Civil Aviation Organization (ICAO). Annex 6 – Operation of Aircraft. Part I: International Commercial Air Transport – Aeroplanes. – 10th ed. – Montreal : ICAO, 2016. – 149 с. – URL: [https://www.icao.int/safety/CAPSCA/PublishingImages/Pages/ICAO-SARPs-\(Annexes-and-PANS\)/Annex%206.pdf](https://www.icao.int/safety/CAPSCA/PublishingImages/Pages/ICAO-SARPs-(Annexes-and-PANS)/Annex%206.pdf) (дата обращения: 05.04.2026).

50. **Петрова, Т. В.** Эксплуатационная технологичность воздушных судов гражданской авиации / Т. В. Петрова, Д. А. Иванов. – Санкт-Петербург : СПбГУ ГА, 2021. – 107 с. – ISBN 978-5-907354-08-1.

51. **Якуничкина, С. А.** Обзор современных систем связи и передачи данных в гражданской авиации / С. А. Якуничкина, Д. И. Сагитов // Научный аспект. – 2024. – Т. 7, № 4. – С. 795–800. – ISSN 2226-5694. – EDN KYXQEA.

52. **Щитов, А. Н.** Анализ опыта зарубежных авиакомпаний в области безопасности полётов / А. Н. Щитов // Промышленность, сельское хозяйство, энергетика и инфраструктура: проблемы и векторы развития : сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 25 сентября 2017 года. – Санкт-Петербург : Научная

общественная организация «Профессиональная наука», 2017. – С. 460–494. – ISBN 978-1-370-41337-9. – EDN ZJJZXX.

53. Airbus. SAS becomes launch customer for SPM Alliance, first solution from the Digital Alliance [Electronic resource] // Airbus Newsroom. Apr. 26, 2022. – URL: https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-04-sas-scandinavian-airlines-chooses-digital-alliances-skywise?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 12.04.2026).

54. AI-Powered Predictive Maintenance in Aviation Operations // 16th International Conference on Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Bern, Switzerland, April 2025. – URL: https://www.researchgate.net/publication/389711075_AI-Powered_Predictive_Maintenance_in_Aviation_Operations (дата обращения: 12.04.2026).

55. DNV. Rules for Classification and Ship Inspection // DNV, 2020. – URL: <https://www.dnv.com/maritime/classification> (дата обращения: 02.04.2026).

56. Fontes, Ya. M. Avaliação do navio elétrico e autônomo Yara Birkeland como tecnologia disruptiva por meio de uma análise comparativa / Ya. M. Fontes // Pensar Acadêmico. – 2021. – Vol. 19, No. 2. – P. 597. – DOI 10.21576/pa.2021v19i2.2542.

57. Оценка рисков эксплуатации безэкипажных судов / А. В. Титов, Л. Баракат, О. Ю. Лазовская [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1-4 (43). – С. 11–23. – ISSN 2073-7173. – EDN DRDOCM.

58. Cyber security on sea transport / M. Kardakova, I. Shipunov, A. Nyrkov, T. Knysh // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 982. – P. 481–490. – DOI 10.1007/978-3-030-19756-8_46.

59. **Ghoshal, A.** The world's largest automated port is now open in Singapore / A. Ghoshal // New Atlas. – March 02, 2023. – URL: <https://newatlas.com/environment/largest-automated-port-singapore-tuas/> (дата обращения: 12.04.2026).

60. **Иванова, И. В.** Порт Сингапура: экономический прогресс и экологическая безопасность / И. В. Иванова // Человек и природа : материалы XXVII Международной междисциплинарной конференции и Международной междисциплинарной молодёжной школы, Крым, 18–22 сентября 2017 года / под редакцией Н. О. Ковалевой, С. К. Костовска, А. С. Некрич, О. А. Салимгареевой.

– Москва : ООО «МАКС Пресс», 2017. – С. 47–48. – ISBN 978-5-317-05713-8. – EDN ZVPCQP.

61. Maritime and Port Authority of Singapore. Port of the Future – Tuas Port. 2023. URL: <https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home/port-of-the-future/tuas-port> (дата обращения: 12.04.2026).

62. **Кудрявцева, И. Ю.** Проблемы цифровизации системы внутреннего контроля на предприятиях водного транспорта / И. Ю. Кудрявцева // Транспорт. Горизонты развития : труды 1-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород – Новосибирск, 25–28 мая 2021 года. – Нижний Новгород : Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 2021. – С. 66. – ISBN 978-5-901722-77-0. – EDN RZVMID.

63. **Ганчерёнок, И. И.** Внутренний водный транспорт: согласованность, совместимость и интероперабельность как основа интеграции данных / И. И. Ганчерёнок, Н. Н. Горбачёв // Современные проблемы логистики, экономики, управления в эпоху глобальных вызовов : сборник материалов IV Международной заочной научной конференции, Астрахань, 16 декабря 2024 года. – Астрахань : ИП Сорокин Р.В., 2025. – С. 59–62. – ISBN 978-5-00201-249-7. – EDN WYEZBS.

64. **Гончарова, Н. В.** Развитие информационных технологий и систем на внутреннем водном транспорте / Н. В. Гончарова // Информационные технологии как основа эффективного инновационного развития : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Sterlitaamak, 24 мая 2024 года. Ч. 1. – Sterlitaamak : ООО «Агентство международных исследований», 2024. – С. 134–137. – ISBN 978-5-907808-67-6. – EDN LCHMAQ.

65. Siemens Mobility. Railigent X: цифровая платформа для управления активами железнодорожного транспорта. – URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/digital-solutions-software/digital-services/railigent-x.html> (дата обращения: 13.04.2026).

66. RailTech.com. Deutsche Bahn using drones for infrastructure inspection. – URL: <https://www.railtech.com/infrastructure/2019/01/25/deutsche-bahn-using-drones-for-infrastructure-inspection/> (дата обращения: 13.04.2026).

67. Railway-News.com. Siemens and Deutsche Bahn Launch Predictive Maintenance Pilot Project. – URL: <https://railway-news.com/siemens-and-deutsche-bahn-launch-predictive-maintenance-pilot-project/> (дата обращения: 13.04.2026).

68. JR East begins automatic train operation trials on Yamanote Line. – URL: <https://www.timeout.com/tokyo/news/jr-east-will-test-driverless-trains-on-the-yamanote-line-from-october-2022-052522> (дата обращения: 13.04.2026).

69. ICAO. Human Factors is about.... – URL: <https://www.icao.int/MID/Documents/2020/RSC7/ELP%20-%20Egypt.pdf> (дата обращения: 13.04.2026).

70. Federal Aviation Administration (FAA). Human Factors – Addendum to the Aviation Maintenance Technician Handbook. – URL: https://www.faa.gov/files/gslac/courses/content/258/1097/AMT_Handbook_Addendum_Human_Factors.pdf (дата обращения: 14.04.2026).

71. Межгосударственный авиационный комитет (МАК). Официальный сайт. – URL: <https://mak-iac.org/> (дата обращения: 14.04.2026).

72. Human factors, transport modes collaborate to reduce accidents // CORDIS: European Commission research results. – URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/443255-human-factors-transport-modes-collaborate-to-reduce-accidents> (дата обращения: 14.04.2026).

73. **Валинский, О. С.** Об итогах 2022 года в области безопасности движения и развитии культуры безопасности в Дирекции тяги / О. С. Валинский // Материалы заседания секции «Локомотивное хозяйство» Научно-технического совета ОАО «РЖД», 22–23 февраля 2023 г. – Москва, 2023. – Систем. требования PowerPoint. Доступ из локальной сети Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».

74. **Коршун, Е. А.** Роль человеческого фактора в повышении безопасности труда на железнодорожном транспорте / Е. А. Коршун, В. М. Медведева // Техносферная безопасность городских агломераций : сборник материалов II международной школы-конференции, Москва, 15–16 декабря 2021 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2022. – С. 123–129. – ISBN 978-5-7473-1127-5. – EDN TSMDPD.

75. **Захарова, О. Г.** Повышение эффективности профессиональной подготовки лётного состава на основе совершенствования моделей и средств

организации обучения : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.14 / Захарова Ольга Геннадьевна, 2014. – 149 с.

76. **Бересток, Н. О.** Повышение безопасности производственных процессов предприятий железнодорожного транспорта на основе снижения влияния человеческого фактора : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.02.22 / Бересток Николай Олегович, 2022. – 121 с.

77. Delta Air Lines. ESG Report 2023. – URL: <https://esghub.delta.com/content/esg/en/2023/home.html> (дата обращения: 14.04.2026).

78. Boeing. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents 1959–2022. – URL: https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf (дата обращения: 14.04.2026).

79. Benefits of slow steaming in realistic sailing conditions along different sailing routes / A. Farkas, N. Degiuli, I. Martić, A. Mikulić // Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 275. – Article no. 114143. – DOI 10.1016/j.oceaneng.2023.114143.

80. The Impact of Slow Steaming on Fuel Consumption and CO2 Emissions of a Container Ship / V. Pelić, O. Bukovac, R. Radonja, N. Degiuli // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11, No. 3. – P. 675. – DOI 10.3390/jmse11030675.

81. **Karina, Zh. P.** The «Ever given» accident and its impact on investment and logistic strategies of global companies / Zh. P. Karina, R. A. Tsoy // Наука и современное образование: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 мая 2021 года / ответственный редактор Г. Ю. Гуляев. – Пенза : ООО «Наука и Просвещение», 2021. – С. 130–132. – ISBN 978-5-00159-877-0. – EDN TAFEOO.

82. A Decade of ECDIS: Analytical Review of the ECDIS Effect Towards the Safety of Maritime Shipping // AIN Journal. – 2023. – Vol. 2, No. 46.

83. **СТО РЖД 1.05.515.3-2009.** Методы и инструменты улучшений. Диаграмма Исикавы : стандарт организации : издание официальное : утверждён и введён в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 2 июня 2009 г. № 1150р : введён впервые : дата введения 2009-07-01 / разработан ОАО «РЖД» – Москва : ОАО «РЖД», 2009. – 10 с.

84. Стратегия обеспечения гарантированной безопасности и надёжности перевозочного процесса в холдинге «РЖД» : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 8 декабря 2015 г. № 2855р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2015. – 57 с.

85. **СТО РЖД 02.050-2021.** Аудиты в системе менеджмента безопасности движения ОАО «РЖД». Основные положения : стандарт организации : издание официальное : утверждён и введён в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2021 г. № 2998/р : введён впервые : дата введения 2022-01-01 / разработан ОАО «РЖД» – Москва : ОАО «РЖД», 2021. – 28 с.

86. **Ракова, А. М.** Экономическое обоснование систем автоведения поездов на железнодорожном транспорте : диссертация на соискание учёной степени кандидата экономических наук : 08.00.05 / Ракова Анна Михайловна. – Москва, 2012. – 179 с.

87. Классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии электроподвижным составом / А. А. Бакланов, К. И. Доманов, Н. В. Есин [и др.] // Инновационный транспорт. – 2020. – № 4 (38). – С. 61–66. – DOI 10.20291/2311-164X-2020-4-61-66.

88. **Сидорова, Н. Н.** Энергоёмкость перевозочного процесса в электрической тяге поездов и обоснование путей энергосбережения : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук : 05.22.07 / Сидорова Наталья Николаевна. – Москва, 2001. – 286 с.

89. Siemens Mobility. Connected Driver Advisory System (C-DAS). – URL: <https://www.mobility.siemens.com/uk/en/portfolio/rail-infrastructure/connected-driver-advisory-system.html> (дата обращения: 18.04.2026).

90. **Харченко, П. А.** Повышение энергетической эффективности эксплуатационных локомотивных депо на основе анализа алгоритмов ведения поезда посредством системы регистрации параметров движения и автоведения и принятия управленческих и технических решений / П. А. Харченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 3. – С. 65–70. – ISSN 1818-5509. – EDN TUICGT.

91. **СТО РЖД 1.05.515.2-2009.** Методы и инструменты улучшений. Анализ Парето : стандарт организации : издание официальное : утверждён и введён в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 2 июня 2009 г. № 1150р : введён

впервые : дата введения 2009-07-01 / разработан ОАО «РЖД» – Москва : ОАО «РЖД», 2009. – 15 с.

92. **Черногорец, Н.** Не думай о киловатт-часе свысока / Н. Черногорец // Газета «Московский железнодорожник». – 2010. – 14 июля. – № 36. – С. 8–9.

93. **Кардашов Н.** Разумная экономия даёт результаты / Н. Кардашов // Газета «Вперед». – 2020. – 25 февраля. – № 36. – С. 5.

94. **Железняк, С. П.** Совершенствование системы анализа и нормирования расхода энергоресурсов на тягу поездов в локомотивном депо : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Железняк Светлана Петровна. – Омск, 2011. – 179 с.

95. **Малахов, С. В.** Оптимизация энергозатрат на тягу поездов на основе уточнённого метода тяговых расчётов : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Малахов Сергей Валерьевич. – Москва, 2021. – 147 с.

96. **Зарифьян, А. А.** Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Зарифьян Александр Александрович. – Ростов-на-Дону, 2016. – 124 с.

97. **Гребенников, Н. В.** Научные основы повышения энергетической эффективности автономных локомотивов с электрической передачей мощности : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук : 2.9.3 / Гребенников Николай Вячеславович. – Ростов-на-Дону, 2023. – 363 с.

98. **Юренко, К. И.** Взаимодействие «машинист – локомотив» в процессе управления движением поезда / К. И. Юренко, П. А. Харченко // Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление : сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 07–08 февраля 2018 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 185–189. – ISBN 978-5-88814-772-6. – EDN VXAUWI.

99. **Харченко, П. А.** Оптимизация алгоритмов автоведения пассажирских поездов на основе анализа ситуационной модели управленческой деятельности машиниста / П. А. Харченко // Транспорт-2015 : труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 21–24 апреля 2015 года. Т. 2 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2015. – С. 279–281. – ISBN 978-5-88814-412-1. – EDN VDBRYD.

100. **Козубенко, В. Г.** Безопасное управление поездом: вопросы и ответы / В. Г. Козубенко. – Москва : Маршрут, 2005. – 319 с. – ISBN 5-89035-169-9.

101. **Копытенкова, О. И.** Анализ современных автоматизированных тренажёрно-обучающих комплексов для подготовки локомотивных бригад / О. И. Копытенкова, О. Т. Алиев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 3 (40). – С. 143–150. – ISSN 1815-588X.

102. **Алиев, О. Т.** Повышение безопасности производственных процессов на основе совершенствования системы подготовки локомотивных бригад : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.26.01 / Алиев Обиджон Туйчиевич. – Москва, 2017. – 134 с.

103. **Марихин, С. В.** Методы профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации на современном этапе развития общества / С. В. Марихин, А. В. Межуева // Universum: психология и образование. – 2022. – № 11 (101). – С. 25–28. – DOI 10.32743/UniPsy.2022.101.11.14431.

104. FORUM8. Japan's Largest Railway Company Selects FORUM8 Drive Simulator to Enhance its Employee Safety Training Programme. – URL: <https://www.forum8.com/japans-largest-railway-company-selects-forum8-drive-simulator-to-enhance-its-employee-safety-training-programme/> (дата обращения: 19.04.2026).

105. **Михеев, В. А.** Предиктивный ремонт тягового подвижного состава на базе бортовых микропроцессорных систем управления / В. А. Михеев, О. С. Томилова, А. В. Бородин // Известия Транссиба. – 2019. – № 2 (38). – С. 8–16. – ISSN 2220-4245.

106. **Федотов, М. В.** Предиктивная система технического диагностирования локомотивов с использованием методов интеллектуального анализа данных /

М. В. Федотов, В. В. Грачёв // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 6 (91). – С. 28–34. – ISSN 1994-831X. – EDN XJZCWC.

107. **Михеев, В. А.** Предииктивный ремонт тягового подвижного состава / В. А. Михеев, О. С. Томилова // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 14 ноября 2019 года. – Омск : ОмГУПС, 2019. – С. 16–21. – ISBN 978-5-94941-249-7. – EDN PDLGPV.

108. **Юренко, К. И.** Исследование нейро-нечётких моделей в задачах автоматизации управления движением поезда / К. И. Юренко, П. А. Харченко // Применение и развитие нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике : материалы Международной молодёжной научно-практической конференции, Новочеркасск, 03–04 декабря 2018 года. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. – С. 25–26. – ISBN 978-5-906993-91-5. – EDN YUZPDF.

109. Использование искусственных нейронных сетей на российских железных дорогах для контроля токоприёмников поездов / В. С. Язынин, А. М. Барановский, А. А. Воробьев, И. Ю. Романова // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 267–287. – DOI 10.12731/2227-930X-2023-13-1-267-287.

110. Оценка эффективности моделей энергосберегающего движения поезда / С. Г. Истомин, К. И. Доманов, А. П. Шатохин [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (65). – С. 130–140. – DOI 10.20291/2079-0392-2025-1-130-140.

111. Синтез нейро-нечёткой модели в структуре системы автоматического управления подвижным составом / К. И. Юренко, П. А. Харченко, Е. И. Фандеев, И. К. Юренко // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 4. – С. 126–133. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_4_126.

112. Системный подход в задаче оптимизации управления движением поезда / К. И. Юренко, П. А. Харченко, Е. И. Фандеев, И. К. Юренко // Системный анализ, управление и обработка информации : труды VIII Международной конференции (п. Дивноморское, 8–13 октября 2017 г.) ; Донской государственный

технический университет. Т. 1. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. – С. 30–37. – ISBN 978-5-7890-1511-7.

113. Перспективы применения беспилотных поездов на отечественном рельсовом транспорте / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, А. М. Перепеченов // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии : сборник докладов Второй Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. – С. 86–91. – DOI 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-86-91.

114. Synthesis of a Neuro-Fuzzy Model in the Structure of an Automatic Rolling Stock Control System / K. Yurenko, E. Fandeev, P. Kharchenko, I. Yurenko // Studies in Systems, Decision and Control. – 2022. – Vol. 417. – P. 121–132. – DOI 10.1007/978-3-030-95116-0_10.

115. Программа развития человеческого капитала ОАО «РЖД» на период до 2025 года : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2020 г. № 2757/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2020. – 133 с.

116. Концепция внедрения и развития системы единых корпоративных требований к персоналу ОАО «РЖД» от 3 июня 2015 г. № 1410р. – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – 10 с.

117. **Ринчино, А. Л.** Формирование кадрового резерва предприятия на основе системы единых корпоративных требований / А. Л. Ринчино, А. Л. Поплавская // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 6-1 (87). – С. 219–223. – ISSN 2412-9720. – EDN WAZZPR.

118. **Абляимов, О. С.** Режимные карты вождения поездов и особенности их составления / О. С. Абляимов // Universum: технические науки. – 2020. – № 10-1 (79). – С. 81–84. – eISSN 2311-5122.

119. Рекомендации по порядку составления режимных карт в структурных подразделениях Дирекции тяги : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 7 июня 2016 г. № 1075р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 6 с.

120. **Юренко, К. И.** Анализ, исследование и разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения для оптимизации режимов ведения поезда / К. И. Юренко, П. А. Харченко // Применение и развитие

нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике : материалы Международной молодёжной научно-практической конференции, Новочеркасск, 03–04 декабря 2018 года. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. – С. 52–61. – ISBN 978-5-906993-91-5. – EDN YUZPSP.

121. **Харченко, П. А.** Оценка профессиональных компетенций машинистов локомотивов с использованием данных бортовых регистраторов параметров движения / П. А. Харченко, К. И. Юренко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 17–20 апреля 2018 года. Т. 3. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 215–219. – ISBN 978-5-88814-812-9. – EDN YVGSVN.

122. **Харченко, П. А.** Критерии оценки управляющей деятельности машиниста на основе данных бортовых регистраторов параметров движения / П. А. Харченко, К. И. Юренко // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 01–02 марта 2018 года. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 91–94. – ISBN 978-5-88814-749-8. – EDN XZKUMH.

123. **Харченко, П. А.** Проблемы энергоэффективности и безопасности при эксплуатации современного подвижного состава / П. А. Харченко, К. И. Юренко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 года. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 284–288. – ISBN 978-5-88814-530-2. – EDN YSNZTD.

124. Методика анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов : утверждена приказом Министерства путей сообщения от 20 июня 1977 г. № ЦТД-26 – Москва : МПС, 1977. – 94 с.

125. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд [и др.] ; под редакцией И. П. Исаева. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с. – ISBN 5-277-01462-4.

126. Испытания локомотивов и выбор рациональных режимов вождения поездов / под редакцией С. И. Осипова. – Москва : Транспорт, 1975. – 272 с.

127. **Альжанов, Б. Б.** Анализ и способы снижения расхода электроэнергии в грузовом движении на Казахстанской железной дороге : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Альжанов Бауржан Бахытжанович. – Москва, 2010. – 24 с

128. **Мугинштейн, Л. А.** Энергооптимальный тяговый расчёт движения поездов / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, И. А. Ябло // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 2. – С. 24–29. – ISSN 0044-4448. – EDN OYSEIB.

129. Метод постоянных перегонных скоростей для оценки энергозатрат на тягу поездов / Л. А. Мугинштейн, А. В. Лохач, И. И. Мерман [и др.] // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2000. – № 4. – С. 16–19. – ISSN 0869-8163. – EDN SKGPGJ.

130. Программный комплекс для учёта, анализа и нормирования расходов энергоресурсов / Л. А. Мугинштейн, Е. Н. Школьников, А. В. Андреев [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 9. – С. 32–36. – ISSN 0044-4448. – EDN TTOZZH.

131. **Мугинштейн, Л. А.** АРМ теплоэнергетика депо для учёта, анализа, нормирования и управления расходами топлива и энергии на тягу поездов / Л. А. Мугинштейн, А. В. Лохач, А. В. Косарев // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : труды 4-й научно-практической конференции, Москва, 07–08 июня 2001 года. – Москва : Московский государственный университет путей сообщения, 2001. – С. 239. – EDN TSYIOL.

132. **Маринин, С. А.** Совершенствование системы нормирования энергозатрат в грузовом движении электровозами переменного тока : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Маринин Сергей Александрович. – Москва, 2010. – 185 с.

133. Положение о планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД» : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 17 мая 2019 г. № 962/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2019. – 26 с.

134. Регламент формирования и контроля исполнения консолидированных бюджетов холдинга «РЖД» : утверждён распоряжением ОАО «РЖД» от 2 декабря 2013 г. № 2684р. – Москва : ОАО «РЖД», 2013. – 136 с.

135. Методика определения показателей энергетической эффективности перевозочного процесса : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26 ноября 2016 г. № 2383р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 7 с.

136. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26 декабря 2014 г. № 512. – Москва : ОАО «РЖД», 2014. – 52 с.

137. Инструкция по определению и предъявлению подразделениям ОАО «РЖД» расходов, связанных с покупкой электрической энергии : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 19 января 2017 г. № 109/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2017. – 56 с.

138. Методика прогнозирования небаланса электрической энергии на тягу поездов в границах железных дорог: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2016 г. № 2783/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 49 с.

139. **Зверев, А. Г.** Система информационного обеспечения и анализа потерь электрической энергии на тягу поездов : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.09 / Зверев Андрей Григорьевич. – Омск, 2000. – 169 с.

140. Методика планирования и нормирования энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 15 января 2013 г. № 44р. – Москва : ОАО «РЖД», 2013. – 19 с.

141. **Давыдов, А. И.** Повышение эффективности системы анализа и нормирования энергопотребления на тягу поездов : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Давыдов Алексей Игоревич. – Омск, 2012. – 18 с.

142. Правила тяговых расчётов для поездной работы : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 170 с.

143. Разъяснения по порядку разработки и актуализации технических и пооперационных норм расхода топливно-энергетических ресурсов : утверждены телеграммой ОАО «РЖД» от 28 декабря 2017 г. № ИСХ-19056/ЦТ. – Москва : ОАО «РЖД», 2017. – 10 с.

144. Методика отнесения фактического расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов по видам движения и родам работы локомотивов при обработке маршрутов машиниста : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 6 августа 2010 г. № 1712р. – Москва : ОАО «РЖД», 2010. – 19 с.

145. Методика оценки работы локомотивных бригад по эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 3 сентября 2012 г. № 1757р. – Москва : ОАО «РЖД», 2012. – 6 с.

146. Положение о машинисте-инструкторе локомотивных бригад Дирекции тяги : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 9 апреля 2018 г. № 707/р (ред. от 25.02.2021). – Москва : ОАО «РЖД», 2021. – 56 с.

147. Положение о классификации, порядке расследования и учёта транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта : утверждено Приказом Минтранса России от 18 декабря 2014 г. № 344 (ред. от 19.07.2022). – Воронеж : ООО «ВИННЕР», 2022. – 13 с.

148. Документы ОАО «РЖД» по вопросам учёта отказов в работе технических средств и технологических нарушений на инфраструктуре ОАО «РЖД» : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 6 сентября 2021 г. № 1915/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2021. – 83 с.

149. Положение об организации расшифровки параметров движения локомотивов : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 19 февраля 2019 г. № 296/р. – Москва : ОАО «РЖД», 2019. – 68 с.

150. **Юренко, К. И.** Анализ модели управляющей деятельности машиниста локомотива и его профессиональных компетенций на основе математического аппарата нечёткой логики / К. И. Юренко, П. А. Харченко // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2. – С. 83. – eISSN 2073-8633. – EDN KSTKBR.

151. Train operation control on-based of logical-linguistic model / K. I. Yurenko, P. A. Kharchenko, E. I. Fandeev, I. K. Yurenko // Austrian Journal of Political Science. – 2019. – Vol. 19, No. 22. – Article no. e4. – DOI 10.4108/eai.13-7-2018.156388.

152. **Харченко, П. А.** Методический подход к повышению эффективности эксплуатации тягового подвижного состава на основе информации о

выполненных поездках / П. А. Харченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2 (102). – С. 134–141. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_134.

153. **Ромен, Ю. С.** Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки / Ю. С. Ромен, Л. А. Мугинштейн, Л. И. Неверова // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 64–68. – ISSN 1994-831X. – EDN QJEVRH.

154. **Мугинштейн, Л. А.** Численное моделирование продольно-динамических процессов в грузовых поездах с распределённой тягой / Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябло, С. И. Лисеев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2004. – № 5. – С. 143–147. – ISSN 2307-3489.

155. Нумерация поездов для графика движения : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 5 апреля 2014 г. № 859р (ред. от 13.10.2020). – Москва : ОАО «РЖД», 2020. – 10 с.

156. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утверждены Приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. – Воронеж : ООО «ВИННЕР», 2022. – 598 с.

157. **Харченко, П. А.** Повышение уровня безопасности движения поездов и энергоэффективности перевозочного процесса путём совершенствования методов и моделей поддержания компетентности персонала / П. А. Харченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (61). – С. 123–131. – ISSN 1818-5509.

158. **Миронова, Л. А.** Анализ концепции «Цифровая железная дорога» и перспективы её развития / Л. А. Миронова, Г. В. Колодезная // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2020. – № 2 (23). – С. 21–23. – ISSN 2415-8658. – EDN AQTUJC.

159. **Жашкова, Т. В.** Цифровая экономика и цифровая железная дорога / Т. В. Жашкова, А. С. Гришанина // Современные информационные технологии. – 2019. – № 30. – С. 105–110. – ISSN 1815-2724. – EDN SEMUSR.

160. **Юренко, К. И.** «Умный локомотив» как элемент интегрированной системы «Цифровая железная дорога» / К. И. Юренко, П. А. Харченко, И. К.

Юренко // Вестник молодёжной науки России. – 2019. – № 1. – С. 3. – eISSN 2658-7505. – EDN EBFVYI.

161. **Назаров, Д. М.** Интеллектуальные системы: основы теории нечётких множеств / Д. М. Назаров, Л. К. Коньшева. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 186 с. – ISBN 978-5-534-19731-0.

162. **Штовба, С. Д.** Проектирование нечётких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с. – ISBN 5-93517-359-X.

163. **Харченко, П. А.** Совершенствование системы и технологии эксплуатации подвижного состава на основе анализа информации средств регистрации параметров движения, диагностики и мониторинга технического состояния локомотива / П. А. Харченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (97). – С. 201–210. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_201.

164. **Харченко, П. А.** Повышение безопасности, качества и энергоэффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте / П. А. Харченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (65). – С. 125–132. – ISSN 1818-5509.

165. **Ремесник, Е. С.** Методы и модели принятия статистических решений в условиях неопределённости : специальность 08.00.13 «Математические и инструментальные методы экономики» : диссертация на соискание учёной степени кандидата экономических наук / Ремесник Елена Сергеевна, 2020. – 168 с.

166. **Фокин, А. А.** Особенности применения метода Фишберна в задачах распределения лётного ресурса. – Текст электронный / А. А. Фокин. – URL: <http://novainfo.ru/120>, свободный (дата обращения 21.03.2026).

167. **Никольский, Л. Н.** Амортизаторы удара подвижного состава / Л. Н. Никольский, Б. Г. Кеглин. – Москва : Машиностроение, 1986. – 144 с.

168. **ОСТ 24.050.16-85.** Вагоны пассажирские. Методика определения плавности хода : отраслевой стандарт : издание официальное : введён в действие Указанием Министерства тяжёлого и транспортного машиностроения от 27 декабря 1985 г. № ВА-002/14698 : дата введения 1987-01-01 / разработан ОАО «НИИ вагоностроения». – Москва : Стандартиформ, 1987. – 16 с.

169. **ГОСТ Р 51690–2000.** Вагоны пассажирские магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия : государственный стандарт : издание официальное : введён в действие Постановлением Госстандарта России от 22 декабря 2000 г. № 397-ст : дата введения 2002-01-01 / разработан ГУП ВНИИЖТ. – Москва : Госстандарт России, 2002. – 14 с.

170. **Вершинский, С. В.** Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов ; под редакцией С. В. Вершинского. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с.

171. **Савоськин, А. Н.** Динамика тягового подвижного состава: Часть I / А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак, А. П. Васильев ; под редакцией А. Н. Савоськина. – Москва : РУТ (МИИТ), 2017. – 91 с.

172. **Yurenko, K.** Algorithm of random search in the optimal-terminal control of a multi-mode moving object / K. Yurenko, P. Kharchenko, I. Yurenko // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, May 17–21, 2021. – Sochi, 2021. – P. 561–565. – DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446363.

173. **Юренко, К. И.** Исследование эволюционного алгоритма для решения задачи оптимального управления многорежимным подвижным объектом / К. И. Юренко, П. А. Харченко // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2021 : материалы XI Международной научно-технической конференции, пгт. Коктебель, 18–25 сентября 2021 года. – Таганрог : Южный федеральный университет, 2021. – С. 49–57. – EDN AFKYHL.

174. **Харченко, П. А.** Анализ и пути оптимизации характеристик продольных колебаний вагонов в пассажирских поездах, управляемых универсальной системой автоведения / П. А. Харченко, Д. Е. Притыкин // Транспорт: наука, образование, производство : труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 12–15 апреля 2016 года. Т. 2 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2016. – С. 182–186. – ISBN 978-5-88814-446-6. – EDN YKHTMH.

175. **Харченко, П. А.** Методика оценки комфортности перевозки пассажиров железнодорожным транспортом для минимизации рисков связанных с человеческим фактором в процессе ведения поезда / П. А. Харченко //

Транспортное машиностроение. – 2024. – № 4 (28). – С. 45–56. – DOI 10.30987/2782-5957-2024-4-45-56.

176. **Мехедов, М. И.** Оценка влияния выполнения графика движения поездов на качество пассажирских перевозок / М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, Е. А. Мехедова // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 8. – С. 4–8. – ISSN 0044-4448. – EDN HGXCHJ.

177. **Мехедова, Е. А.** Анализ влияния количества остановок пассажирских и пригородных поездов на выполнение графика их движения / Е. А. Мехедова // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 1 (92). – С. 136–155. – DOI 10.30932/1992-3252-2021-19-1-136-155.

178. **Yurenko, K.** Investigation of optimal train movement modes by means of simulation modeling / K. Yurenko, E. Fandeev, P. Kharchenko // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018, Sochi, 09–16 сентября 2018 года. – Sochi, 2018. – Article no. 8501812.

179. **Юренко, К. И.** Исследование энергоэффективных режимов ведения поезда с помощью имитационно-оптимизационной модели / К. И. Юренко, П. А. Харченко, Е. И. Фандеев // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4 (51). – С. 68. – eISSN 2073-8633.

180. **Харченко, П. А.** Разработка компьютерной модели пассажирского поезда на основе данных современных средств регистрации параметров движения / П. А. Харченко, Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2 (62). – С. 38–46. – ISSN 0201-727X. – EDN WFEHOR.

181. **Grebennikov, N.** Development of a computer model of a passenger train using data from devices for train operation parameters registration / N. Grebennikov, P. Kharchenko // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 908–913.

182. ОАО «Тверской вагоностроительный завод» : официальный сайт. – Тверь. – URL: <http://www.tvz.ru> (дата обращения: 02.04.2026).

183. Электровоз ЭП1М (ЭП1П). Руководство по эксплуатации. Книги 1–8. Описание и работа. ИДМБ.661142.004–01РЭ 1–8 : утверждено ОАО ВЭлНИИ 27.12.2007. – Новочеркасск : ВЭлНИИ, 2007. – 1308 с.

184. Применение интерфейса UM MATLAB Import при моделировании электромеханической системы поосного регулирования локомотива / Г. А. Федяева, Г. С. Михальченко, В. В. Кобищанов, Е. А. Комяжко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 4 (40). – С. 134–138. – ISSN 1999-8775. – EDN RSAXXX.

185. **Федяев, В. Н.** Влияние электрической и механической подсистем магистрального тепловоза на реализацию предельных тяговых усилий : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Федяев Владимир Николаевич. – Брянск, 2006. – 140 с.

186. Динамика и энергоэффективность перспективных единиц подвижного состава, оснащаемых вентильно-индукторными электрическими машинами : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Гребенников Николай Вячеславович. – Ростов-на-Дону, 2012. – 149 с.

187. Регистратор параметров движения и автоведения электровозов РПДА-П. Руководство по эксплуатации КНГМ.421429.002РЭ-ЛУ : утверждено Департаментом локомотивного хозяйства 31.07.2002. – Москва, 2001. – 49 с.

188. ООО «АВП Технология» : официальный сайт. – Москва. – URL: <https://www.avpt.ru/> (дата обращения: 16.04.2026).

189. **Гребенников, Н. В.** Разработка компьютерной модели тягового электропривода пассажирского электровоза ЭП1М / Н. В. Гребенников, П. А. Харченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 35-40. – ISSN 1818-5509.

190. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества

протоколом от 6–7 мая 2014 г. № 60. – Новоуральск : ООО «Новоуральская типография», 2017. – 222 с.

191. **Бадамшин, Ф. Р.** Эффективность использования дисковых тормозов на железнодорожном подвижном составе / Ф. Р. Бадамшин, А. А. Воробьев, И. Ю. Новосельский // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава : электронный сборник трудов VIII Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Санкт-Петербург, 29 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 135–143.

192. **Рудов, П. К.** Расчёт тормозов вагонов: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию / П. К. Рудов ; Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 90 с.

193. **ГОСТ 31402–2013.** Цилиндры тормозные железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное : введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1607-ст : дата введения 2014-07-01 / разработан ОАО «НИИ вагоностроения». – Москва : Стандартиформ, 2014. – 16 с.

194. Bremszangeneinheit mit console fuer bremsbelag. C160927. – Текст : электронный. – 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

195. **Гребенников, Н. В.** Определение энергетических параметров при ведении поезда / Н. В. Гребенников, П. А. Харченко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2021 года. Т. 2. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 193–197. – ISBN 978-5-907295-41-4.

196. **Гребенников, Н. В.** Определение коэффициента полезного действия тяговых электрических машин локомотивов в условиях эксплуатации / Н. В. Гребенников // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 4 (16). – С. 31–38. – DOI 10.30987/2782-5957-2023-4-31-38.

197. **Мелюкова, М. А.** Планирование проекта в программном средстве Microsoft Project / М. А. Мелюкова // Лучшая научно-исследовательская работа : сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Санкт-Петербург, 26 января 2020 года. – Санкт-Петербург : ЕНМЦ «Мультидисциплинарные исследования», 2020. – С. 85–88. – ISBN 978-5-6043501-5-7. – EDN XOINEU.

198. **Юренко, К. И.** Человеко-машинное взаимодействие в технологическом процессе ведения поезда / К. И. Юренко, П. А. Харченко // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2018. – № 1-2 (79). – С. 135–146. – ISSN 1816-1928.

199. Методика расчёта индикатора энергоэффективности электровоза : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26 декабря 2014 г. № 519. – Москва : ОАО «РЖД», 2014. – 29 с.

200. Метаэвристический алгоритм оптимизации режимов ведения поезда / К. И. Юренко, В. Г. Щербаков, П. А. Харченко, Е. И. Фандеев // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2019 : материалы IX Международной научно-технической конференции, Геленджик, 06–13 сентября 2019 года. Т. 1. – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2019. – С. 146–153. – EDN GOYXOJ.

201. Проблемно-ориентированный эволюционный алгоритм для оптимизации режимов ведения поезда / А. Н. Савоськин, К. И. Юренко, П. А. Харченко, И. К. Юренко // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 122–132. – ISSN 2220-4245. – EDN WEUBCU.

202. **Yurenko, K. I.** Hybrid Evolutionary Algorithm for Optimizing the Control of a Multi-mode Moving Object / K. I. Yurenko, P. A. Kharchenko, I. K. Yurenko // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 330 LNNS. – P. 619–628. – DOI 10.1007/978-3-030-87178-9_61.

203. **Патент № 2739552 С1 Российская Федерация**, МПК В60L 15/20, В61С 15/08. Устройство для регулирования силы тяги и торможения электроподвижного состава при автоматическом управлении / К. И. Юренко,

И. К. Юренко, В. Г. Щербаков, П. А. Харченко. – № 2019130826 : заявл. 01.10.2019 : опубл. 25.12.2020, Бюл. № 36.

204. **Юренко, К. И.** Методы энергооптимального управления движением поезда / К. И. Юренко, П. А. Харченко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 года. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 301–305. – ISBN 978-5-88814-530-2. – EDN VZDUBF.

205. **Миронова, Н. П.** Теория вероятностей и математическая статистика / Н. П. Миронова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2005. – 212 с.

206. **Алибеков, И. Ю.** Теория вероятностей и математическая статистика в среде MATLAB / И. Ю. Алибеков. – Санкт-Петербург : Лань [и др.], 2019. – 184 с. – ISBN 978-5-8114-3846-4.

207. **Ивин, Е. А.** Математическая статистика / Е. А. Ивин, А. Н. Курбацкий, Д. В. Артамонов. – Вологда : ИСЭРТ РАН, 2017. – 141 с.

208. **Маркович, Н. М.** Трансформированные оценки плотностей распределения с тяжёлыми хвостами и классификация / Н. М. Маркович // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 4. – С. 118–132. – ISSN 0005-2310. – EDN NUEYAD.

209. **Токмачёв, М. С.** Моделирование усечённых распределений / М. С. Токмачёв, П. П. Рязанцев // Вестник Новгородского государственного университета. – 2010. – № 55. – С. 34–36. – ISSN 2078-6255. – EDN NWEERP.

210. **Мизин, В. Е.** Вероятности усечённых законов распределения / В. Е. Мизин, А. А. Ильин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 3. – С. 198–204. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-3-198-204.

211. Поручения по итогам слёта молодежи ОАО «РЖД» в 2012 году : утверждены Поручением президента ОАО «РЖД» В. И. Якунина от 23 ноября 2012 г. № ПП-121. – Москва : ОАО «РЖД», 2012. – 2 с.

212. Поручения о выполнении поручения президента ОАО «РЖД» Якунина В. И. от 23 ноября 2012 г. № ПП-121 в части реализации инновационных проектов молодёжного конкурса «Новое звено» : утверждены Поручением старшего вице-

президента ОАО «РЖД» В. А. Гапановича от 14 декабря 2012 г. № П-ВГ-626. – Москва : ОАО «РЖД», 2012. – 2 с.

213. Единая система обучения работников локомотивных бригад : утверждена распоряжением начальника Северо-Кавказской дирекции тяги от 25 марта 2013 г. № СКДТ-73/р. – Ростов-на-Дону : ОАО «РЖД», 2013. – 2 с.

Приложение А.

Акты внедрения результатов диссертационного исследования (справочное)



**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»
(ОАО «РЖД»)**

**ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
ЛОКОМОТИВНОГО ХОЗЯЙСТВА**

Ольховский пер., д.205, г. Москва, 105066,
тел.: (499) 262-73-62, факс: (499) 262-12-10, e-mail: mail@pkbct.ru, www.pkbct.ru

27.01.2026 г.

№ 25ПКБЦГ-15

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Проектно-
конструкторского бюро
локомотивного хозяйства –
филиала ОАО «РЖД»



Ю.И. Попов

«27» 01 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Харченко Павла Алексеевича на тему:

**«Совершенствование системы и технологии эксплуатации тягового
подвижного состава на основе анализа информации средств регистрации
параметров локомотива»**

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель начальника Дирекции тяги (по развитию) – филиала ОАО «РЖД», к.т.н. Н.Л. Михальчук, заместитель директора Проектно – конструкторского бюро локомотивного хозяйства – филиала ОАО «РЖД» Д.И. Бодриков рассмотрели результаты диссертационного исследования, направленного на совершенствование системы и технологии эксплуатации тягового подвижного состава на основе информации средств регистрации параметров движения и составили настоящий Акт о том, что результаты были использованы для совершенствования методов и моделей технической учебы локомотивных бригад, модернизации тренажерной подготовки, повышения надежности эксплуатации локомотивов, которые были апробированы в Северо-Кавказской дирекции тяги (распоряжения СКДТ от 25.03.2013 г. № 73/р, СКДТ ТЧЭ-1 от 1.10.2012 г. № 730). Результаты экспериментальных исследований были представлены в виде проекта в рамках ежегодного корпоративного конкурса молодежных инициатив «Новое звено», по итогам которого принято положительное решение о внедрении результатов в производственную деятельность ОАО «РЖД» (поручения ОАО «РЖД» от 23.11.2012 г. № ПП-121, от 14.12.2012 г. № П-ВГ-626, протокол от 25.12.2012 г. № 51НГ-453/пр).

Использование результатов, полученных автором в диссертационной работе, также позволило усовершенствовать методы обработки и анализа информации средств регистрации параметров движения и работы локомотива (СРПД), включая параметры движения, режимы работы силового оборудования и энергетические показатели. Сформированы научно обоснованные подходы к комплексной оценке технологии ведения поездов, выявлению нарушений и отклонений в системе эксплуатации. Внедрены элементы персонифицированного и дифференцированного обучения приемам энергоэффективного и безопасного управления локомотивом.

Заместитель начальника Дирекции тяги
(по развитию) – филиала ОАО «РЖД»,
к.т.н., доцент.



 Н.И. Михальчук

Заместитель директора
проектно-конструкторского бюро
локомотивного хозяйства) –
филиала ОАО «РЖД»



Д.И. Бодриков



**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»
(ОАО «РЖД»)**

**ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ
СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ**

Привокзальная пл., д. 1/2, г. Ростов-на-Дону, 344001,
тел.: +7 (863) 259-53-09, e-mail: SekrT@skzd.rzd.ru

11.11.2025 г.

№ 5/Н

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. начальника

Северо-Кавказской дирекции тяги
Дирекции тяги филиала ОАО «РЖД»
В.Б. Мыльников 11.11.2025 2025 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Харченко Павла Алексеевича

на тему: «Совершенствование системы и технологии эксплуатации тягового подвижного состава на основе анализа информации средств регистрации параметров локомотива»

Комиссия в составе:

Председатель – В.Б. Мыльников – исполняющий обязанности начальника Северо-Кавказской дирекции тяги,

члены комиссии – О.В. Павлов – главный инженер Северо-Кавказской дирекции тяги; Г.Ю. Кимеев – заместитель начальника Северо-Кавказской дирекции тяги (по эксплуатации).

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Харченко Павла Алексеевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственной деятельности эксплуатационных локомотивных депо Северо-Кавказской дирекции тяги ОАО «РЖД» при разработке мероприятий направленных на совершенствование технологии эксплуатации тягового подвижного состава в виде системного анализа лучших практик и энергооптимальных моделей вождения поездов с последующей разработкой концепции дифференцированного обучения.

Использование результатов, полученных автором в диссертационной работе, позволило:

1. Уточнить нормы удельного расхода электроэнергии на тягу поездов в пассажирском виде движения на участке Лихая – Ростов-Главный, что обеспечило снижение норматива на 6,42 % за счёт совершенствования системы технического нормирования энергопотребления;
2. Оптимизировать технологию ведения поездов и скорректировать режимные карты ведения поезда, что привело к увеличению удельного показателя возврата рекуперированной электроэнергии в контактную сеть на 13,35 % на участке Лихая – Ростов-Главный.

Главный инженер Северо-Кавказской
дирекции тяги

О.В. Павлов

Заместитель начальника Северо-Кавказской
дирекции тяги (по эксплуатации)

Г.Ю. Кимеев





Ростовский-на-Дону электровозоремонтный завод –
филиал акционерного общества «Желдорреммаш»

344001, Россия, Ростовская область,
г. Ростов-на-Дону, просп. Ставского, д. 1/5
Тел.: +7 (863) 285-48-68
Сайт: zdrm-rerz.ru
E-mail: rerz@ao-zdrm.ru

УТВЕРЖДАЮ:



Директор Ростовского-на-Дону
электровозоремонтного завода –
филиала АО «Желдорреммаш»

С.И. Едрышов

«18» 11 2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Харченко Павла Алексеевича на тему: «Совершенствование системы и технологии эксплуатации тягового подвижного состава на основе анализа информации средств регистрации параметров локомотива», в части разработанной имитационной компьютерной модели локомотива и состава поезда, включающей:

- математическое описание тяговых и тормозных характеристик локомотива;
- моделирование режимов движения на различных профилях пути;
- расчёт продольных сил в автосцепных устройствах;
- имитацию работы основных систем локомотива с учётом данных средств регистрации параметров движения, были адаптированы и внедрены в производственную деятельность Ростовского-на-Дону электровозоремонтного завода.

Модель применима для решения ряда ключевых инженерных задач, в том числе:

- анализа режимов работы систем и узлов локомотива в условиях эксплуатации;
- оценки продольных усилий в автосцепных устройствах при трогании тяжёлых поездов, переходных режимах, торможении и неравномерности тяги по секциям;
- оценки эффективности модернизации отдельных систем и узлов локомотива, включая изменения в алгоритмах управления тяговым приводом;
- формирования рекомендаций по повышению надёжности силового оборудования и автосцепных устройств с учётом реальных условий эксплуатации.

Внедрение результатов диссертационной работы Харченко П.А. обеспечило существенный практический эффект, что позволило:

- повысить качество технической диагностики локомотивов на этапе входного контроля;
- сократить трудоёмкость инженерных расчётов, направленных на определение остаточного ресурса и ускорить принятие технических решений по ремонту и модернизации;
- повысить точность расчётов продольных усилий и динамических нагрузок, выявлять потенциальные перегрузки в автосцепных устройствах локомотива;
- увеличить точность прогноза ресурса узлов и агрегатов локомотива после ремонта.

Главный инженер
Ростовского-на-Дону ЭРЗ –
филиала АО «Желдорреммаш»



А.Г. Студников

Заместитель директора завода
(по технологии)
Ростовского-на-Дону ЭРЗ –
филиала АО «Желдорреммаш»




Г.Н. Воронов

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе

ФГБОУ ВО РГУПС

д.т.н., профессор

А.Н. Гуда

2026 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Харченко Павла Алексеевича

Комиссия в составе декана факультета «Электромеханический» д.т.н., профессора И.А. Яицкова, директора научно-исследовательской части РГУПС к.т.н., В.Н. Носкова, и.о. заведующего кафедры «Тяговый подвижной состав» к.т.н., доц. Т.З. Талахадзе составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Харченко П.А., а именно комплексная имитационная компьютерная модель поезда, обеспечивающая проведение исследований процессов ведения поезда с позиций энергоэффективности, безопасности и продольной динамики движения подвижного состава и методы построения компьютерной модели поезда, внедрены и используются в образовательном процессе.

Указанные компьютерная модель и методы применяются при подготовке обучающихся по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» (всех специализаций), а также аспирантов и научных работников.

Внедрение результатов диссертационной работы способствует повышению качества подготовки выпускников с учетом современных достижений науки и техники.

Председатель комиссии

Декан факультета «Электромеханический»

д.т.н., профессор

/ И.А. Яицков /

Члены комиссии

Директор НИЧ РГУПС

к.т.н.

/ В.Н. Носков /

И.о. заведующего кафедры
«Тяговый подвижной состав»

к.т.н., доцент

/ Т.З. Талахадзе /