

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Омский государственный университет путей сообщения»  
(ОмГУПС (Омиит))

На правах рукописи



АВДИЕНКО Егор Геннадьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
УПРАВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОВОЗОМ ПУТЁМ УЧЁТА  
ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович

Омск 2024

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АВТОВЕДЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ .....	9
1.1.Классификация существующих систем автоведения и систем автоматизированного управления .....	9
1.2.Классификация регистраторов параметров движения (РПДА) участвующих в работе системы автоведения поезда .....	16
1.3.Анализ способов реализации энергоэффективного движения поезда .....	19
1.4.Недостатки существующих подходов в системах автоматизированного управления электроподвижным составом .....	27
1.5.Выводы.....	29
2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА ПО ФАКТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ЭЛЕКТРОВОЗА, ИЗМЕРЕННЫМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ.....	31
2.1. Постановка проблемы математического моделирования управления движением поезда .....	31
2.1.1 Анализ существующих математических моделей управления движением поезда.....	31
2.2. Уточнение математической модели движения поезда.....	44
2.2.1. Исходные данные .....	44
2.2.2. Математическая модель движения поезда .....	50
3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОВОЗОМ С УЧЁТОМ ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА И ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ .....	61
3.1. Анализ существующих алгоритмов управления в системе автоведения. ....	61
3.2. Разработка алгоритма к системе автоматизированного управления магистральным электровозом .....	83
3.2.1. Критерий оптимальности и целевая функция .....	85
3.3. Выводы .....	93

4. АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	95
4.1. Общие сведения об эксперименте .....	95
4.2. Описание использованного оборудования .....	98
4.2.1. Место установки и схема подключения оборудования .....	105
4.2.2. Определяемые параметры .....	109
4.3. Анализ измеренных данных .....	111
4.3.1. Данные с установленного оборудования на подвижном составе и тяговых подстанциях .....	111
4.3.2. Данные с приборов учёта тяговых подстанций Шпагино, Смазнево ..	120
4.4. Способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов .....	122
4.5. Технические требования к системе автоматизированного управления магистральными электровозами .....	130
4.6. Выводы .....	132
Библиографический список .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	160

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время одним из крупнейших потребителей электрической энергии в России является железнодорожный транспорт. В 2023 году расход электроэнергии на тягу поездов ОАО «РЖД» составил 44998,4 млн. кВт·ч или 6% от потребляемой электроэнергии в стране.

Согласно «Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» повышение экономической эффективности перевозочного процесса может быть достигнуто за счет применения современных информационных технологий.

В рамках реализации проекта «Цифровая железная дорога» информационные технологии связаны с реализацией технологий «Промышленный интернет вещей», «Big Data (большие данные)», «Imitation Modeling» (имитационное моделирование), т.е. направлены на создание кибернетических систем на железнодорожном транспорте. В связи с этим требуется значительное развитие систем автоматизации процессов управления электроподвижным составом, в частности систем автоведения, в области информационного взаимодействия с внешней средой и реализации управляющих воздействий по фактическим данным в реальном времени.

Переход от реализации заложенных программ автоведения поездов к динамически изменяющимся системам управления режимами электровозов, учитывающим статусы других единиц электроподвижного состава, команды диспетчерских центров, фактические параметры энергетической и путевой инфраструктуры, позволит повысить энергоэффективность и пропускную способность электрифицированных железных дорог. Существующие методы определения сопротивления движению поезда по эмпирическим зависимостям не позволяют в полной мере учесть фактические условия эксплуатации электроподвижного состава [56-64].

Таким образом, совершенствование системы автоматизации процессов управления магистральным электровозом с учетом фактических параметров движения поезда, получаемых с бортовых измерительных и внешних систем в режиме реального времени, является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы диссертации.** Основные положения тяговых расчётов, построения энергооптимального графика движения

поездов в достаточной степени проработаны в научной среде и реализуются на практике. Современные исследователи занимаются совершенствованием и разработкой новых подходов в данном направлении на основе применения методов искусственного интеллекта. Значительный вклад в вопросы энергооптимального вождения поездов, тяговых расчётов и повышения энергоэффективности тяги поездов внесли такие учёные как Баранов Л. А. [12-15], Головичер Я. М. [17], Ерофеев Е. В. [19], Евстафьев А. М. [21, 22], Розенфельд В. Е. [75], Лазарян В. А. [38], Лисенков В. М. [40], Лисицын А. Л. [41], Мельниченко О. В. [44, 45], Мугинштейн Л. А. [50-55], Осипов С. И. [65], Плакс А. В. [69], Пясик М. С. [74], Савоськин А. Н. [77], Пудовиков О. Е. [14, 21, 22, 71-73], Юренко К. И. [77, 92, 95-98], Фандеев Е. И. [92, 95-98], Черемисин В. Т. [94] и др.

Среди зарубежных учёных вопросами энергоэффективности на железнодорожном транспорте занимались P. S. Zuriaga [108], Y. Ding [103], Liu, B. Mao [103], A. R. Albrecht [100], P.G. Howlett [100, 106], P. J. Pudney [100, 106], G. M. Sheepmaker [106, 109], X. Vu [100], R. M. P. Goverde, [106, 107, 109] L. G. Kroon [109], T. Tang [112], и др.

Вопросами уточнения фактических параметров движения электроподвижного состава занимались как отечественные учёные, так и зарубежные, среди которых Климович А. В. [34], Худорожко М. В. [93], Поляков Б. О. [70], Елисеев И. А. [18], Alessio Trivella [110], Pengling Wang [110].

Определение фактического сопротивления движению поезда указанными авторами выполнялось не во всех режимах на основе уточнения силы тяги по данным бортовых измерительных систем, определения снижения скорости движения во время выбега, путем уточнения внешних факторов с помощью искусственных нейронных сетей и дополнительных датчиков. При этом методы динамической идентификации фактических параметров поезда, в частности, сопротивление движению, на основе разностных уравнений, получаемых непрерывно с заданной дискретностью по результатам измерений бортовыми системами электроподвижного состава, проработаны недостаточно и имеют значительный потенциал развития.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности эксплуатации магистральных электровозов за счет совершенствования автоматизированного управления движением поезда по фактическим данным в реальном времени.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить анализ современного состояния информационно-управляющих систем автоведения магистральных грузовых электровозов.
2. Разработать метод определения сопротивления движению поезда по фактическим данным электровоза, измеренным в реальном времени.
3. Разработать алгоритм системы автоматизированного управления магистральным электровозом с учётом фактических параметров движения поезда и внешних факторов.
4. Провести апробацию предлагаемых решений на электрифицированном участке железной дороги.
5. Разработать технические требования к системе автоматизированного управления магистральным электровозом.

**Объекты исследования** – магистральные грузовые электровозы.

**Область исследования** – системы автоматизации процессов управления электроподвижным составом, улучшение эксплуатационных показателей электроподвижного состава.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложен метод определения сопротивления движению поезда по фактическим данным электровоза, измеренным в реальном времени с заданной дискретностью, отличающийся тем, что основан на разностных уравнениях движения поезда, составленных для множества моментов времени.
2. Предложен алгоритм системы автоматизированного управления магистральным электровозом в режиме автоведения, отличающийся тем, что учитывает фактические параметры движения поезда (сопротивление движению) и внешние факторы (ограничения энергетической инфраструктуры, статусы электроподвижного состава на межподстанционной зоне).

3. Обоснован способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени.

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

1. Доказаны положения метода определения сопротивления движению поезда по фактическим данным электровоза, вносящие вклад в расширение представлений о мгновенных тяговых расчетах.

2. Уточнена математическая модель движения поезда с учетом фактических параметров сопротивления и прочих факторов.

3. Разработан алгоритм системы автоматизированного управления магистральным электровозом в режиме автоведения, реализация которого повысит эффективность эксплуатации электроподвижного состава в части снижения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов.

4. Представлены рекомендации и предложения по применению в системе автоматизированного управления грузовых поездов методов обработки данных, получаемых непрерывно с заданной дискретностью по результатам измерений бортовыми системами электроподвижного состава, способа согласования режимов работы магистральных электровозов между собой.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач теоретические и экспериментальные исследования проведены на основе положений теории тяги, математического моделирования, в том числе с использованием языка программирования Python и программы MathCAD 14. Экспериментальные исследования проводились на электрифицированном участке железной дороги Шпагино-Смазнево ЗСЖД.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод определения сопротивления движению поезда по фактическим данным электровоза, измеренным в реальном времени.

2. Алгоритм автоматизированного управления магистральным электровозом в режиме автоведения, учитывающий фактические параметры движения поезда (сопротивление движению) и внешние факторы (ограничения энергетической инфраструктуры, статусы электроподвижного состава на межподстанционной зоне).

3. Способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов между собой для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени.

**Степень достоверности научных положений и результатов** диссертационной работы подтверждается при помощи апробации предлагаемых решений на электрифицированном участке железной дороги. Результаты расчетов математических и имитационных моделей движения поезда сопоставимы с реальными данными регистраторов параметров движения грузовых электровозов и натурных экспериментов.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV международной научно-практической конференции «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (Омск, 2020); седьмой всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (Омск, 2022); научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2022); Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов, 2021); 12-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2022); 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и системная модернизация страны»; II Международной научной конференции аспирантов и молодых учёных «Железная дорога: путь в будущее» (Москва, 2024).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них три статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, одна статья в зарубежном издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus, два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, один патент на изобретение.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы из 114 наименований и содержит 160 страниц текста, включая 67 рисунков и 16 таблиц.

# **1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АВТОВЕДЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

## **1.1. Классификация существующих систем автоведения и систем автоматизированного управления**

На железнодорожном транспорте России активно внедряются современные технологии для повышения эффективности и безопасности перевозок. Важным элементом этого процесса является установка систем автоведения на отечественный электроподвижной состав. В большинстве случаев используются решения компании «АВП Технология», такие как унифицированная система автоматизированного ведения поездов (УСАВП), универсальная система автоведения электровозов пассажирского движения (УСАВПП), система универсальная автоведения электровозов грузового движения (УСАВПГ), а также интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределёнными по длине локомотивами (ИСАВП-РТ) [3, 5, 8, 24-26]. В дальнейшем эти системы были модернизированы посредством интеграции в кабину управления таких программно-аппаратных комплексов, как система информирования машиниста (СИМ) и система информирования машиниста автономная с функцией электронного маршрута машиниста (АСИМ-ЭММ).

Выполним более подробный анализ данных систем с указанием некоторых недостатков и недоработок.

1) Система УСАВП [91] предназначена для обеспечения автоматического управления режимами тяги и торможения электропоездов постоянного и переменного тока. Она позволяет с высокой точностью выполнять график движения поездов при оптимальном расходе электроэнергии, облегчая работу машинистов. Система автоведения пригородных электропоездов, основанная на микропроцессорных технологиях, представляет собой программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий автоматизированное управление электроподвижным составом. Основные преимущества применения системы автоведения включают:

- снижение расхода электроэнергии на 2-10% в зависимости от условий эксплуатации;

- повышение уровня безопасности движения;

- информационную поддержку машинистов в ночное и утреннее время и в условиях плохой видимости (снег, дождь, туман).

2) Система УСАВП-П [90]. Данная система была разработана специально для пассажирских электровозов определённых серий, таких как ЧС2, ЧС2К, ЧС2Т, ЧС4Т, ЧС6, ЧС7, ЧС8, ЧС200, ЭП1М, ЭП2К, ЭП20, КЗ4АТ. УСАВП-П обеспечивает автоматизированное управление электровозами в режиме оптимального расхода электроэнергии при точном соблюдении времени хода, задаваемого графиком движения или другими нормативными документами. Использование УСАВП-П способствует повышению безопасности движения и облегчению труда машиниста. Основное отличие этой системы от других заключается в том, что УСАВП-П не только поддерживает выбранную системой или заданную машинистом скорость, но и постоянно рассчитывает оптимальное значение скорости. Это позволяет минимизировать расход электроэнергии и соблюдать расписание движения поезда с точностью до  $\pm 1$  минуты.

3) Система УСАВП-Г и УСАВП-ГПТ [81] предназначены для автоматизированного управления электровозами типа ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80С, ВЛ85, 2ЭС5К (3ЭС5К), КЗ8А, 2ЭС5, 2ЭС6, 2ЭС4К (3ЭС4К). Эта система была модернизирована с добавлением функции системы информирования машиниста, что позволило расширить функциональные возможности системы автоведения..

4) Система ИСАВП-РТ [76, 79] предназначена для автоматизированного и синхронного управления грузовыми электровозами при ведении соединённых поездов весом до 12 тыс. тонн и выше. Отличительной особенностью ИСАВП-РТ является её способность управлять блоком хвостового вагона (БХВ) и системой управления тормозами поезда СУТП или РУТП с поездами весом до 9000 тонн. Реализация данной системы позволила повысить пропускную способность участков на 5% и увеличить маршрутную скорость до 1000 км/сутки. Для более детального понимания эффективности внедрения системы УСАВП, её необходимо рассматривать в комплексе с системой информирования машиниста (СИМ) и её более совершенной версией АСИМ-ЭММ. Эта система предназначена для

получения по беспроводным каналам связи данных о занятости пути, возможностях инфраструктуры, данных о машинисте и других параметров от системы взаимодействия с локомотивом посредством радиосвязи. Система СИМ обеспечивает отображение всей поступающей информации в графической, текстовой и речевой форме для локомотивной бригады. Эти факторы позволяют повысить безопасность движения за счёт автоматизации процессов получения и передачи данных по беспроводным каналам связи.

5) Система автоведения электровозов УСАВП [91] предназначена для автоматизированного управления поездом с целью точного соблюдения времени хода, задаваемого графиком или другим нормативным документом, на основе выбора энергетически рационального режима движения. В процессе движения УСАВП реализует изменение режимов ведения поезда (тяга, торможение, выбег), а также при помощи звуковых сигналов оповещает об предупреждающих сигналах. Для изменения режимов ведения поезда, система УСАВП (тяга, выбег, реостатное электрическое и пневматическое торможение) контролирует основные средства, такие как:

- высоковольтные датчики для измерения напряжения и тяговых токов;
- энкодеры (датчики угловых перемещений для определения скорости поезда и пройденного расстояния);
- датчики давления для определения текущего давления в уравнительном резервуаре (УР), тормозной магистрали (ТМ) и тормозных цилиндрах (ТЦ);
- вентили (электропневматические), клапаны для автоматизированного управления тормозами поезда;
- регистратор параметров движения поезда (РПДА) для фиксации основных параметров движения поезда на съёмный картридж;

Устройство УСАВП интегрируется в бортовую систему поезда. В течении всей поездки, в бортовую систему поезда поступают различные данные непосредственно с бортовых систем, а также учитываются данные от РПДА. На основе этих данных и рассчитываются энергооптимальные режимы ведения поезда для конкретной поездки. Помимо этого, данная система автоведения

В устройство УСАВП заложено несколько режимов работы: «Советчик». «Автоведение», «Кнопочный контроллер.

При включении режима «Автоведение», систем полностью управляет поездом в автоматическом режиме и выполняет следующие функции:

- построение энергооптимального графика движения поезда;
- изменение режимов ведения поезда (управления тягой, электрическим торможением, пневматическими тормозами (согласно существующим инструкциям по управлению тормозами грузового поезда)).

При включении режима «Советчик», машинист управляет поездом вручную, но дополнительно система выдаёт текущие необходимые параметры движения поезда на блок индикации (монитор):

- координата поезда;
- фактическая скорость движения поезда, а также рекомендуемая на данном участке;
- ограничение скорости движения;
- сигналы светофоров;
- профиль пути.

При включении режима «Кнопочный контроллер», управление тягой и торможением поезда реализуется за счёт применения команд через клавиатуру системы. Далее система выполняет заданные машинистом команды. На экране машиниста отображаются следующие параметры:

- координата поезда;
- текущее значение скорости;
- ток и напряжение двигателя в режиме тяги;
- давление в УР, ТМ и ТЦ.

После ввода в эксплуатацию систему УСАВП в неё загружается основная информация об участке движения – существующие ограничения скорости, профиль пути, расположение путевых объектов, расположение светофором и расписание движения. Данную информация невозможно удалить без переустановки системы.

В системе выделено часть памяти на которую записывается основная информация о составе поезда (номер, количество вагонов, вес, временные ограничения на участке). Данную информацию после каждой поездки можно изменять машинист.

Система автоведения на основе данных с бортовых систем и участка обслуживания реализует:

- определение оптимального времени движения поезда на основе заданного графика движения;
- измерение фактической скорости движения поезда;
- определение необходимого времени движения до станции;
- определение тяговой позиции электровоза в зависимости от скорости движения поезда;
- определение фактического местоположения состава и координат пройденного пути.

б) Система автоведения МСУ 007 [80] создана для изменения режимов работы основных устройств(оборудования) поезда. Помимо данной задачи, система автоведения выступает в роли устройства диагностики поезда. Система выполняет следующие функции:

- бесконтактное управление электрической схемой электровоза во всех режимах его работы: "АВТОВЕДЕНИЕ", "СТОП", "ТЯГА", "ВЫБЕГ", "ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ" и другие;
- управление вспомогательным оборудованием и электрическими машинами электровоза;
- обеспечение автоматических защит оборудования (тягового и вспомогательного) электровоза при аварийных или нештатных ситуациях с выдачей соответствующих аварийных сообщений;
- регулирование электрической передачи локомотива в режимах тяги и электрического торможения;
- автоматическое ведение состава с соблюдением графика движения и управление контакторами энергоснабжения поезда;
- диагностика оборудования электровоза и обмен информацией между устройствами в составе МСУ;
- регистрация параметров работы оборудования на Flash Disk с возможностью записи данных на внешнее запоминающее устройство и выводом на дисплейное устройство;
- реализация беспроводной передачи данных о фактическом состоянии электровоза (контроль состояния силового и вспомогательного оборудования) через GPRS модем.

Также в данную систему автоведения МСУ 007 интегрируются другие функциональные блоки для реализации:

- бортовой диагностики локомотива;

- удалённого контроля о состоянии локомотива;
- непрерывного измерения данных о работе локомотива;
- автоматического ведения поезда.

7) Система управления поездом МСУЭ [49] устанавливается на электровозах переменного тока ВЛ80Р с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) для автоматизированного управления тяговым приводом поезда. Благодаря данному устройству реализуется автоматический и ручной режим управления тягой поезда, а также рекуперативным торможением с поддержанием в процессе движения необходимого значения тока и скорости состава. Отличительной особенностью является то, что данная система выступает как диагностическая, для проверки состояния оборудования локомотива и через бортовой компьютер отображает текущее состояние локомотива. Разработка МСУЭ была проведена совместно ОмГУПС и ДЦВ Красноярской железной дороги при участии инженеров из различных университетов (КриЖТ, МИИТ) под руководством А.В. Раздобарова и В.В. Семченко по заказу ОАО «РЖД» в период с 2006 по 2008 годы. В 2011 году система МСУЭ была модернизирована на 110 секциях электровозов ВЛ80Р. МСУЭ представляет собой аппаратно-программный комплекс, реализующий функции, ранее осуществляемые блоками управления типа БУВИП-133 и БАУ-002.

8) Система МСУД-Н создана компанией ЗАО «ЛЭС» [48]. Данная система управления была интегрированы в следующие серии современных электровозов: Э5К, 2ЭС5, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К, ЭП1М и ЭП1П. Система МСУД-Н позволяет управлять тяговым приводом и основными электрическими аппаратами грузовых поездов, а также и пассажирских. Данный программно-аппаратный комплекс выполняет следующие функции:

- автоматическое изменение режимов ведения поезда в процессе движения;
- диагностика состояния основного оборудования поезда;
- информирование машиниста о текущем состоянии оборудования локомотива;
- сохранение информации о поездке на съёмный накопитель данных.

Кроме того, данная система способна определять координату в системах ГЛОНАСС/GPS и осуществлять беспроводную передачу данных по каналу GSM. В сочетании с подсистемой УСАВП или УСАВП-Г, МСУД-Н

позволяет реализовывать управление локомотивом в режиме автоведения пассажирских или грузовых поездов. Она обеспечивает управление тяговым электроприводом и оборудованием в режимах: «ручное регулирование», «авторегулирование», «автоведение», контроль, диагностика и управление аппаратами и оборудованием, а также взаимодействие с комплексной подсистемой безопасности для реализации системы автоведения.

9) Программно-аппаратный комплекс МСУД-Н-001 разработан компанией АО «ПКП ИРИС». Данная система управляет тяговым электроприводом, а также электрическими аппаратами поезда. МСУД-Н-001 устанавливается на пассажирских электровозах серии ЭП1, а также на грузовых электровозах серии ВЛ80ТК. Программно-аппаратный комплекс реализует следующий функционал:

- поддержания определённого значения тока якоря тяговых электродвигателей;
- поддержание необходимой скорости движения состава;
- разгон до заданной скорости;
- использование рекуперативного торможения до определённой скорости;
- осуществлять полную остановку поезда с учётом тормозных характеристик;
- осуществляет защиту колёсных пар от возникновения юза и буксования;
- постоянная автоматическая диагностика основного оборудования электровоза;

10) Устройство МСУД-001 [47] от компании ЗАО «ЛЭС» используется в грузовых электровозах постоянного тока. Система МСУД-001 реализует:

- сбор основной информации с бортовых датчиков электровоза о текущем состоянии локомотива, его оборудования и различных систем с последующей обработкой для предотвращения ранних неисправностей, а также сохранением на съёмном носителе;
- изменение электрических параметров поезда за счёт подачи сигналов на преобразователь собственных нужд (ПСН) и регулятор напряжения;
- выдача звуковых и визуальных сигналов машинисту на дисплей монитора о текущем состоянии локомотива;

- обеспечение бесперебойного функционирования электрического оборудования электровоза за счёт автоматизированного управления реле и контакторами цепей двигателей (ТЭД), а также цепей собственных нужд.

11) Программно-аппаратный комплекс МСУД-015 устанавливается на поездах переменного тока серии 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К. Система позволяет осуществлять управление тяговым электроприводом, а также основными устройствами электровоза. Помимо этого, реализует поосное регулирование ТЭД.

12) Система управления МПСУиД [46] создана для непрерывного контроля и диагностирования основных систем поездов (электровозов, электропоездов и тепловозов), а также позволяет управлять ТЭД. В процессе поездки данная система производит сбор большого количества переменных о состоянии локомотива с последующей обработкой и выдачей управляющих воздействий на электрические аппараты поезда, а также силовые преобразователи. Система управления выполняет ряд ключевых функций:

- защищает от возможного возникновения юза и боксования поезда;
- диагностика основных элементов электровоза;
- подбор оптимальных режимов работы поездного оборудования в процессе движения;
- в автоматическом режиме управляет электрическим оборудованием и вспомогательными машинами;
- взаимное координирование секций поезда;
- расчёт оптимального графика движения поезда;
- сбор основных параметров движения;
- автоматическое управление тормозами поезда;
- аудио-визуальное информирование машиниста в процессе движения.

## **1.2. Классификация регистраторов параметров движения (РПДА) участвующих в работе системы автоведения поезда**

Рассмотрим текущие системы регистраторов параметров движения (РПД). Последние года повсеместно установлены системы регистрации параметров движения от компании «АВП Технология».

Системы РПДА-Г устанавливаются на электровозах 2ЭС6, РПДА-ГПТ, РПДА-П применяются на пассажирских электровозах постоянного и переменного тока различных серий: ЧС2т, ЧС4т, ЭП1, ЭП1М, ЭП20 и т.д.

Данные системы регистрируют главные параметры движения поезда на съемный блок памяти. Сохранение данных позволяет их использовать для оценки технического состояния электровоза, а также анализировать эффективность записанных поездок. В дальнейшем, на основе полученных данных появляется возможность корректировать графики движения поездов и проводить внеурочный ремонт, если это потребуется.

Регистраторы параметров движения (РПДА) проводят измерение и сохранение в памяти следующих параметров:

- ток якоря ТЭД;
- ток возбуждения ТЭД;
- расход электрической энергии на тягу поезда;
- фактическую скорость движения;
- координату поезда и пройденное расстояние;
- напряжение контактной сети;
- параметры тормозной системы.

Измерения параметров движения поезда производятся с учетом местоположения и времени, что позволяет анализировать потребление электроэнергии под различные задачи.

Запись и хранение данных осуществляются на переносной картридж, который может непрерывно записывать информацию на протяжении нескольких дней. Одной из особенностей регистраторов параметров движения поезда (РПДА) является возможность подключения дополнительных датчиков для измерения параметров движения поезда.

В дальнейшем, данные, которые регистрируются РПДА поступают в установленные системы автоведения на электровозах (УСАВП-Г, УСАВП-ГПТ) для обеспечения энергооптимального графика движения поезда. Нормальное функционирование систем автоведения невозможно без применения регистраторов параметров движения поезда.

Регистратор параметров движения РПДА в сочетании с системами автоведения электровоза формирует электронный маршрут машиниста. В комплексе с АРМ-теплотехника он создаёт уникальную автоматизированную систему учета электроэнергии в депо, не имеющую аналогов. Для чтения данных с регистраторов параметров движения РПДА и последующего анализа используется специализированная программа АРМ РПДА, которая должна устанавливаться на местные компьютеры в депо.

К достоинствам регистраторов параметров движения РПДА можно отнести следующее:

- уменьшение расходов локомотивного депо на расшифровку скоростемерных лент
- повышение безопасности движения поезда (в случае внештатных ситуаций);
- повышение надёжности поездов, за счёт своевременного выявления неисправностей с последующим техническим обслуживанием поезда;
- повышение точности учёта расхода электроэнергии на тягу поезда;
- повышение качества диагностики поезда;



Рисунок 1.1 – Взаимозависимая связь РПДА с другими системами

Технические характеристики систем, применяемых на разных электровозах, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики РПДА-Г-ГПТ

Параметры системы	РПДА-Г	РПДА-ГПТ
Питающее напряжение	46..50В	
Потребляемая мощность устройства	80 Вт	100 Вт
Масса устройства	70 кг	80 кг
Диапазоны регистрации		
Напряжение на токоприемнике	0..450В	0..35000В

Окончание таблицы 1.1

Ток якоря и возбуждения тяговых двигателей	–+750А	0..1500А
Общий ток потребления поезда	0..300А	
Количество дискретных сигналов	20	
Количество аналоговых сигналов	20	
Потребляемая и отдаваемая поездом электроэнергия	0..1 000 000 кВт·ч	
Давление в тормозной магистрали и тормозных цилиндрах	1..10 МПа	
Память картриджа	64 Мб	
Погрешность при измерениях		
Ток в первичной обмотке тягового трансформатора	–	1%
Напряжение на токоприемнике поезда	0,5%	1%
Ток якоря и возбуждения тяговых двигателей	0,5%	1%
Общий ток потребления поезда	0,5%	–
Потребляемая и отдаваемая поездом электроэнергия	1%	–
Давление в тормозной магистрали и тормозных цилиндрах	1%	
Напряжение на тяговых <u>электродвигателях</u>	–	0,5%
Активная мощность по каждой секции	–	1%
Реактивная мощность по каждой секции	–	1%

### 1.3. Анализ способов реализации энергоэффективного движения поезда

В настоящее время актуальна тема по реализации энергоэффективного движения электроподвижного состава. Множество научных школ, учёных, как зарубежных, так и в нашей стране занимается данными вопросами.

Рассмотрим различные способы и подходы по реализации энергоэффективного движения.

В работах авторов [95] для решения задач оптимального вождения поездов создан алгоритм на основе стохастической оптимизации, по-другому ещё называют метаэвристический алгоритм. Результаты расчёта по разработанной имитационной модели поезда показали хорошую сходимость с реальными поездками и позволяют снизить потребление электрической энергии на тягу электровозов. Также данными авторами предложен классификация методов расчёта энергооптимальных режимов движения поезда (рис.1.2).

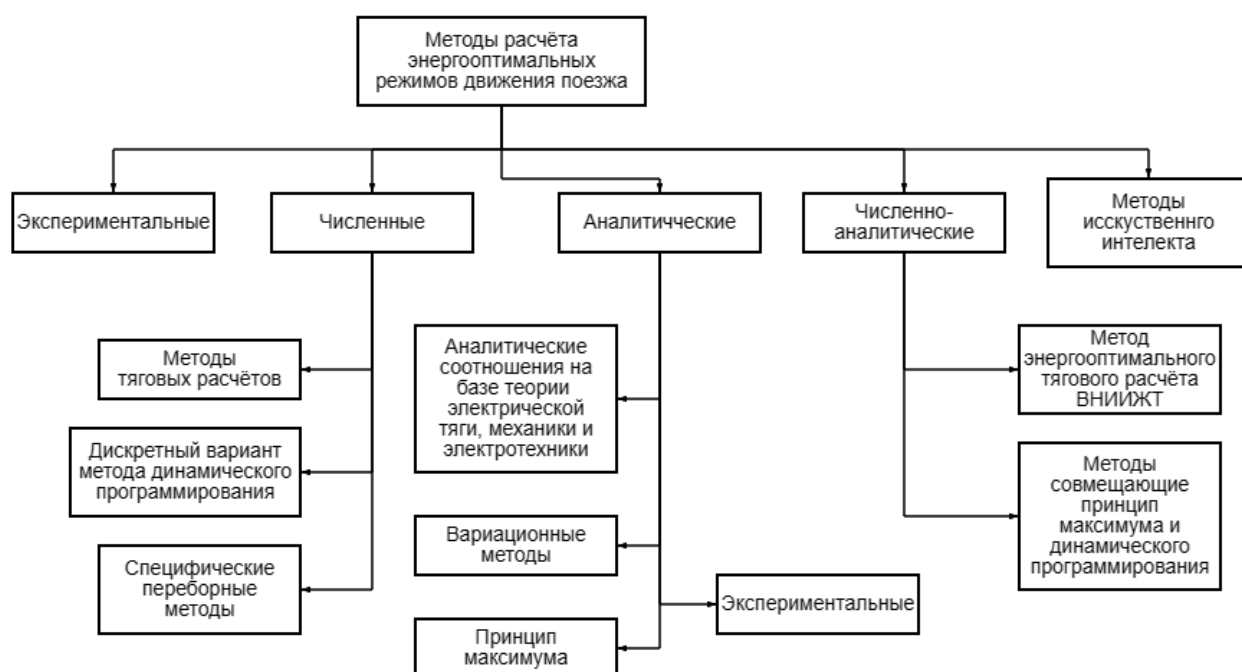


Рисунок 1.2 – Классификация методов расчёта энергооптимальных режимов движения поезда [95]

Из рисунка видно, что существует различное множество подходов для реализации энергооптимальных режимов движения поезда.

В работах авторов из Российского университета транспорта и Южно-Российского государственного политехнического университета [12] используется следующий подход. Для оптимизации управления движением электроподвижного состава предлагается преобразовать исходную задачу оптимизации в задачу структурно-параметрического синтеза, опирающуюся на множество базисных решений. Данная задача формулируется как задача нелинейного программирования и решается с использованием

метаэвристических методов поисковой оптимизации. Для повышения вычислительной эффективности поиска по предложенному методу реализован многоостровной вычислительный алгоритм с суперпопуляцией. Результаты расчётов показали хорошую сходимость с экспериментальными данными, что позволяет в дальнейшем использовать представленный алгоритм в практических расчётах по оптимизации режимов ведения поезда.

В других работах [95-97] была разработана имитационная модель движения поезда в среде *Matlab/Simulink*. Для проведения расчётов применялся метод Рунге-Кутты 4-го порядка, реализованный также в системе *Matlab*. Выполненные расчёт позволяют получить кривую скорости движения, время хода движения и расход электроэнергии. Время расчёта по представленной модели занимает несколько секунд, и кривая скорости движения имеет сходимость с практическими данными. Авторами также разработана схожая имитационная модель движения подвижного состава и её программно-алгоритмическая реализация, которая отражает все функциональные взаимосвязи системы автоматического ведения поезда. Для нахождения энергооптимальной траектории движения поезда используется алгоритм, в котором заложены методы нелинейного программирования (Нелдера-Мида) или случайного поиска. Также в данной работе представлен вариантный тяговый расчёт – направленный на поиск различных вариантов траекторий движений. При выполнении тягового расчёта с использованием представленной модели делается на уточняющие независимые данные добавляемые в неё, которые не использовались прежде (отклонение времени хода, точность выполнения скоростных ограничений), это те параметры, которые определяют характер движения поезда. Проведённые вычислительные эксперименты показали, что уточняющие значения параметров, добавляемые в модель, позволяют снизить электроэнергию на тягу поездов при построении энергооптимальной траектории движения. В среднем на участке длиной 30 км экономия электроэнергии может достигать до 3%.

В работе [93] сформулирована формальная постановка задачи оптимального управления динамической переключательной системой. В данной задаче обозначили параметры, которые определяют оптимальную траекторию движения и оптимальное управление. Для решения поставленной задачи разработан оригинальный гибридный поисковой алгоритм на базе

мультиагентной парадигмы. Его достоинством выделяют в возможности использования более сложных операторов улучшения исходных решений. Результаты использования данного алгоритма показали, что это позволяет снизить расход электроэнергии на тягу поездов в среднем на 2%.

В научных работах Л.А. Мугинштейна [50-55] рассматривается современный принцип Максимума Понтрягина. Основной смысл принципа заключается в том, что существующие задачи оптимального управления поездом, в которых уже заложены ограничения на фазовые переменные, решаются при помощи подхода (метода) последовательных приближений. В данном подходе, расчёт задач выполняется поэтапно и на каждом этапе находится решение задачи с наименьшим расходом электроэнергии на тягу поезда, при условии, что на каждом последующем этапе значение с расходом электроэнергии должно быть меньше. Параллельно определяются соответствующие режимы ведения поезда для достижения этих значений. В конечном итоге, энергооптимальная траектория движения представляется как сочетание различных режимов ведения поезда (тяги, выбег, электрическое и пневматическое торможение). Автор в работе выделяет всего пять возможных режимов движения:

- режима разгона поезда (при максимальном значении силы тяги);
- режим движения поезда с постоянной скоростью;
- режим выбега;
- режим выбега с подтормаживанием поезда на уклоне, для поддержания максимально разрешённой скорости на участке;
- режим максимального торможения.

Группа зарубежных учёных из Вьетнама [112] в рамках решения задач по поиску оптимального графика движения поездов метрополитена применяют принцип максимума Понтрягина для решения уравнения движения поезда. Моделирование движения поездов в метро на реальном участке протяжённостью 12,6 км показало эффективность за счёт снижения расхода электроэнергии на 10,8%.

В работе [96] предложено использование генетического алгоритма Грея для оптимизации кривой скорости движения. Исследования показали, что применение данного подхода позволяет снизить удельных расход электроэнергии на тягу электроподвижного состава на 7,6%, а также незначительно повысить среднюю скорость движения поезда.

В работе [103] проведены исследования по повышению пропускной способности на участке движения и минимизации удельного расхода электроэнергии. Авторами представлен алгоритм многоцелевой оптимизации, на языке оригинала он звучит как *Fuzzy multi-objective optimization algorithm*). Результаты показали применимость представленных моделей и позволило повысить пропускную способность в среднем на 15% на участке.

Учёными из Пекина [101] представлен метод многоцелевой оптимизации для системы автоведения поезда на основе модели клеточных автоматов. Разработанная модель показала высокую эффективность с реальной поездкой и позволило снизить расход электроэнергии на тягу поезда на участке на 18%, но время движения несущественно увеличилось на 5-7% за поездку. Исходя из условий, снижение времени движения осталось в допустимых рамках исполнения графика движения поезда.

Исследователями из Китайского университета горного дела и технологий [112] для снижения времени хода движения поезда в метро, повышения пропускной способности была использована многоцелевая оптимизационная модель. Для решений данной модели был применён улучшенный адаптивный генетический алгоритм. Его достоинством в данной работе называют быстрый поиск необходимого решения в области множеств других решений. Результатом работы стало снижение времени хода движение поезда на 22,5% на экспериментальном участке повышенной загруженности.

Учёными из Австралии [100] для повышения энергоэффективности вождения поездов определены критически точки в которых необходимо переключать режим ведения поезда на определённой скорости движения. Данные переключения позволят оптимизировать кривую скорости движения на основе принципа максимума Понтрягина. В последующих работах [100] они продолжили развивать основную идею по оптимальному переключению режимов движения с режима тяги на режим выбега и наоборот с режима максимального ускорения в режим тяги. В новых исследованиях переключение режимов связано непосредственно с ограничением потребления электроэнергии на определённом временном интервале. Каждый режим выбирается из-за соответствующего ограничения по потреблению. Ключевой особенностью работы является оптимальный

подбор моментов для перехода в режим выбега, что позволяет добиться значительного снижения расхода электроэнергии на определённых участках пути. В других работах [106, 107] вышеупомянутых авторов был улучшен метод переключения режимов движения по критическим точкам. Особенностью данного метода является применимость его к участкам пути со сложным профилем (большие уклоны и обилие протяжённых кривых). За счёт внедрения новых условий (альтернативные условия) при расчёте оптимального переключения режимов и использования метода возмущений позволило однозначно определить параметры движения для каждого режима.

Группой исследователей из Нидерландов и Австралии [105] представлены модернизированные системы ММТС (*minimum time train control*) и *EETC (energy-efficient train timetabling)*. В новых версиях систем для реализации энергоэффективного вождения поездов применяется динамическое программирование на основе прямого и косвенного метода

Швейцарские учёные [110] предложили альтернативный метод повышения энергоэффективного управления подвижным составом. Их подход заключается в добавлении аэродинамического сопротивления в уравнение движения состава. Кроме того, они разработали программное обеспечение, которое позволяет анализировать и обрабатывать данные в реальном времени с учётом силы ветра на каждом участке пути.

Учёными из Китая [102] был предложен метод повторного использования электроэнергии (после рекуперации). Электропоезд начинает процесс рекуперации в том случае, когда на границе этой зоны находится другой подвижной состав, который сможет потребить эту электроэнергию. В этом случае алгоритм увязывается с графиком движения, чтобы согласовать ближайшие поезда.

Ещё одной группой исследователей из Пекина [113] был разработан новый алгоритм для повышения энергоэффективного управления подвижным составом на основе динамической модели переключения поездных режимов.

Этот алгоритм был интегрирован в существующую систему управления с прогнозированием модели (MPC). Его работа основана на взаимодействии трёх циклов переключения режимов. Первый цикл отвечает за контроль оптимального времени переключения поездного режима до момента остановки поезда на следующей станции. Второй цикл

контролирует выполнение постоянного обновления ограничивающих факторов, чтобы их максимальное значение не превышало определённого порога. Под ограничивающими факторами подразумевается ограничение нулевой скорости, когда поезд прибывает на станцию и ограничение расстояние пробега в заключительный интервал времени. Третий цикл используется для контроля постоянного обновления времени переключения режима до тех пор, пока градиент функции потерь не уменьшится до величины предварительно установленного порога.

В итоге, с увеличением времени в пути увеличивается доля использования режима выбега за счёт оптимального времени переключения поездных режимов, что приводит к снижению потребления электроэнергии подвижным составом.

Систематизация направлений развития зарубежных учёных по вопросам энергоэффективного управления представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ направлений развития по оптимизации энергоэффективного управления подвижным составом за рубежом

Автор	Минимизация параметра	Используемый алгоритм	Тип подвижного состава
T. Albrecht and Oettich (2002)	Время хода, расход электроэнергии	Динамическое программирование	Пассажирские поезда
Ghoseiri et al. (2004)	Время хода, расход электроэнергии	Нелинейное программирование	Пассажирские поезда
Ding et al. (2011)	Расход электроэнергии	Генетический алгоритм	Поезда в метро
Sicre et al. (2010)	Расход электроэнергии	Имитационное моделирование	Высокоскоростной наземный транспорт
Cucala et al. (2012)	Задержки от остановок, расход электроэнергии	Генетический алгоритм, фазо-линейное программирование	Высокоскоростной наземный транспорт
L. Yang et al. (2012)	Время хода, расход электроэнергии	Генетический алгоритм	Грузовые поезда

## Окончание таблицы 1.2

X. Yang et al. (2014)	Время ожидания пассажиров, рекуперация электроэнергии	Генетический алгоритм	Пассажирские поезда
Y. Wang et al. (2014)	Расход электроэнергии	Смешанно-целочисленное линейное программирование, псевдоспектральный метод	Поезда в метро
P. Wang and Goverde (2016)	Задержки от остановок, расход электроэнергии	Псевдоспектральный метод	Высокоскоростной наземный транспорт
Peñ̃a-Alcaraz et al. (2012)	Расход электроэнергии, рекуперация электроэнергии	Нелинейное программирование, имитационные модели	Поезда метро
X. Yang et al. (2015)	Расход электроэнергии	Генетический алгоритм	Грузовое движение
Li and Lo (2014a)	Расход электроэнергии	Генетический алгоритм	Пассажирские поезда
Li and Lo (2014)	Расход электроэнергии	Явные формулы на основе упрощающих предположениях	Поезда метро
Su et al. (2013)	Расход электроэнергии	Явные формулы на основе упрощающих предположениях	Поезда в метро
Li et al. (2013)	Время хода, расход электроэнергии	<i>Fuzzy</i> мультиобъектное нелинейное программирование	Грузовые поезда

Множество учёных различными способами [98, 99, 102], подходами, алгоритмами, занимаются снижением расхода электроэнергии на тягу поездов. Они применяют, как и классические известные алгоритмы динамического программирования, так и генетические Fuzzy-линейные алгоритмы программирования. Таким образом, в настоящее время, наиболее

совершенно развиты аналитические и численно-аналитические методы энергооптимального расчёта.

#### **1.4. Недостатки существующих подходов в системах автоматизированного управления электроподвижным составом**

В системы автоведения УСАВПГ, ИСАВП-РТ [81, 79], а именно в программную их часть закладываются алгоритмы и подходы оптимального управления учёными из АО «ВНИИЖТ». В основу подходов заложены алгоритмы решения задач оптимального управления на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина. Разработанный алгоритм позволяют учитывать ограничения различных видов, в том числе и на фазовые, что и требуется при расчёте оптимальных траекторий движения электроподвижного состава.

Для численной реализации основного алгоритма оптимизации в работах рассматривается интегрирование уравнение движения поезда в следующем виде:

$$v \frac{dv}{ds} = K[F_D - W_o(v) - W_D(s) - B_T], \quad (1.1)$$

где  $v$  – скорость, км/ч;

$s$  – путь, км;

$K$  – размерный коэффициент, обратно пропорциональный массе поезда с учётом инерции вращающихся колёс;

$F_D, B_T$  – сила тяги и торможения, кН;

$W_o, W_D$  – основное сопротивление движению поезда и дополнительное от приведённого уклона, кН.

В то время как, сопротивление движения в выражение (1) определяется по эмпирической формуле (2), которое приближенно отражает зависимость основного сопротивления движения от скорости:

$$W_o = A + Bv + Cv^2, \quad (1.2)$$

где  $v$  – скорость движения поезда, км/ч;

$A, B, C$  – поправочные коэффициенты (каждому типу подвижного состава соответствуют разные значения);

Из представленного выше описания подхода оптимального управления заложенного в существующие системы автоведения следует, что значения сопротивления движению также рассчитываются по эмпирической формуле,

которое лишь приближенно отражает зависимость основного сопротивления движения от скорости. Остальные коэффициенты (переводные, инерции вращающихся частей) также берутся согласно ПТР 2016.

В настоящее время различными авторами выполняются работы по уточнению и определению параметров движения поезда на основе фактических данных.

В трудах Климовича А.В. [34], Ерошенко А.В. [20], Худорожко М.В. [93], Гриневич В.П. [66] аналитически уточняется сопротивление движение поезда в режиме выбега исходя из закона сохранения энергии, на основании которого составляется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} A_{T1} = \int_0^{l_1} (a_w + b_w v + c_w v^2) m ds + A_{y1} + A_{кр1} + \frac{mv_{кон1}^2 - mv_{нач1}^2}{2} \\ A_{T2} = \int_0^{l_2} (a_w + b_w v + c_w v^2) m ds + A_{y2} + A_{кр2} + \frac{mv_{кон2}^2 - mv_{нач2}^2}{2} \\ A_{T3} = \int_0^{l_3} (a_w + b_w v + c_w v^2) m ds + A_{y3} + A_{кр3} + \frac{mv_{кон3}^2 - mv_{нач3}^2}{2} \end{cases} \quad (1.3)$$

где  $v$  – скорость, км/ч;

$A_{T1}$ ,  $A_{T2}$ ,  $A_{T3}$  – совершённая работа сил тяги электровоза (в режиме выбега эти работы равны нулю), кДж;

$A_{y1}$ ,  $A_{y2}$ ,  $A_{y3}$ ,  $A_{кр1}$ ,  $A_{кр2}$ ,  $A_{кр3}$ , – совершённая работа сил от уклона и кривых, кДж;

$m$  – масса состава.

На рисунке 1.3 представлена методика определения основного удельного сопротивления движению поезда согласно [87].

В работах Полякова Б.О. [70], Alessio Trivella [110], Pengling Wang [110]. определяется аэродинамическое сопротивление грузовых поездов.

В диссертационной работе Елисеева И.А. [18] предлагается методика определения сил тяги электрического торможения по данным регистраторов движения поезда.



Рисунок 1.3 – Методика определения основного удельного сопротивления движению поезда согласно [93]

Проведённый анализ показал, что существуют и применяются различные подходы по уточнению фактических параметров движения поезда. Уточнение параметров движения поезда (силы тяги, сопротивления движению поезда, аэродинамического сопротивления) позволяет задавать управляющие воздействия с повышенной точностью.

### 1.5. Выводы

1) Представлена классификация основных методов определения энергооптимальных режимов движения поезда согласно К.И. Юренко. Наиболее распространёнными являются аналитические и численно-аналитические методы решения оптимизационных задач, включая принцип максимума Понтрягина, динамического программирования Беллмана, Fuzzy – алгоритмы, генетические и прочие эволюционные алгоритмы. С учетом развития высокопроизводительных вычислительных систем выбор алгоритма

решения оптимизационных задач по поиску минимума функции в настоящее время не имеет решающего значения, т.к. расчеты могут быть выполнены встроенными функциями языка программирования с достаточной точностью. Проведенный анализ показал, что существующие системы автоведения не учитывают ограничения энергетической инфраструктуры, статусы электроподвижного состава с точки зрения согласования режимов между собой по условию энергоэффективности на межподстанционной зоне в реальном времени.

2) Рассмотрены современные подходы к определению сопротивления движению поезда в режиме автоведения. Общепринятым является расчет сопротивления движению поезда по эмпирическим формулам согласно правилам тяговых расчетов, при этом не в полной мере учитываются реальные влияющие факторы (скорость движения поезда, масса состава, действующее значение силы тяги, коэффициент инерции вращающихся частей). В ряде работ аналитически уточняется сопротивление движению поезда в режиме выбега исходя из закона сохранения энергии. В работах Полякова Б.О., Alessio Trivella, Pengling Wang уточняется аэродинамическое сопротивление поездов. В трудах Елисеева И.А. уточняется метод определения силы тяги и электрического торможения с расчетом сопротивления движению поезда из условия баланса сил при постоянной скорости движения по данным регистраторов параметров движения электровоза.

К недостаткам представленных подходов к определению сопротивления движения поезда следует отнести невозможность использования во всех режимах работы электровоза, косвенные методы учета влияющих факторов, необходимость накопления значительного объема обучающих выборок, наличие дополнительных датчиков.

## 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА ПО ФАКТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ЭЛЕКТРОВОЗА, ИЗМЕРЕННЫМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

### 2.1. Постановка проблемы математического моделирования управления движением поезда

#### 2.1.1 Анализ существующих математических моделей управления движением поезда

Для проведения основных исследований по оценке и расчёту основных параметров подвижного состава требуется моделировать движение поезда по участку. Математическую модель движения поезда по участку можно представить как систему дифференциальных уравнений исходя из второго закона Ньютона [69]:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dS} &= \frac{1}{V} \cdot \frac{g}{Q+P} \cdot F; \\ \frac{dt}{dS} &= \frac{1}{V}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $Q, P$  – массы локомотива и состава, тонн;

$F$  – равнодействующая сила, кН.

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$V$  – текущая скорость, км/ч;

$S$  – пройденное расстояние, км.

Равнодействующая сила представляется в виде:

$$F = F_{\kappa} - W - B, \quad (2.2)$$

где  $F$  – сила тяги электровоза, кН;

$W$  – сила сопротивления движению, кН;

$B$  – тормозная сила электровоза, кН.

Для разработки математической модели движения поезда применяются различные способы. В научных трудах чаще всего встречается модель движения поезда, в которой на поезд действуют следующие силы: сила тяги, сила электрического и механического торможения, а также силы сопротивления движению [75]. Также в работах поезд считается материальной точкой, на которую действуют представленные силы. Основная форма записи уравнения движения поезда представляется в следующем виде:

$$m \frac{dV}{dt} = F - W - B, \quad (2.3)$$

где  $m$  – масса состава ;

$V$  – скорость движения.

В работе [23] поезд уже рассматривается не как материальная точка на участке, а поезд определяется как цепочку тел связанных между собой. При данном варианте модели требуется учитываться как вагоны взаимодействуют между собой, а также как они взаимодействуют с локомотивом. Это необходимо для оценки продольных сил, возникающих в течении всей поездки.

Также в работе рассматривается модель, в которой поезд рассматривается также как цепочка из определённого количества тел. В данном случае учитываются упруго-диссипативные силы межвагонных соединений. Данную модель ещё называю «дискретной многомассовой моделью». Уравнение представленной модели имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{S_{i+1} - S_i + F_i}{m_i}, \quad i = 1, n; \quad S_{n+1} = 0 \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, \quad i = 2, n, \\ \dot{x}_i = v_i = -q_i, \end{cases} \quad (2.4)$$

где  $v_i$  – скорость  $i$ -го экипажа, км/ч;

$S_i$  – продольная сила в  $i$ -м межвагонном соединении, кН;

$F_i$  – равнодействующая сил, действующих на  $i$ -й локомотив (вагон), кН;

$m_i$  – масса  $i$ -го локомотива, т;

$q_i$  – деформация  $i$ -го межвагонного соединения;

$x_i$  – координата  $i$ -го локомотива (вагон), км.

К достоинствам дискретной многомассовой модели можно отнести точность оценки протекающих динамических процессов, происходящих в поезде. Данный фактор является актуальным для грузового подвижного состава, в процессе движения которого возникают продольные силы. Можно дополнить, представленная модель успешно используется в системах автоведения УСАВП грузовых поездов от компании «АВП Технология». Рассмотрим схему работы системы автоведения (рисунок 2.1.).

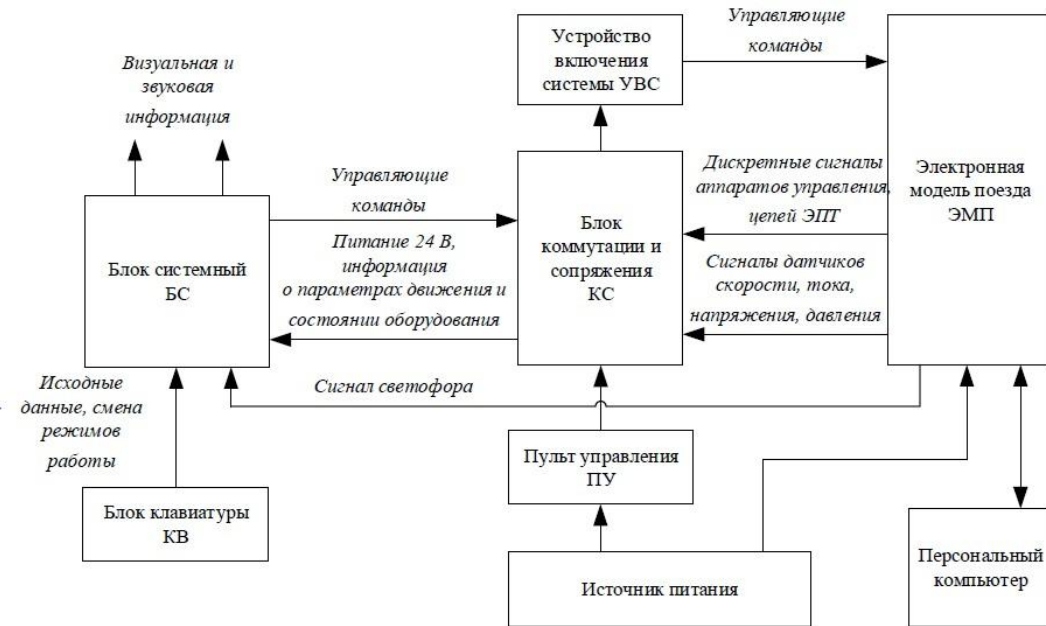


Рисунок 2.1 – Структурная схема взаимодействия математической модели поезда с системой автоведения [19]

В трудах [71, 72] представлена модель движения поезда в которой подробно расписываются величины деформации межвагонного соединения и силы действующие в этих связях:

$$q_i = x_i - x_{i-1} - \frac{l_i + l_{i-1}}{2}, \quad (2.5)$$

где  $x_i$  – координата (вдоль траектории) положение центра масс  $i$ -го экипажа;  
 $l_i$  – длина экипажа.

При этом силы, действующие в данных связях рассчитываются по следующим формулам:

$$S_i = S_{\phi i}(q_{\phi i}) \operatorname{sign} q_i; \quad (2.6)$$

$$q_{\phi i} = \begin{cases} |q_i|, & \text{если } q_i < 0; \\ 0, & \text{если } 0 \leq q_i \leq \delta_{0i}; \\ q_i - \delta_{0i}, & \text{если } q_i > \delta_{0i}, \end{cases} \quad (2.7)$$

где  $S_i$  – сила, деформирующая соединение, кН;

$S_{\phi i}$  – сила сжатия поглощающих аппаратов и деформаций кузовов, кН;

$q_i$  – относительное перемещение центров масс, м;

$\delta_{0i}$  – зазор в соединении, м.

Для реализации представленной математической модели движения поезда предъявляется ряд требований непосредственно к процессу управления движением. Среди этих требований можно выделить:

- ошибка, возникающая в установившемся режиме;
- перерегулирование силы тяги;
- время регулирования;
- вид переходного процесса;
- колебательность системы;
- действующие продольные динамические силы в электроподвижном составе;
- действующие усталостные повреждения деталей автосцепок.

Для повышения точности и качества управления скоростью движения электроподвижного состава необходимо использование адаптивного фильтра. Фильтр устанавливается в систему нижнего уровня, а данные получаются непосредственно с выхода системы уровня выше. Использование данного фильтра позволяет реализовать переходную функцию апериодического звена. Также ещё одной особенностью данного фильтра является то, что он способен реализовать двухступенчатое увеличение значений силы тяги, а также электрического и пневматического торможения. Форма записи адаптивного фильтра имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 f_1'(t) &= p_a \cdot a_3 \cdot \left[ 1 - \frac{T_1}{T_{12}} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2}{T_{12}} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right]; \\
 f_1''(t') &= (1 - p_a) \cdot a_3 \cdot \left[ 1 - \frac{T_1}{T_{12}} \exp\left(-\frac{t'}{T_1}\right) + \frac{T_2}{T_{12}} \exp\left(-\frac{t'}{T_2}\right) \right]; \\
 f_1(t) &= f_1'(t) + f_1''(t'); \\
 t' &= t - t_{TP},
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

где  $f_1'(t)$  - первая ступень увеличения силы тяги или торможения;

$f_1''(t')$  - вторая ступень увеличения силы тяги или торможения;

$T_1, T_2, T_{12}$  – постоянные времени звена;

$p_a$  – доля максимального ускорения;

$t_{TP}$  – время задержки между применением первой и второй ступеней силы тяги, торможения.

В уравнении (2.9) время задержки между переключением ступеней силы тяги и торможения, можно определить по следующей формуле:

$$t_{mp} = \sqrt{\frac{(2 \cdot (N-1) \cdot \delta_{0i})}{a_3}} + \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^N \left( \left( \frac{F_{\max II}}{N-1} \right) / k_{Hi} \right) \cdot i}{a_3}}, \quad (2.9)$$

где  $N$  – количество вагонов в поезде;

$\delta_{0i}$  – значения средней величины зазора в автосцепке;

$k_{Hi}$  – средняя жесткость ветви нагружения характеристики поглощающего аппарата автосцепки;

$F_{\max}$  – максимальное значение силы тяги поезда;

Преимуществом вышеописанной математической модели является использование дискретной модели поезда для каждого отдельного вагона. Эта модель учитывает основные особенности динамических процессов в грузовом подвижном составе, включая характеристики каждого вагона и межвагонных соединений. Также представлена адаптивная система управления, которая достигает высокого качества управления по изменению скорости движения грузового поезда.

В работах [97, 98] представлена альтернативная математическая модель движения поезда. Данная модель основывается непосредственно на основных моментах механики, электротехники, также на теории электрической тяги. Уравнение движение поезда для описанной модели в трудах [97,98] имеет следующий вид:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi}{v} \left[ \frac{F}{(m_t + \sum m_c) \cdot g} - w - w_a + \frac{l_t - s_0}{l_t} \cdot i_1 + \frac{1}{l_t} \sum_{j=2}^{m-1} s_j \cdot i_j + \frac{1}{l_t} (s_0 - \sum_{j=2}^{m-1} s_j) \cdot i_m \right], \quad (2.10)$$

где  $s$  – координата пути, км;

$v$  – скорость движения, км/ч;

$\xi$  – ускорение поезда при действии ускоряющей силы;

$F_s$  – сила тяги или торможения в зависимости от режима движения (тяга  $F_s=F$ , выбег  $F_s=0$ , пневматическое торможение  $F_s=B$ , рекуперативное торможение  $F_s=R$ ), кН;

$m_t, m_s$  – масса электровоза и состава, т;

$g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>;

$w, w_a$  – основное удельное и дополнительное сопротивление движению

$l_x$  – длина состава, км;

$s_0$  – расстояние от принятой за начало отсчёта точки сопряжения 1 и 2-ого элементов профиля пути, на котором находится часть поезда;

$i_j$  – уклон  $j$ -го части профиля, на котором находится поезд;

$s_j$  – длина  $j$ -го элемента профиля пути.

Сила тяги и рекуперативного торможения электровоза определяется по представленным формулам:

$$F = kC\Phi I \eta_t; \quad (2.11)$$

$$R = kC\Phi I_r \eta_r, \quad (2.12)$$

где  $C$  – конструкционная постоянная;

$k$  – поправочный коэффициент;

$\Phi$  – магнитный поток;

$I, I_r$  – ток двигателя в режиме тяги и режиме рекуперации;

$\eta_t, \eta_r$  – к.п.д. тягового электродвигателя в режимах тяги и рекуперации, отнесённый к ободом колёсных.

В работе [96] рассматривается модель движения поезда, которая способна учитывать сопротивление движение поезда, вызванное низкой температурой на основе внедрённых поправочных коэффициентов. Также появляется возможность учитывать сопротивление, возникающее от ветрового потока. Определение данных параметров записываются в виде:

$$w_w = A_g \left( \frac{c_0}{2} \right) / \left( \frac{\rho \cdot \Omega}{Q_0} \right) \cdot v^2; \quad (2.13)$$

$$A_g = v_w / v (\sin a - 2 \cos a) - v_w^2 / v^2 (\sin a - 2 \cos a) \cos a,$$

где  $A_g$  – коэффициент, учитывающий скорость ветра;

$c_0$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$\rho$  – плотность воздуха;

$\Omega, Q_0$  – плотность поперечного сечения вагона и его вес.

В модели также уточняется реализация процесс буксования поезда. Описание данных процессов показаны в следующем выражении:

$$\begin{aligned} F - F_{sl} &= m_1 \cdot \frac{dv}{dt}; \\ F_{sl} &= 1000 \cdot m_1 \cdot g \cdot \Psi_k; \\ \Psi_k &= q_0 + \frac{q_1}{(q_2 + q_3 \cdot v)}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где  $F_{sl}$  – сила сцепления колеса и рельса;

$\psi_k$  – коэффициент сцепления колеса с рельсом;

$q_0$ - $q_4$  – числовые коэффициенты.

Схожестью данной работы с другими исследованиями, является то, что авторы, также учитывают воздействие продольно-динамических сил в поезда. Для этого требуется решение дифференциальных уравнений движения поезда.

В другой работе [95] показан программный комплекс, который имеет следующую структуру, представленную на рисунке 2.2.

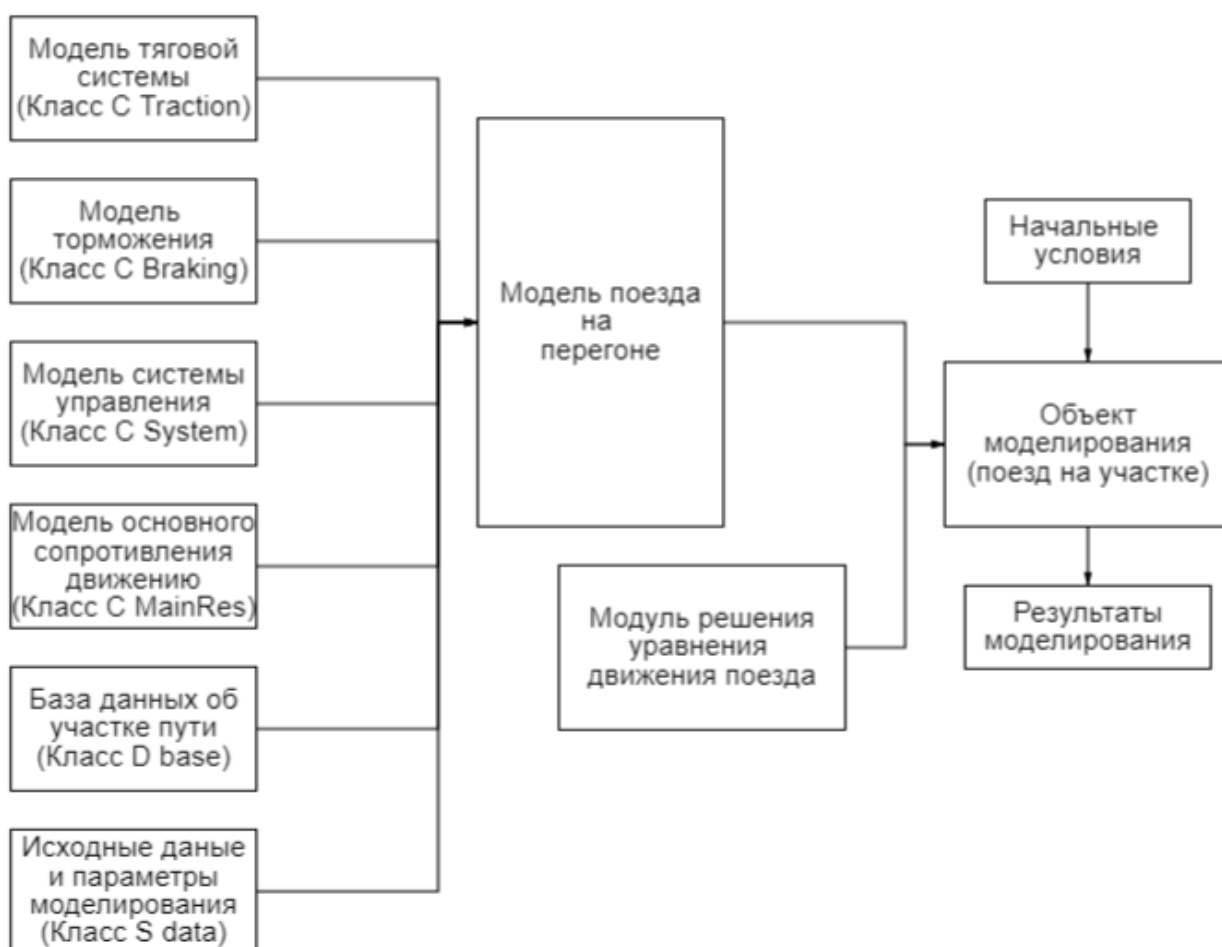


Рисунок 2.2 - Структура программного комплекса по [90]

Блок «Модель поезда на перегоне» позволяет объединить все перечисленные модели в единую структуру, на этой основе создаётся программный объект и затем при помощи созданного модуля решения уравнений происходит процесс моделирования. В основу модели заложены уравнения движения поезда с учётом:

- специфики грузовых локомотивов, оборудованных тяговым приводом, который непрерывно регулирует силу тяги и электрическое торможение, а также системой автоведения поезда;

- представления грузового поезда как гибкой нерастяжимой нити;
- влияния пониженной температуры и ветра.

Для реализации этой модели показана следующая форма записи:

$$\left\{ \begin{array}{l} (1 + \gamma) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} = F(O_F(F_{\max}(v), V(s, t), a_o)) - \\ - (w' \cdot m_l + w'' \cdot m_c \cdot n) \cdot (k_v - 1) \cdot (k_t - 1) - \\ - \left( \sum_{j=1}^{1+n} L_j(s) \cdot i_j(s) \right) \\ - \left( \frac{\quad}{L} \right) \cdot m - \\ - R(O_R(R_{\max}(v), V(s, t), a_D)) - B(P_{\infty}(O_B(V(s, t), a_T))), \end{array} \right. \quad (2.15)$$

где  $v, s, t$  – скорость, пройденный путь и время соответственно км/ч, км, ч;

$\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся частей;

$m_c, m_l$  – масса состава и локомотива, т;

$n$  – число вагонов, шт;

$w', w''$  – удельное основное и дополнительное сопротивление движению поезда, н/кН;

$k_v, k_t$  – коэффициенты, которые учитываются наличие ветра и пониженную температуру окружающей среды;

$L$  – длина поезда, км;

$L_j$  – участок пути, занимаемый поездом, км;

$i_j$  – удельное сопротивление от кривых пути и уклонов, н/кН;

$F, R, B$  – силы тяги, электродинамического и пневматического торможения, кН;

$Q_F, Q_R, Q_B$  – операторы которые моделируют работы системы управления;

$F_{\max}, R_{\max}$  – максимально возможные силы тяги и электрического торможения при текущей скорости движения, определяемые тяговыми и тормозными характеристиками тягового привода, кН;

$P_{\infty}$  – давление в тормозных цилиндрах, Па;

$V$  – скорость, заданная системой автоведения в настоящий момент времени, км/ч;

$a_o$  – ускорение, заданное в режиме тяги, м/с<sup>2</sup>;

$a_D, a_T$  – замедления в режиме электрического и пневматического торможения, м/с<sup>2</sup>.

Анализируя различия между математическими моделями в трудах [95, 96], можно сделать вывод, что во втором случае предполагается использование одной классической формулы уравнения движения с учётом особенностей описанных выше. Это позволяет ускорить процесс моделирования для получения первых результатов. В первом варианте, каждая формула из модели рассматривается и рассчитывается отдельно, что повышает трудоёмкость расчёта, но в тоже время повышает точность полученных результатов за счёт хорошей сходимости с реальными данными. Но в обоих случаях, представленные подходы позволяют решать задачу об оптимизации режимов движения грузового поезда для заранее заданных исходных данных об участке пути.

В трудах [42] представлена математическая модель движения поезда с использованием динамического программирования и нейросетевых методов. За основу берётся классическое уравнение движения поезда с некоторыми уточнёнными параметрами. Уравнение имеет следующий вид:

$$a = \xi(f_k(v) - w_o(v) - i_s) \quad (2.16)$$

где  $f_k(v)$  – удельная сила тяги, н/кН;

$w_o(v)$  – основное сопротивление движению магистрального электровоза с учётом действия факторов окружающей среды без тока, н/кН;

$i_s$  – эквивалентный уклон пути, н/кН.

Эквивалентный уклон определяется по следующей формуле:

$$i_s = \sum_{n=1}^h \frac{m_n}{P + Q} i_n, \quad (2.17)$$

где  $m_n$  – вес поезда, приходящийся на  $n$ -й элемент профиля, т;

$h$  – количество элементов профиля, на которых находится поезд, шт.;

$i_n$  – величина уклона элемента профиля, на котором находится  $n$ -я часть поезда, ‰.

В работе отмечается, что реальные параметры профиля пути могут отличаться от указанных, что приводит к ошибке координаты. Для их уточнения предлагается использовать данные, полученные от акселерометра и датчика скорости. Уточнённые параметры пути позволяют скорректировать

модель и повысить точность управления движением поезда. Ускорение акселерометра можно найти по следующей формуле:

$$a = a_g + a_x, \quad (2.18)$$

где  $a_x$  – ускорение по оси  $x$ ,  $\text{м/с}^2$ ;

$a_g$  – проекция ускорения свободного падения на ось  $x$ ,  $\text{м/с}^2$ ;

После достижения уточненных значений ускорения (с минимальной погрешностью) вдоль продольной оси поезда, возможно определить текущий уклон пути с использованием следующего уравнения:

$$i = \arcsin \frac{a_g}{g}. \quad (2.19)$$

Чтобы поддерживать необходимую точность расчётов и исключить влияние колебаний галопирования на финальный результат, требуется осреднение значений акселерометра. Это осреднение должно осуществляться за период времени, не менее одного полного цикла колебаний. А если необходимо измерение тысячных долей уклона, то акселерометр должен иметь следующую чувствительность  $1\text{В}$  на  $1 \text{ м/с}^2$  и низкий уровень шумов. Для повышения точности расчётов требуется также уточнение токовых характеристик электровоза.

В работе упоминается ещё одна важная составляющая, для реализации управления в реальном времени бортовая электронно-вычислительная система должна обладать необходимой мощностью и скоростью считывания данных в реальном времени. Ведь регистрация параметров движения в пути следования и служебной информации требуется для первичной обработки с целью поиска ошибок.

Систематизируем описанные в математические модели выше. Сравнительный анализ подходов с созданию математической модели движения поезда представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сравнение математических моделей

№ п/п	Работа автора	Краткое описание, форма записи	Достоинства	Недостатки
1	[69]	$m \frac{dV}{dt} = F - W - B$ <p>В основном, при осуществлении</p>	1) Простой расчёт.	1) В классической формулировке

Продолжение таблицы 2.1

№ п/п	Работа автора	Краткое описание, форма записи	Достоинства	Недостатки
1	[69]	<p>тяговых расчётов применяется применяется модель, где поезд представляют в виде материальной точки на который действуют некоторые силы.</p>	<p>1) Простой расчёт. 2) Скорость выполнения расчёта.</p>	<p>не учитывается воздействие от температуры окружающей среды и ветра. 2) Не учитываются процессы буксования. 3) Не учитываются динамические процессы, происходящие в поезде. 4) Расчёты выполняются на усреднённых известных коэффициентах.</p>
2	[19]	$\begin{cases} \dot{v} = \frac{S_{i+1} - S_i + F_i}{m_i}, & i = 1, n; S_{n+1} = 0 \\ \dot{q}_i = v_{i-1} - v_i, & i = 2, n; \\ \dot{x}_1 = v_1 = -q_1 \end{cases}$ <p>Поезд в данной модели представляется как цепочка из <math>n</math>-тел, которые соединены между собой упруго-диссипативными межвагонными соединениями.</p>	<p>1) Точность оценки динамических процессов, происходящих в поезде 2) Подробно расписываются величины деформации межвагонного</p>	<p>1) Не учитывается воздействие от температуры окружающей среды и ветра 2) Не учитываются процессы буксования 3) Не</p>

Продолжение таблицы 2.1

№ п/п	Работа автора	Краткое описание, форма записи	Достоинства	Недостатки
2			соединения и силы действующие в этих связях учитываются	учитываются динамические процессы, происходящие в поезде 4) Расчёты выполняются на усреднённых известных коэффициентах 5) Сложность определения заданных исходных данных
3	[91, 92]	$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi}{v} \left[ \frac{F}{(m_l + \sum m_c) \cdot g} - w - w_a + \frac{l_t - s_0}{l_t} \cdot i_1 + \frac{1}{l_t} \sum_{j=2}^{m-1} s_j \cdot i_j + \frac{1}{l_t} (s_0 - \sum_{j=2}^{m-1} s_j) \cdot i_m \right]$ <p>В основе предложенной модели стоят базовые положения теории электрической тяги, механики и электротехники.</p>	1) Учитывается полное электрическое сопротивление контактной сети и рельсов между электровозом и подстанциями 2) Учитывается дополнительное сопротивление движению при воздействии низких температур окружающей среды с поправочными коэффициентам и.	1) В сравнении с другими моделями более длительное время выполнения расчёта модели 2) Расчёты выполняются на усреднённых известных коэффициентах 3) Сложность определения заданных исходных данных

Продолжение таблицы 2.1

№ п/п	Работа автора	Краткое описание, форма записи	Достоинства	Недостатки
3			от ветра 3) Учитывается в модели процессы буксовании 4) Высокая точность полученных результатов	
4	[90]	$(1 + \gamma) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} =$ $F(O_F(F_{\max}(v), V(s, t), a_o)) -$ $-(w' \cdot m_n + w'' \cdot m_c \cdot n) \cdot$ $\cdot (k_s - 1) \cdot (k_t - 1) -$ $\left( \sum_{j=1}^{1+n} L_j(s) \cdot i_j(s) \right) \cdot m -$ $-R(O_R(R_{\max}(v), V(s, t), a_D)) -$ $B(P_{oo}(O_B(V(s, t), a_T))),$ <p>В основу модели заложены уравнения движения поезда с учётом специфики грузовых локомотивов, оборудованных тяговым приводом, который непрерывно регулирует силу тяги и электрическое торможение, а также системой автоведения поезда. Также поезд представляется как гибкая нерастяжимая нить.</p>	1) Учитывается дополнительное сопротивление движению при воздействии низких температур окружающей среды с поправочными коэффициентам и и дополнительное сопротивление от ветра 2) Высокая скорость выполнения расчёта	1) Расчёты выполняются на усреднённых известных коэффициентах 2) Сложность определения заданных исходных данных
5	[38]	$a = \xi(f_k(v) - w_0(v) - i_s)$ <p>Математическая модель движения поезда с использованием динамического программирования и нейросетевых методов. За основу берётся классическое уравнение</p>	1) Используются уточнённые данные пути (эквивалентное значение уклона),	1) При недостаточной мощности бортового оборудования, расчёты могут

## Окончание таблицы 2.1

№ п/п	Работа автора	Краткое описание, форма записи	Достоинства	Недостатки
5		движения поезда с некоторыми уточнёнными параметрами	скорости, ускорения, тока электровоза	занять длительное время

**2.2. Уточнение математической модели движения поезда****2.2.1. Исходные данные**

Объектом исследования является непосредственно грузовой электровоз. Для дальнейших расчётов выбран электровоз переменного тока ВЛ80С. Основные нормативные характеристики электровоза сведены в следующую таблицу 2.2. Тяговая характеристика электровоза представлена на рисунке 2.3.

Таблица 2.2 – Основные нормативные характеристики электровоза ВЛ80С, приведённые в ПТР 2016.

Наименование параметра	Серия локомотива
	ВЛ80С
Длина локомотива $l_{л}$ , м	32,8
Расчётная масса локомотива $P$ , т	192
Конструкционная скорость $V_{к}$ , км/ч	110
Расчётно-минимальная скорость $V_{р}$ , км/ч	43,5
Сила тяги при трогании с места $F_{к(р)}$ , кН	502,3
Сила тяги при расчётно-минимальной скорости $F_{к(тр)}$ , кН	678,1
Тип тягового электродвигателя	НБ-418К
Допускаемый перегрев обмоток тяговых электродвигателей, град	120
Число автотормозных осей	8
Расчётная сила нажатия тормозных колодок на ось, кН	140

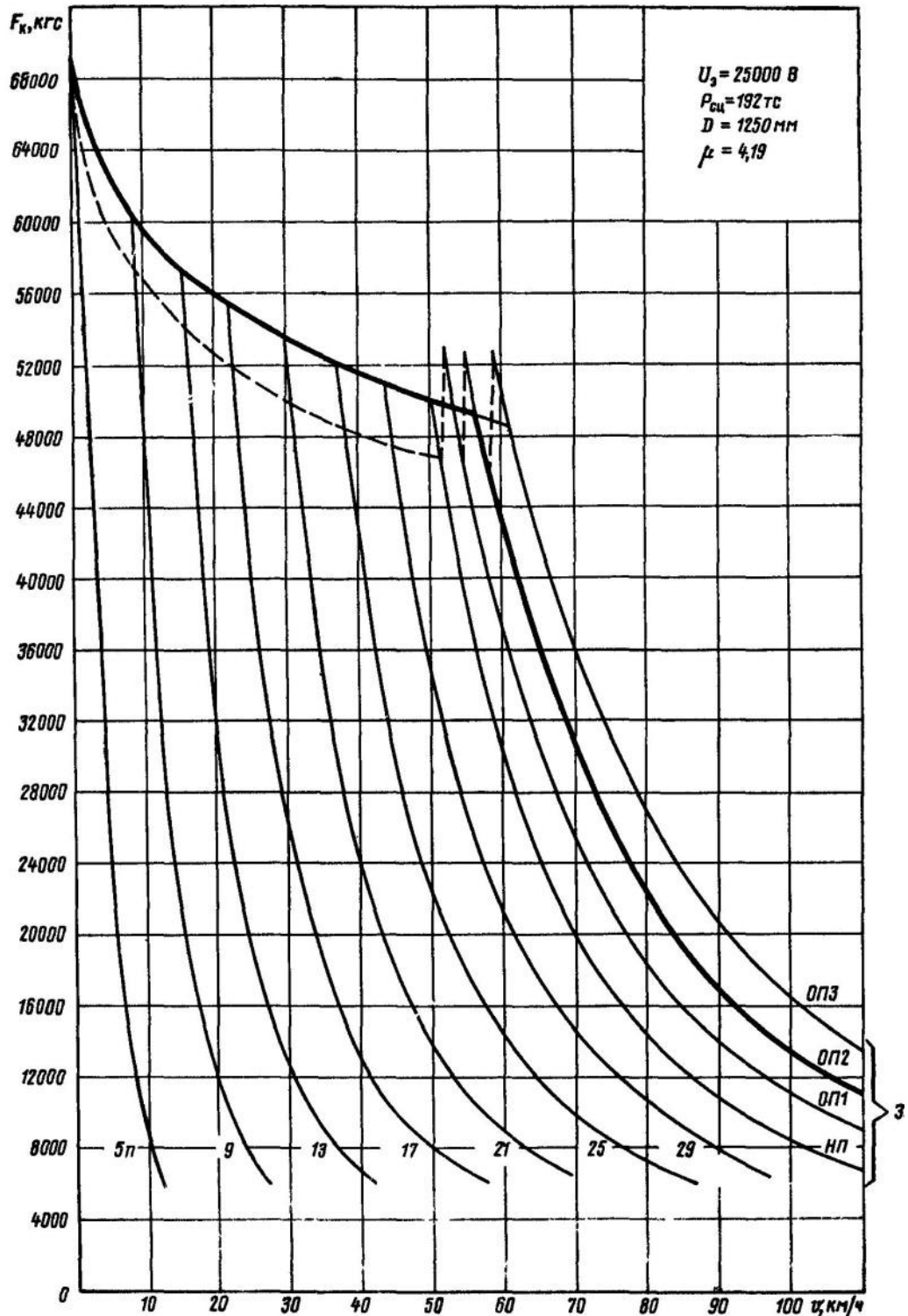


Рисунок 2.3 – Тяговая характеристика электровоза ВЛ80С

Для работоспособности модели необходимо знать непосредственно тяговые и тормозные характеристики данного электровоза, а данные характеристики нельзя получить в виде аналитических зависимостей и в графическом виде согласно ПТР 2016 [114]. Для получения аналитической формы тяговых характеристик воспользуемся методами аппроксимации, а

именно методом кубической и полиномиальной регрессией. Рассмотрим тяговые характеристики в удельной форме для массы состава 4192 тонны, как показано на следующем рисунке:

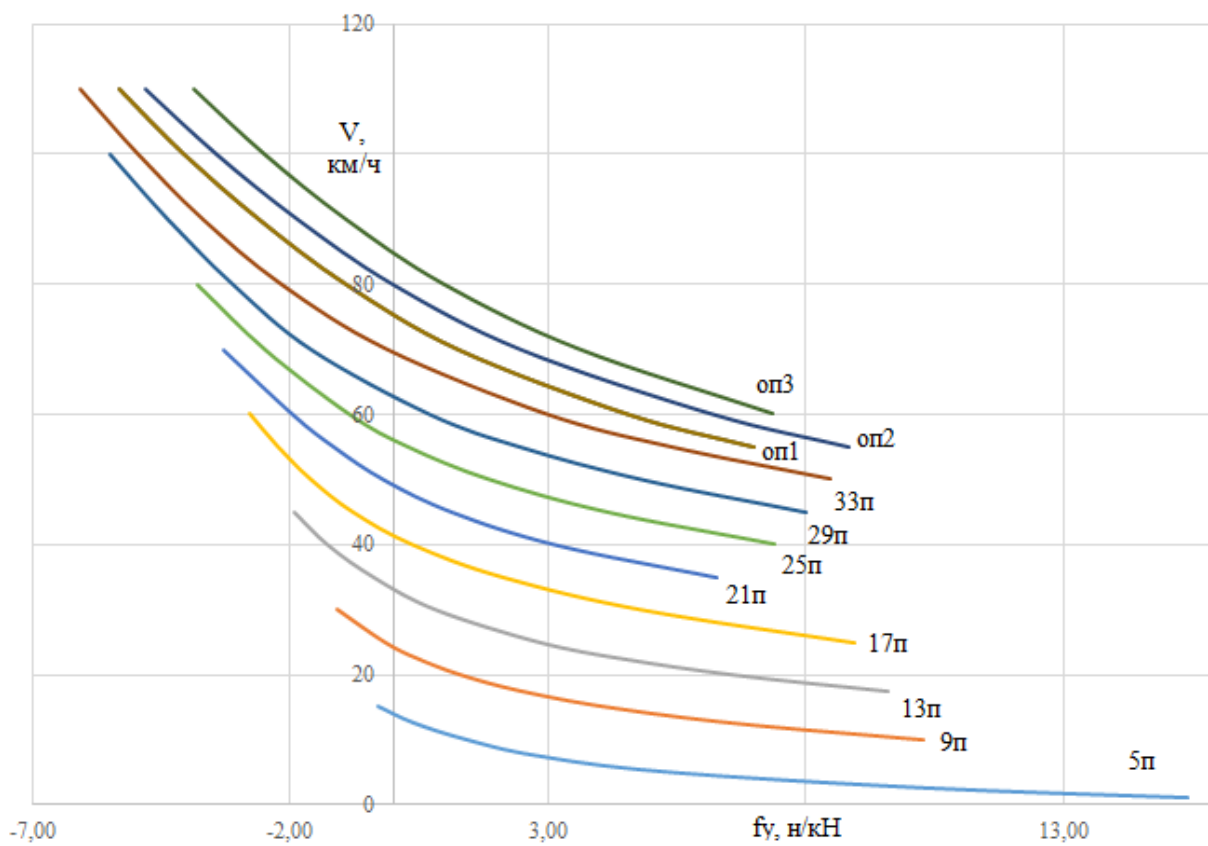


Рисунок 2.4 – Удельные значения тяговых характеристик электровоза ВЛ80С по зонам регулирования

Как видно из рисунка 2.4, аппроксимирующая линия показывает высокую точность сходимости с фактической характеристикой. Распишем для каждой зоны регулирования уравнение, которое характеризует данную линию.

Представленные выше выражения, позволят в каждый момент времени определять удельную равнодействующую силу в зависимости от позиции, что положительно отразится при выполнении мгновенного тягового расчёта в разработанной математической модели.

Аналогично рассмотрим характеристики для удельных замедляющих сил поезда в режимах выбега и пневматического торможения, а также в режиме электрического торможения. Для рисунка 2.5 со значениями удельных замедляющих сил поезда в режимах выбега и пневматического

торможения значениями выполним полиномиальную аппроксимацию, а для рисунка с удельными значениями удельных замедляющих сил поезда в режиме электрического торможения выполним линейную аппроксимацию.

5 позиция :

$$y = -0,0032x^3 + 0,1036x^2 - 1,5617x + 11,202$$

9 позиция:

$$y = 0,0016x^4 - 0,0515x^3 + 0,6239x^2 - 4,001x + 23,167$$

13 позиция :

$$y = 0,0021x^4 - 0,0645x^3 + 0,7334x^2 - 4,6211x + 32,44$$

17 позиция:

$$y = 0,0019x^4 - 0,0547x^3 + 0,6293x^2 - 4,5641x + 41,019$$

21 позиция :

$$y = 0,0005x^4 - 0,032x^3 + 0,5348x^2 - 4,5649x + 49,156$$

25 позиция:

$$y = 0,0004x^4 - 0,0258x^3 + 0,4534x^2 - 4,382x + 56,773$$

29 позиция :

$$y = -0,0002x^4 - 0,0171x^3 + 0,3994x^2 - 4,3142x + 63,726$$

33 позиция:

$$y = -0,0007x^4 - 0,009x^3 + 0,3638x^2 - 4,3142x + 63,726$$

ОП1:

$$y = -0,0002x^4 - 0,011x^3 + 0,3089x^2 - 4,3538x + 75,833$$

ОП2:

$$y = -0,0011x^4 + 0,0011x^3 + 0,2868x^2 - 4,7146x + 80,209$$

ОП3:

$$y = -0,0006x^4 + 0,0028x^3 + 0,221x^2 - 4,8013x + 85,028$$

Получим уравнение для каждой зоны регулирования удельных замедляющих сил в режиме выбега и пневматического торможения.

$$1\text{ая ступень: } y = -0,0489x^3 + 7,5336x^2 - 390,5x + 6851,2$$

$$2\text{ая ступень: } y = -0,4042x^3 + 37,555x^2 - 1167,5x + 12161$$

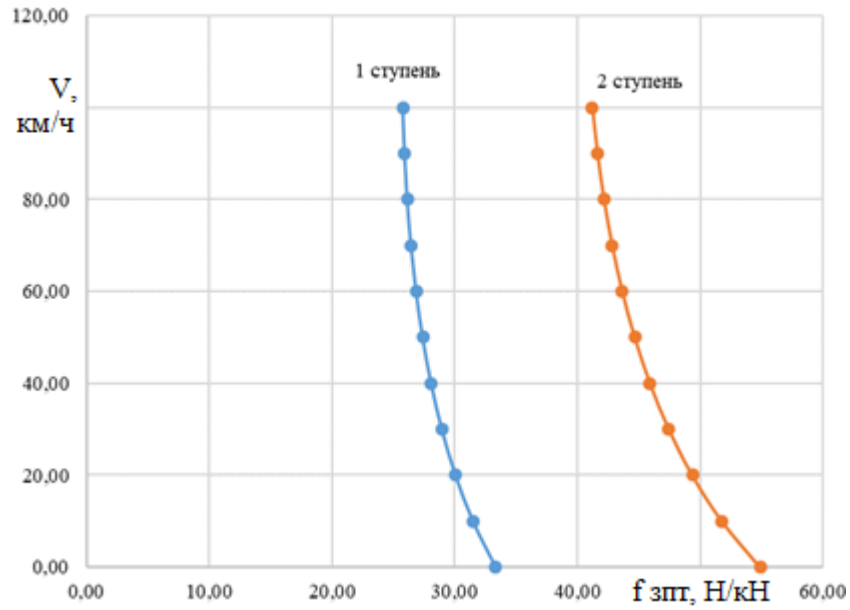


Рисунок 2.5 – Удельные значения удельных замедляющих сил поезда в режимах выбега и пневматического торможения

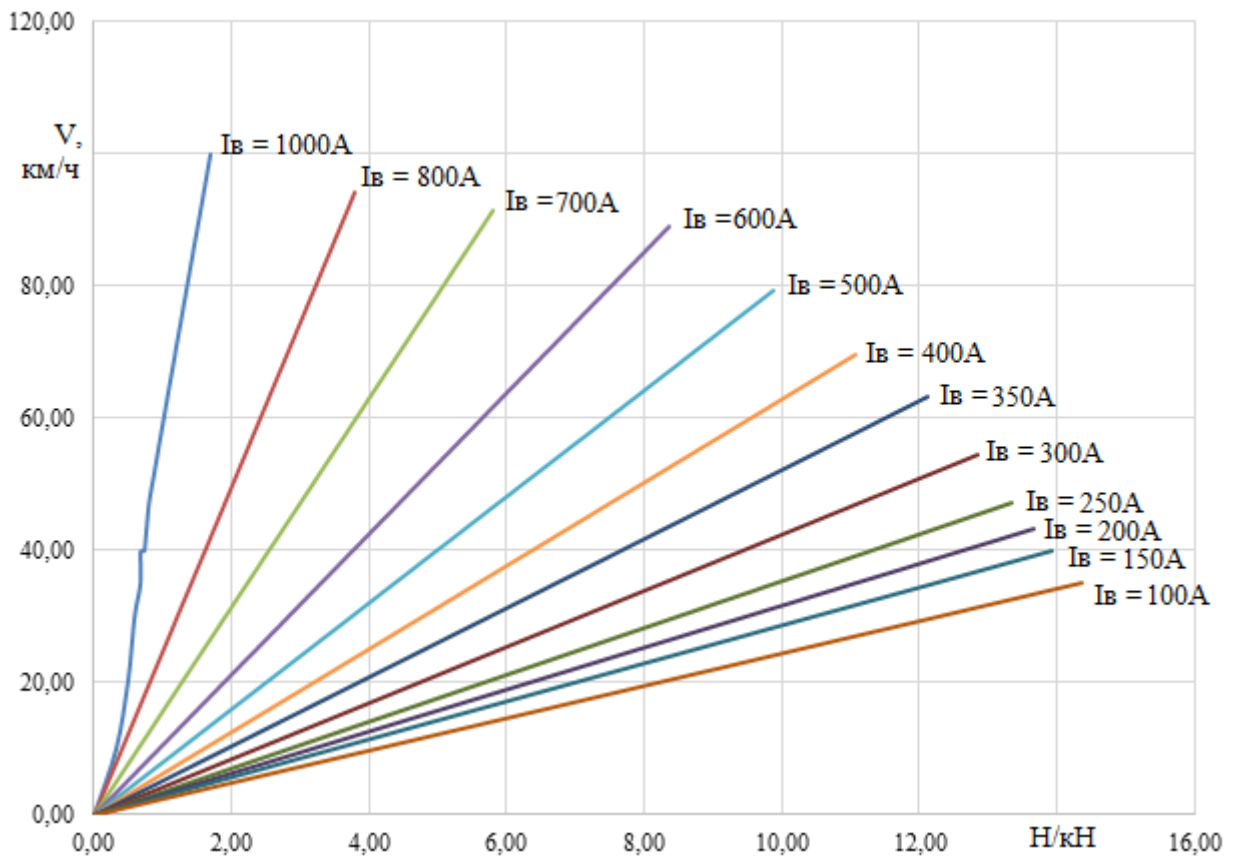


Рисунок 2.6 – Удельные значения удельных замедляющих сил поезда в режиме электрического торможения

Получим для каждой позиции аппроксимирующие уравнения удельных замедляющих.

$$I_B = 100A: y = 0,7601x + 0,7913$$

$$I_B = 150A: y = 0,8324x + 7,7985$$

$$I_B = 200A: y = 0,8319x + 14,638$$

$$I_B = 250A: y = 0,8037x + 21,541$$

$$I_B = 300A: y = 0,8847x + 28,719$$

$$I_B = 350A: y = 0,7358x + 35,402$$

$$I_B = 400A: y = 0,719x + 42,106$$

$$I_B = 500A: y = 0,6768x + 48,724$$

$$I_B = 600A: y = 0,5178x + 55,614$$

$$I_B = 700A: y = 0,6138x + 57,627$$

$$I_B = 800A: y = 0,729x + 61,924$$

$$I_B = 1000A: y = 0,812x + 66,14$$

Полученные выражения для удельных ускоряющих, замедляющих сил в режимах выбега, пневматического и электрического торможения позволят на следующем шаге построить кривую скорости движения грузового поезда.

Для выполнения мгновенного тягового расчёта требуется профиль пути, представленный на рисунке 2.7. Профиль принят с участка Алтайская – Артышта 2.

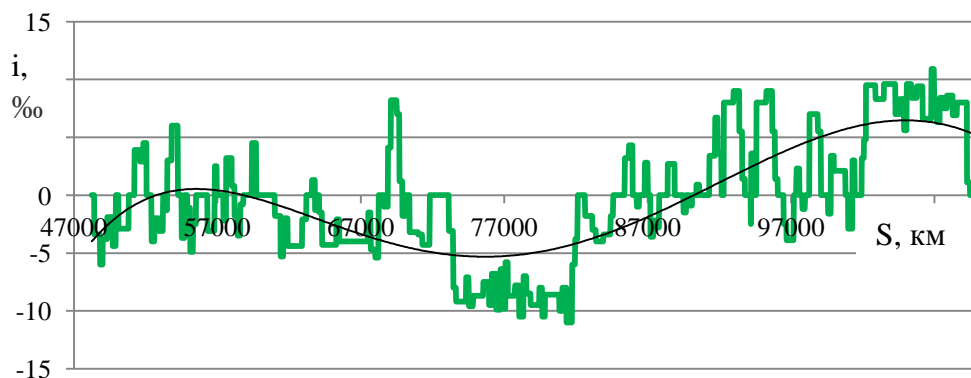


Рисунок 2.7 – Профиль пути участка между тяговыми подстанциями Шпагино – Смазнево

Следует заметить, что рассматриваемый участок между тяговыми подстанциями Шпагино – Смазнево имеет достаточно разнообразный уклон

пути (от -10 до +10)%. На этом основании можно сделать предположение, что на данном участке имеется потенциал по использованию рекуперативного торможения или режима выбега с использованием запаса кинетической энергии, что положительно скажется на снижении удельного расхода электроэнергии на тягу поездов.

### 2.2.2. Математическая модель движения поезда

В первом разделе рассмотрены различные подходы к построению математических моделей движения поезда. Основой для построения математической модели движения поезда является использование уравнения движения поезда, в первой или второй его форме [65, 75]. В различных научных трудах [16, 35, 74, 96, 99] уточняют некоторые его параметры для повышения детализации математической модели, что положительно сказывается при дальнейших расчётах (повышается качество управления системой автоведения, повышается безопасность движения, уточняются значения расхода электроэнергии поезда и т.д.). А применение моделей с учётом усилия продольных сил и динамики колебаний не оправданы в силу невозможного точного определения исходных данных по механической части.

Для построения математической модели движения поезда с учётом фактических условий движения воспользуемся уравнением движения поезда [69] в следующем виде:

$$\begin{aligned} (1 + \gamma) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} &= \xi F_D; \\ (1 + \gamma) \cdot m \cdot v \cdot \frac{dv}{ds} &= \xi' F_D, \end{aligned} \tag{2.20}$$

где  $F_D$  – равнодействующая сила, кН;

$(1 + \gamma)$  – коэффициент инерции вращающихся частей;

$m$  – масса состава, т;

$\xi, \xi'$  – переводные коэффициенты;

$dv$  – изменение скорости, км/ч;

$s$  – пройденное расстояние, км;

$t$  – затраченное время, ч.

Равнодействующая сила определяется по следующей формуле:

$$F_{\text{д}} = F - W - B, \quad (2.21)$$

где  $F$  – сила тяги поезда, кН;

$W$  – полное сопротивление движению, кН;

$B$  – тормозная сила, кН.

Эта формулировка имеет общий вид, в действительности, одновременное применение сил тяги и торможения невозможно. В режиме тяги, при  $B=0$ , равнодействующая сила равняется:

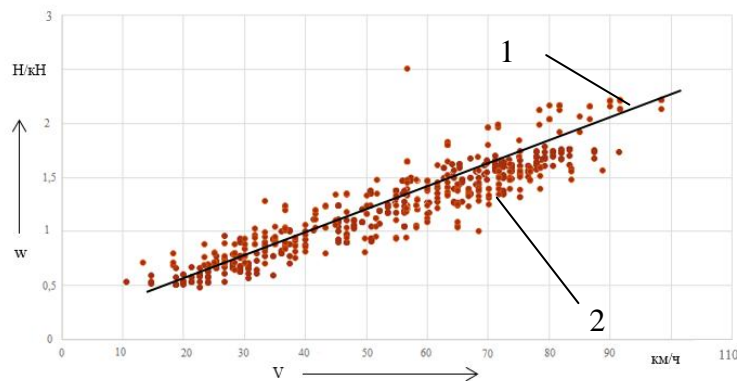
$$F_{\text{д}} = F - W. \quad (2.22)$$

Если  $F - W > 0$ , и скорость поезда возрастает, то силу  $F_{\text{д}}$  называют ускоряющей. При  $F - W < 0$ , то скорость поезда будет снижаться, силу  $F_{\text{д}}$  называют замедляющей. При  $F - W = 0$ , это тот случай когда сила тяги равняется силам сопротивления движению, движение поезда будет осуществляться равномерно с установившейся скоростью.

При выбеге сила тяги и торможения равна нулю, формула имеет следующий вид:

$$F_{\text{д}} = -W. \quad (2.23)$$

Главным допущением при выполнении большинства тяговых расчётов является то, что расчёты выполняются на усреднённых известных коэффициентах по эмпирическим формулам, при этом фактическое основное удельное сопротивление движению поезда даже с учётом введения поправочных коэффициентов от воздействия окружающей среды может отличаться в 2-3 раза от расчётного, как представлено на рисунке 2.8 согласно ПТР [114].



1 – значения по ПТР, 2 – фактические значения

Рисунок 2.8 – Зависимость основного удельного сопротивления движению от скорости движения поезда

Рассмотрим классическую формулу сил сопротивления движению [69]:

$$\begin{aligned} W &= W_0 + W_{\text{доп}}; \\ W_{\text{доп}} &= W_i + W_{\text{кр}}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

где  $W_0$  – сила основного сопротивления движению, кН;

$W_{\text{доп}}$  – сила дополнительного сопротивления движению, кН;

$W_i$  – сопротивление движению от уклонов, кН;

$W_{\text{кр}}$  – сопротивление движению от кривых, кН.

Для большего удобства выполнения тяговых расчётов, формулу основного сопротивления движения представляют в удельной форме:

$$\begin{aligned} w'_o &= 1.9 + 0.01v + 0.003v^2; \\ w'_o &= 2.4 + 0.011v + 0.0035v^2, \end{aligned} \quad (2.25)$$

где  $v$  – скорость движения поезда, км/ч;

Первая формула представлена для электровозов на звеньевом пути при тяге и электрическом торможении, а вторая для электровозов на звеньевом пути при выбеге и механическом торможении. В других работах [34, 18] принимаются уже иные коэффициенты перед значением скорости. Для большей наглядности заменим численные значения буквенным обозначением (2.26):

$$w'_o = a + bv + cv^2; \quad (2.26)$$

где  $a, b, c$  – конкретные значения коэффициентов согласно ПТР;

Данные коэффициенты определяются типом подвижного состава и конструкцией верхнего строения пути. Для локомотивов коэффициенты определяются режимом работы, а для вагонов, их осевой нагрузкой.. Сопротивление движению можно определять другим путём, без использования стандартных уточняющих коэффициентов.

В настоящее время, для повышения точности и оперативности исполнения управляющих воздействий, необходимо переходить к использованию реальных данных с бортовых систем измерений. Использование текущих данных о состоянии локомотива и основных показателей в каждый момент времени можно использовать и при определении реального значения сопротивления движению и определению фактического значения силы.

Обратимся к уравнению движения поезда в первой форме:

$$(1 + \gamma) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} + \xi W = \xi F_{\text{д}} \quad (2.27)$$

Выражение  $(1 + \gamma) \cdot m$  с точки зрения инертности подвижного состава можно рассмотреть как единое целое. Так как на основе реальных данных с измерений нельзя выделить составляющие вращательного и поступательного движения, можем принять  $G = (1 + \gamma) \cdot m$ , где  $G$  – эквивалентная масса состава.

Определим на основе фактических данных, полученных с бортовых систем измерений, такие параметры как сопротивление движению поезда и приведённая масса поезда. Данные параметры могут быть определены посредством использования метода идентификации параметров. Под идентификацией понимается задача определения параметров элементов в известной структуре математической модели объекта. В этом случае исследуемый объект представляет собой «чёрный ящик», параметры которого неизвестны и должны быть определены. Для определения параметров движения поезда был рассмотрен подход идентификации параметров регулируемого асинхронного двигателя в режиме реального времени на основе сигналов с датчиков статорных токов и напряжений.

Если рассмотреть основные составляющие уравнения движения поезда (2.27) в малых приращениях [4, 6, 9, 84-89], когда скорость практически не успевает измениться, а изменяется только значение силы тяги, принимая в расчёт что за пройденный момент времени сопротивление движению и эквивалентная масса состава остаётся постоянной, то с предельно высокой точностью можно записать уравнение движения в следующем виде:

$$\begin{cases} G_1 \cdot \frac{v_{i+1}(v_{i+1} - v_i)}{s_{i+1} - s_i} + \xi W_1 = \xi F_{K_i}; \\ G_1 \cdot \frac{v_{i+2}(v_{i+2} - v_{i+1})}{s_{i+2} - s_{i+1}} + \xi W_1 = \xi F_{K(i+1)} \\ G_2 \cdot \frac{v_{i+2}(v_{i+2} - v_{i+1})}{s_{i+2} - s_{i+1}} + \xi W_2 = \xi F_{K(i+1)} \\ G_2 \cdot \frac{v_{i+3}(v_{i+3} - v_{i+2})}{s_{i+3} - s_{i+2}} + \xi W_2 = \xi F_{K(i+2)} \end{cases} \quad (2.28)$$

где  $v_i, v_{i+1}, v_{i+2}, v_{i+3}$ , – мгновенная скорость движения поезда на участках пути  $s_i, s_{i+1}, s_{i+2}, s_{i+3}$  км/ч;

$F_{Ki}, F_{K(i+1)}$  – мгновенные значения силы тяги электровоза в соответствующие моменты времени ( $F_K = F_{ПИМ}$ ), кН.

Полученные системы уравнений можно записать в матричном виде:

$$A \cdot \beta = B \quad (2.29)$$

где  $A = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{l} \frac{v_{i+1}(v_{i+1} - v_i)}{s_{i+1} - s_i} \xi \\ \frac{v_{i+2}(v_{i+2} - v_{i+1})}{s_{i+2} - s_{i+1}} \xi \\ \frac{v_{i+3}(v_{i+3} - v_{i+2})}{s_{i+3} - s_{i+2}} \xi \\ \frac{v_{i+4}(v_{i+4} - v_{i+3})}{s_{i+4} - s_{i+3}} \xi \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{l} \frac{v_{i+2}(v_{i+2} - v_{i+1})}{s_{i+2} - s_{i+1}} \xi \\ \frac{v_{i+3}(v_{i+3} - v_{i+2})}{s_{i+3} - s_{i+2}} \xi \\ \frac{v_{i+4}(v_{i+4} - v_{i+3})}{s_{i+4} - s_{i+3}} \xi \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{l} \frac{v_{i+3}(v_{i+3} - v_{i+2})}{s_{i+3} - s_{i+2}} \xi \\ \frac{v_{i+4}(v_{i+4} - v_{i+3})}{s_{i+4} - s_{i+3}} \xi \end{array} \right] \end{array} \right. - \text{идентификационные матрицы};$

$$\beta = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{l} G_1 \\ W_1 \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{l} G_2 \\ W_2 \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{l} G_3 \\ W_3 \end{array} \right] \end{array} \right. - \text{вектор неизвестных параметров};$$

$$B = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{l} \xi F_{Ki} \\ \xi F_{Ki+1} \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{l} \xi F_{Ki+1} \\ \xi F_{Ki+2} \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{l} \xi F_{Ki+2} \\ \xi F_{Ki+3} \end{array} \right] \end{array} \right. - \text{вектор свободных членов системы уравнений};$$

Уравнение (2.29) решим методом обратной матрицы (МОМ) и представим в следующем виде:

$$\beta = A^{-1} \cdot B. \quad (2.30)$$

Аналогично уравнению выше составляется следующая система уравнений для последующих групп моментов времени. Систему уравнений (2.28) можем представить в матричной форме относительно неизвестных нам параметров:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} G_1 \\ W_1 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \frac{v_{i+1}(v_{i+1} - v_i)}{s_{i+1} - s_i} \\ \frac{v_{i+2}(v_{i+2} - v_{i+1})}{s_{i+2} - s_{i+1}} \end{vmatrix} \begin{matrix} \xi \\ \xi \end{matrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \xi F_{Ki} \\ \xi F_{Ki+1} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} G_2 \\ W_2 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \frac{v_{i+2}(v_{i+2} - v_{i+1})}{s_{i+2} - s_{i+1}} \\ \frac{v_{i+3}(v_{i+3} - v_{i+2})}{s_{i+3} - s_{i+2}} \end{vmatrix} \begin{matrix} \xi \\ \xi \end{matrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \xi F_{Ki+1} \\ \xi F_{Ki+2} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} G_3 \\ W_3 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \frac{v_{i+3}(v_{i+3} - v_{i+2})}{s_{i+3} - s_{i+2}} \\ \frac{v_{i+4}(v_{i+4} - v_{i+3})}{s_{i+4} - s_{i+3}} \end{vmatrix} \begin{matrix} \xi \\ \xi \end{matrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \xi F_{Ki+2} \\ \xi F_{Ki+3} \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (2.31)$$

После решения системы уравнений (2.31) получены мгновенные значения эквивалентной массы состава и сопротивления движению поезда, представленные на рисунке 2.9 и 2.10.

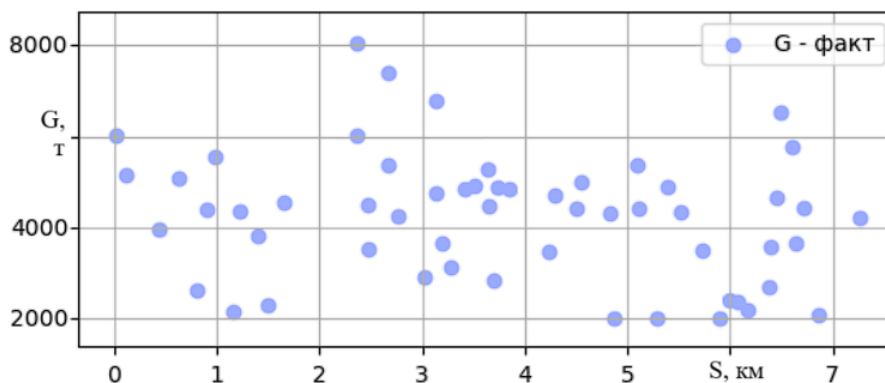
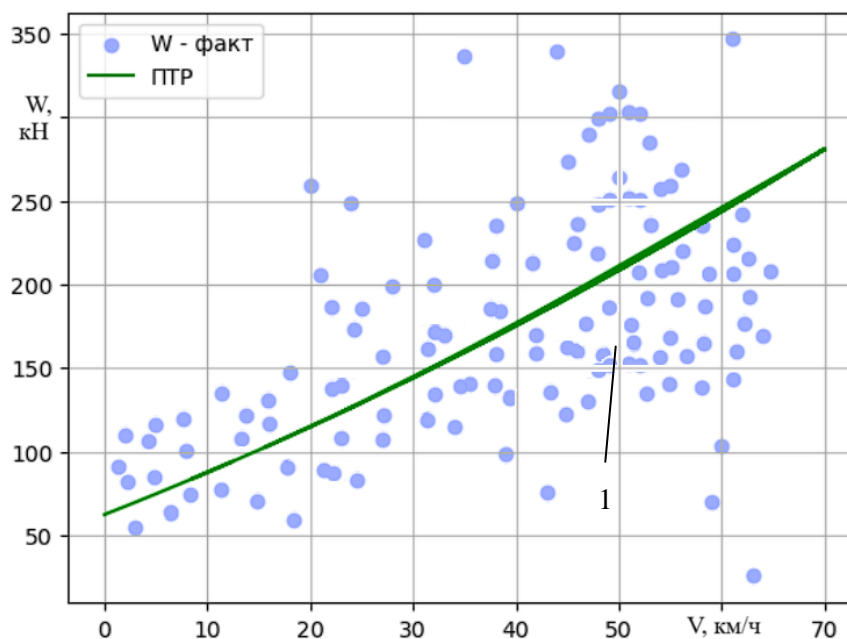


Рисунок 2.9 – Эквивалентная масса состава



1 – сопротивление движению по ПТР

Рисунок 2.10 – Фактическое сопротивление движению  $W$

Выполненные расчёты выполнялись для поезда ВЛ80С с массой состава 4192 тонны.

Из представленных рисунков видно, что присутствует достаточно большой разброс в данных. Полученные оценки эквивалентной массы состава ( $G$ ) и сопротивления движения поезда ( $W$ ) во время переходных режимов могут содержать случайную составляющую, поэтому требуется фильтрация полученного массива данных от случайной составляющей на основе фильтра низких частот или аналогов.

### 2.2.3. Фильтрация данных

Для фильтрации данных широко используется фильтр Калмана [43]. Данный фильтр является рекурсивным, предназначенным для оценки вектора состояния на основе данных измерений. Под термином «рекурсивный» понимается то, что для расчета текущих оценок требуется знание о состоянии системы только на предыдущем шаге. Алгоритм работает итеративно. На каждом этапе алгоритм принимает данные датчиков (с шумом и другими проблемами), вектор состояния с предыдущего этапа и по этим данным оценивает состояние системы на текущем этапе.

Фильтр Калмана полностью определяется следующими параметрами:

- начальное состояние (`initial_state_mean`, `initial_state_covariance`);
- модель системы (`transition_matrices`, `transition_covariance`);
- модель наблюдения (`observation_matrices`, `observation_covariance`).

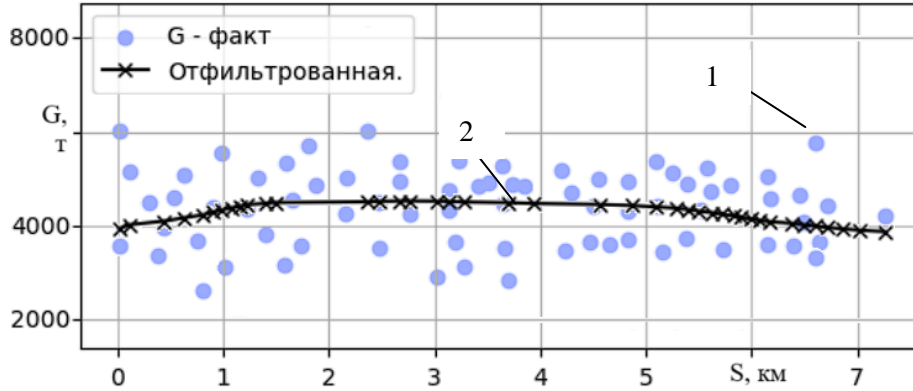
Параметром `initial_state_mean` задаётся массив измеренных данных, в нашем случае подаётся значения фактического сопротивления движения и эквивалентной массы состава. Параметром `transition_matrices` определяется модель системы. Так как фильтр одномерный, в данный параметр записывается единица. Параметром `observation_matrices` определяется модель наблюдения, которая описывает связь между переменными состояния и измеряемыми величинами. Переменные `initial_state_covariance`, `transition_covariance`, `observation_covariance` показывают ковариационные ошибки параметров в представленных моделях. В алгоритме задаётся начальное значение ошибок и затем, в процессе работы. А затем алгоритм самостоятельно обновляет эту матрицу в процессе работы.

В дальнейших расчётах будет использоваться одномерный фильтр Калмана и сглаживание Калмана, который зарекомендовал себя в смежных исследованиях для фильтрации массива данных по определению сопротивления движению, как у зарубежных, так и отечественных учёных. Фильтр реализован в программе Python 3. Фрагмент программного кода представлен на рисунке 2.11.

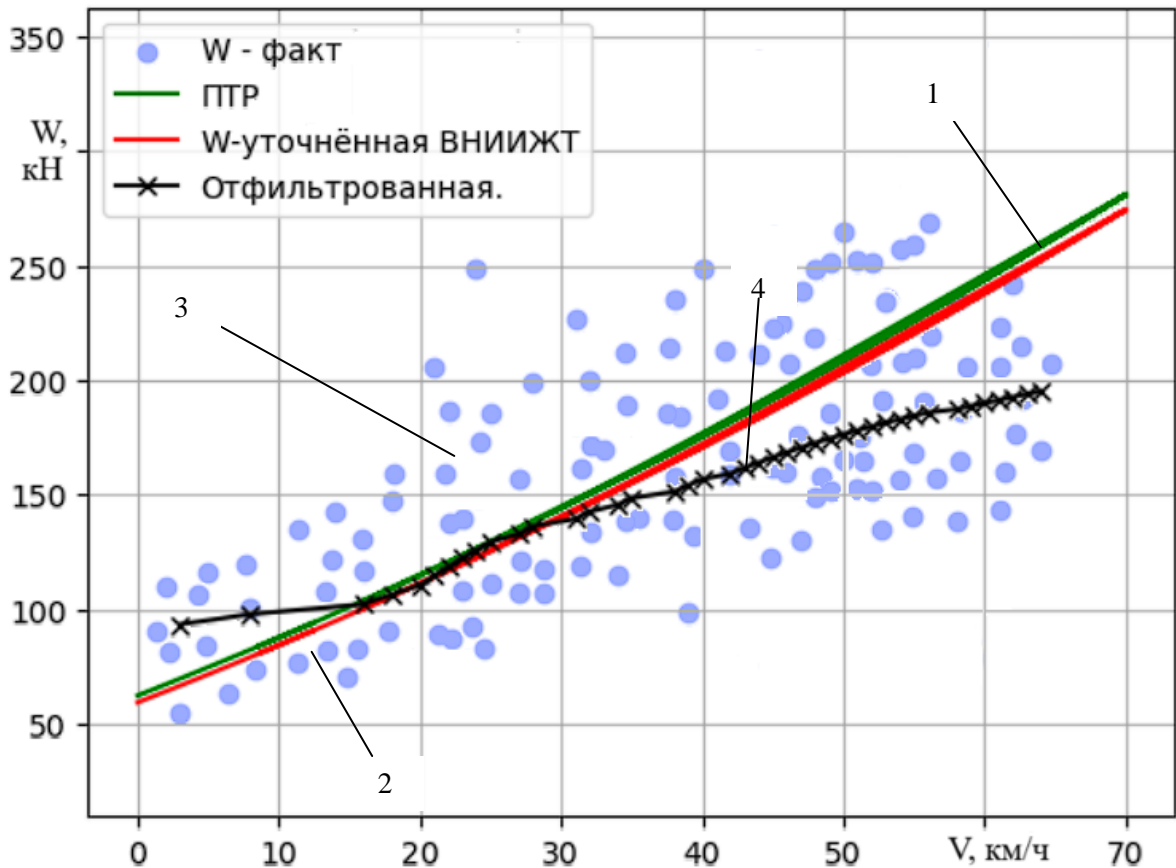
```
def Kalman1D(observations, damping=1):
    observation_covariance = damping
    initial_value_guess = observations[0]
    transition_matrix = 1
    transition_covariance = 0.1
    observation_covariance = 0.0015
    initial_value_guess
    kf = KalmanFilter(
        initial_state_mean=initial_value_guess,
        initial_state_covariance=observation_covariance,
        observation_covariance=observation_covariance,
        transition_covariance=transition_covariance,
        transition_matrices=transition_matrix
    )
    pred_state, state_cov = kf.smooth(observations)
    return pred_state
```

Рисунок 2.11 – Фильтр Калмана

После применения фильтра на рассчитанных данных сопротивления движения и эквивалентной массы состава данные представляются на следующих рисунках 2.12 и 2.13.



1 – мгновенное значение, 2 – фильтрация  
Рисунок 2.12 – Эквивалентная масса состава



1 – по ПТР, 2 – уточнённое в научных работах,  
3 – мгновенное значение по (3); 4 – фильтрация  
Рисунок 2.13 – Сопротивление движению поезда

В результате выполненных расчётов по определению фактического сопротивления движения и эквивалентной массы электроподвижного состава, а также фильтрации, сглаживания данных видно, что присутствует сходимость рассчитанных данных. Для подтверждения сходимости выполним оценку адекватности предлагаемого метода определения сопротивления движения поезда по фактическим данным, получаемых непрерывно с заданной дискретностью по результатам измерений бортовыми системами электровоза, на основе сравнения полученных результатов с известными методами, опубликованными в научных изданиях [18, 93, 114].

В таблице 2.3 представлены результаты сравнительной оценки методов определения сопротивления движения поезда по данным измерений бортовых систем электровоза на расчетном участке.

Таблица 2.3 – Сравнительная оценка методов определения сопротивления движению

Участок, км/ч	Предлагаемый метод, кН	САО, %	К	Уточнённое сопротивление по трудам ВНИИЖТ, кН	САО, %	К	По ПТР, кН
5	95	10	0,87	73	11,5	0,85	75
10	99			82			84
20	111			113			115
30	142			143			145
40	154			162			164
50	181			202			204
60	199			231			235

Среднее абсолютное отклонение (САО) между фактическими определёнными значениями и значениями, уточнёнными по трудам ВНИИЖТ составляет примерно 10%, а при сравнении со значениями ПТР примерно 11,5%. Коэффициент корреляции (К) – 0,87 и 0,85 соответственно.

Определение (уточнение) эквивалентной массы состава  $G$  и сопротивления движения поезда  $W$  предлагаемым методом с учетом фактических условий и их использование в системе автоведения электроподвижного состава обеспечит выработку управляющих воздействий (силы тяги, торможения, режим) соответствующей энергоэффективной фазовой траектории.

### 2.3. Выводы

1) Существующие математические модели движения поездов при всём разнообразии имеют недостатки, которые снижают точность математического моделирования и достоверность управляющих воздействий.

2) Предложен метод определения сопротивления движения поезда по фактическим данным, получаемых непрерывно с заданной дискретностью по результатам измерений бортовыми системами электровоза на основе разностных уравнений движения поезда, составленных для множества моментов времени для уточнения математической модели движения поезда.

3) Обосновано для фильтрации полученных оценок применять фильтр Калмана. Адекватность предлагаемого метода подтверждена путём сходимости рассчитанных данных с известными методами (их результатами), опубликованными в научных изданиях.

3) Определение (уточнение) эквивалентной массы состава и сопротивления движения поезда предлагаемым методом с учетом фактических условий и их использование в системе автоведения электроподвижного состава обеспечит выработку управляющих воздействий (силы тяги, торможения, режим) соответствующей энергоэффективной фазовой траектории.

### **3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОВОЗОМ С УЧЁТОМ ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА И ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ**

#### **3.1. Анализ существующих алгоритмов управления в системе автоведения**

Выражение «алгоритм управления к системе автоведения» априори подразумевает поиск оптимального управления движением электроподвижным составом. Поэтому, под оптимальным управлением подразумевается выбор определённых последовательностей режимов ведения поездом, которые позволяют обеспечить минимизацию значений критериев оптимальности. За критерий оптимальности принимается количественный показатель, который характеризует принимаемое решение. В то время как принимаемое решение выступает непосредственно за выбор управления движением поезда.

Для создания более совершенных систем автоведения и разработки оптимальных алгоритмов управления электроподвижным составом ведутся обширные исследования различными научными школами, такими как РУТ(МИИТ) [41], ВНИИЖТ [50-55] и ОмГУПС [10, 11, 20, 24-28, 68, 94, 104], ПГУПС [16, 44, 45]. В этих работах рассматриваются задачи оптимального управления, принципы разработки систем автоведения и предлагаются различные методы математического расчёта режимов для энергоэффективного управления поездом. Кроме того, значительный вклад в эту область вносят многие известные учёные. Среди них можно выделить О. С. Абляимов [1, 2], Л. А. Баранова [12-15], Л. А. Мигунштейна [50-55], К. И. Юренко [77, 95-98], А. В. Климовича [29-33], В. Е. Розенфельда [75], О. Е. Пудовиков [71, 72] и других [36, 37, 39]. Их исследования охватывают широкий спектр вопросов, связанных с оптимизацией управления электроподвижным составом и совершенствованием технологий автоведения.

В данных работах для выполнения решений задач оптимизации при разработке алгоритмов управления применяются в основном классические методы, такие как: принцип максимума Понтрягина, динамическое программирование Белмана (и его различные разновидности), методы

вариационного исчисления. Реже встречаются труды в которых рассматривается алгоритм «киевский веник», алгоритм локальных вариаций, а также методы «блуждающей трубки» и «бегущей волны» [54]. Данные методы имеют ряд недостатков, из-за которых они не получили широкого распространения.

Рассмотрим результаты исследований по данной теме.

В работе Баранова Л.А. [13] рассматривается исполнение алгоритма для оптимального управления поездом с использованием рекуперативного торможения. В уравнении движения поезда рассматривается уравнение движение поезда в дифференциальной форме в координатах скорости  $V$  и пройденного пути  $S$ , выражение записывается следующим образом:

$$\frac{dV}{dS} = \frac{\xi}{V} \cdot \left[ \frac{F}{P+Q} - \frac{B}{P+Q} - \omega_0 - \omega_o \right], \quad (3.1)$$

где  $Q, P$  – массы локомотива и состава, тонн;

$F$  – равнодействующая сила, кН;

$\omega_0, \omega_o$  – основное и дополнительное удельное сопротивление;

$\xi$  – переводной коэффициент.

Затем ставится две задачи оптимального управления. Первая постановка звучит так, что для объекта управления поезда, которое задаётся в изменённой форме (3.2), учитывающим рекуперативное торможение, необходимо определить такие управляющие воздействия  $u_f, u_b, u_r$ , ограничения, которые задаются выражениями (3.4), чтобы максимально снизить критерий оптимальности (3.5) при заданном ограничении времени хода подвижного состава по определённому перегону  $T_{xn}$  (3.6) и заранее заданными ограничениям (3.7) на фазовую координату – скорость [13].

Вторая постановки задачи оптимального управления звучит так, что для объекта управления подвижного состава, которое задаётся дифференциальным уравнением (3.2) необходимо определить такие управляющие воздействия  $u_f, u_b, u_r$ , ограничения, которые задаются выражением (3.4) для минимизации критерий оптимальности (3.8) при определённом ограничении (3.7) на фазовую координату – скорость [13].

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{V} \cdot [u_f \cdot f_{\max}(v) - u_b \cdot b_{T_{\max}}(v) - u_r \cdot r_{\max}(v) - \omega(v) - g(s)], \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned}
f_{\max}(v) &= \frac{\xi F_{\max}(v)}{P+q}, \\
b_{T_{\max}}(v) &= \frac{\xi B_{T_{\max}}(v)}{P+q}, \\
\omega(v) &= \xi \omega_0(v), \\
g(s) &= \xi \omega_g(s).
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Задаваемые ограничения записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
0 &\leq u_f \leq 1, \\
0 &\leq u_b \leq 1, \\
0 &\leq u_r \leq 1, \\
u_f \cdot u_r &= 0.
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Критерий оптимальности имеет вид для первой задачи:

$$A_{\mathcal{E}} = \frac{P+Q}{\eta_T \cdot \xi} \int_{S_H}^{S_k} [u_f \cdot f_{\max}(v) - \eta \cdot u_r \cdot r_{\max}(v)] ds \tag{3.5}$$

Изоперимитрическое ограничение времени хода подвижного состава:

$$T_{XII} = \int_{S_H}^{S_k} \frac{1}{v} ds \tag{3.6}$$

Ограничения на фазовую координату скорости:

$$0 \leq v \leq V_{\max}(s) \tag{3.7}$$

Критерий оптимальности имеет вид для второй задачи:

$$J^* = \frac{P+Q}{\eta_T \cdot \xi} \int_{S_H}^{S_k} [u_f \cdot f_{\max}(v) - \eta \cdot u_r \cdot r_{\max}(v) + \frac{\lambda}{V}] ds \tag{3.8}$$

Множитель Лагранжа:

$$\lambda = - \frac{dA_{\mathcal{E}}}{dT_{XII}} \tag{3.9}$$

Основное различие в данных задачах оптимизации состоит в том, что во второй задачи время хода подвижного состава по перегону не задано.

Так как в обеих задачах выражение (3.6) является изометрическим условием для решения оптимизационной задачи. Можно перейти к новому обобщённому критерию оптимизации, который имеет следующий вид (3.10):

$$A^* = \sum_{i=1}^m (\Delta A_i + \lambda_1 T_i + \lambda_2 \Delta M_i) \tag{3.10}$$

где  $A^*$  – оптимальное значение критерия оптимизации;

$\Delta M_i$  – число переключений позиций управления;

$T_i$  – время движения хода поезда.

Можно сделать заключение, для обеих задач критерий оптимальности задаётся выражением (3.10).

Решение данных задач оптимального управления будет основано на применении принципа максимума для задач с определёнными ограничениями, которые накладываются на фазовые координаты. Для большего понимания, какие оптимальные режимы возможно получить из решения представленных задач, рассмотрим гамильтониан для них:

$$H^* = \psi_0 \cdot f_0 + \psi_1 \cdot f_1 - \dot{\mu}(s)[v - v_{\max}(s)] + \psi_2 = H + \psi_2 \quad (3.11)$$

где  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  - сопряжённые функции.

И для упрощения выражения гамильтониана вводят подстановочное выражение (3.12) и подставляют в (3.11):

$$p = -\frac{\psi_1}{\psi_0} \quad (3.12)$$

Дифференциальное уравнение для  $p$  функции имеет следующий вид (3.13):

$$\frac{dp}{ds} = \frac{1-p}{v} u_f f'_{\max}(v) + \frac{p-\eta_u}{v} u_r r'_{\max}(v) + \frac{p}{v} u_b b'_{\max}(v) + \frac{p}{v} \omega'(v) - \frac{\lambda}{v^3} - \frac{1}{\psi_0 v} \dot{u}(s) \quad (3.13)$$

Получив дифференциальное уравнение для  $p$  функции (3.13) видно, что при фиксированных значениях  $p$ ,  $v$ ,  $s$  значение гамильтониана непосредственно является функцией управляющих воздействий  $u_f$ ,  $u_b$ ,  $u_r$ . Согласно принципу максимума требуется, чтобы выбор управляющих воздействия  $u_f$ ,  $u_b$ ,  $u_r$  производился из условия максимума гамильтониана. Из выражения ясно, для того чтобы обеспечить максимум  $H$  требуется чтобы  $u_f$ ,  $u_b$ ,  $u_r$  равнялись нулю или единице, при условии что выражения на которые они умножаются в гамильтониане меньше или больше нуля. А если данные выражения всё же равняются нулю, то  $u_f$ ,  $u_b$ ,  $u_r$  могут принимать любые допустимые ограничениями (3.4) значения. Исходя из этого, для  $p$  функции можно выделить некоторые диапазоны с различными управляющими воздействиями, которые обеспечивают максимум  $H$  и соответствуют одному из режимов. В таблице 3.1 показаны условия

управления, при котором происходит переключение управляющего воздействия на соответствующий режим.

Таблица 3.1 – Совокупность режимов управления подвижным составом для реализации оптимальной траектории движения [13]

Краткое обозначение	Режим ведения поезда	Управление	Значение $p$
ТМ	Режим полного торможения с максимально допустимой интенсивностью	$u_f = 0, u_b = 1, u_r = 1;$	$p < 0$
СТ	Режим стабилизации скорости механическим и рекуперативным тормозом	$u_f = 0, u_r = 1,$ $0 \leq u_b \leq 1;$	$p = 0$
РК	Режим рекуперативного торможения (полное)	$u_f = 0, u_b = 1, u_r = 1;$	$0 < p < \eta$
СР	Режим стабилизации скорости только рекуперативным тормозом	$u_f = 0, u_b = 0,$ $0 \leq u_r \leq 1;$	$p = \eta$
ВБ	Режим выбега	$u_f = 0, u_b = 0, u_r = 0;$	$\eta < p < 1$
С	Режим стабилизации скорости во время тяги	$0 \leq u_f \leq 1, u_b = 0, u_r = 0;$	$p = 1$
ТГ	Режим максимальной тяги	$u_f = 1, u_b = 0, u_r = 0;$	$p > 1$

На основе представленных условий для оптимальной траектории представлен алгоритм, который позволяет получить при заданном времени хода требуемые режимы управления подвижным составом на участке. Принцип его работы основывается на следующем: при заданной скорости  $V_C$  путём интегрирования уравнений движения поезда в дифференциальной форме и  $p$ -функции при заранее заданных граничных условиях  $v, p$  строится траектория движения  $v(s)$  и затем получается определённая последовательность режимов управления поездом. После этого определяется время хода. Заключительным этапом является получение энегооптимальной траектории движения поезда соответствующую заданному времени хода путём итерационной процедуры, изменяя заданную скорость  $V_C$ .

Когда режимы определены, необходимо понять, что скрывается под структурой оптимальной траектории движения поезда. Под ней понимается

определённая последовательность оптимальных режимов управления. Методика по которой происходит переключение режимов описана в [12]. Для описанных выше режимов управления, может произойти только 42 переключения между режимами. Но для каждого такого переключения может существовать 4 возможных случая:

- скорость поезда в момент переключения режима меньше максимально  $v < V_{max}$ ;

- скорость поезда равна максимальной, при условии, что в точке переключения режима величина  $V_{max}(s)$  не изменяется:  $v = V_{max}$ ,  $d V_{max} = 0$ ;

- скорость поезда равна максимальной, при условии, что в точке переключения режима величина  $V_{max}(s)$  увеличивается:  $v = V_{max}$ ,  $d V_{max} > 0$ ;

- скорость поезда равна максимальной, при условии, что в точке переключения режима величина  $V_{max}(s)$  уменьшается:  $v = V_{max}$ ,  $d V_{max} < 0$ ;

Исходя из условий и режимов переключения, для поиска всех возможных условий существует 168 различных случаев ( $42 * 4 = 168$ ).

Для примера, для первого случая граф возможных переключений оптимальных режимов движения поезда, можно представить в виде рисунка 3.1.

В процессе изучения работы, для построения оптимальной траектории движения необходимо учитывать не отдельно каждый взятый критерий оптимизации, а брать за основу обобщённый критерий оптимизации [14]. В основу которого положена совокупность двух или более критериев зависящих друг от друга. В примере рассматривался обобщённый критерий оптимизации, в котором расход электроэнергии был основным критерием, а число переключений позиций управления поезда учитывался в виде ограничения.

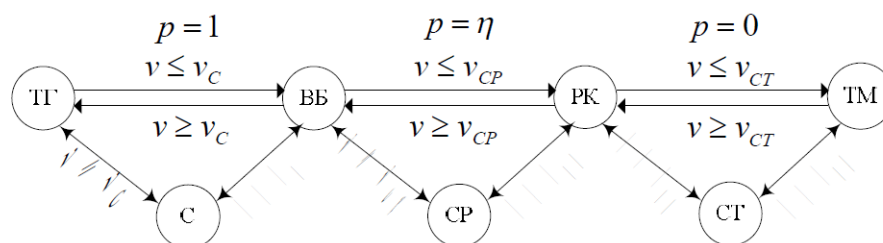


Рисунок 3.1. – Граф переключений оптимальных режимов движения поезда при  $v < V_{max}$  [14]

Рассмотрим блок-схему алгоритма для оптимизации режимов ведения поезда, схема представлена на рисунке 3.2 [15]. Более подробно остановимся

на некоторых блоках. В девятом блоке рассчитывались следующие параметры: скорость, время хода, расход электроэнергии на каждом шаге интегрирования уравнения движения и параметры, которые характеризуют движение подвижного состава в конце шага варьирования. А для того, чтобы решить уравнение движение поезда использовался метод Эйлера с интегрированием по пути.

$$v_j = v_{j-1} + \frac{\xi \Delta S}{v_{j-1}} \left[ \frac{F_{ja}(n_j) - w_{OЭ}(v_{j-1}) \cdot P - w_{OB}(v_{j-1}) \cdot Q - B_T}{P + Q} - w_D(s) \right] \quad (3.14)$$

$$t_i = t_{i-1} + T_i = t_{i-1} + \sum_{j=1}^n T_j = t_{i-1} + \sum_{j=1}^n \Delta S_j / [0,5 \cdot (v_j + v_{j-1})] \quad (3.15)$$

$$N_i = N_{i-1} + \Delta N_i; \quad M_i = M_{i-1} + \Delta M_i; \quad (3.16)$$

где  $v_j, v_{j-1}$  – скорость движения подвижного состава в конце  $j$ -го и  $j-1$ -го шагов интегрирования;

$\Delta S_j$  – выбранный шаг интегрирования (по пути);

$T_j$  – время хода подвижного состава на  $j$ -м шаге варьирования;

$\Delta N_i$  – момент изменения позиции управления подвижным составом на  $i$ -м шаге варьирования;

$\Delta M_i$  – момент количество переключений позиций для управления подвижным составом к концу  $i$ -го шага варьирования;

$N$  – общее количество шагов интегрирования на  $j$ -ом шаге варьирования.

В 10 блоке рассчитывается расход электроэнергии на тягу поездов на участке и критерий оптимизации. В завершении шага варьирования варианты полученных траекторий движения подвижного состава, которые попались в одну скоростную группу, переходят в модуль 11 для сравнения по критерию оптимизации (3.17). И если полученный вариант траектории имеет значение меньше чем значение критерия оптимизации, то данная траектория записывается в столбец матрицы ТА как наиболее предпочтительный (перспективный) для дальнейших расчётов. Данные действия выполняются в модуле 12. При дальнейшем анализе полученных траекторий движения из столбца матрицы ТА для каждого состояния подвижного состава на каждом шаге варьирования выполняется моделирование управления поезда при различных допустимых позициях.

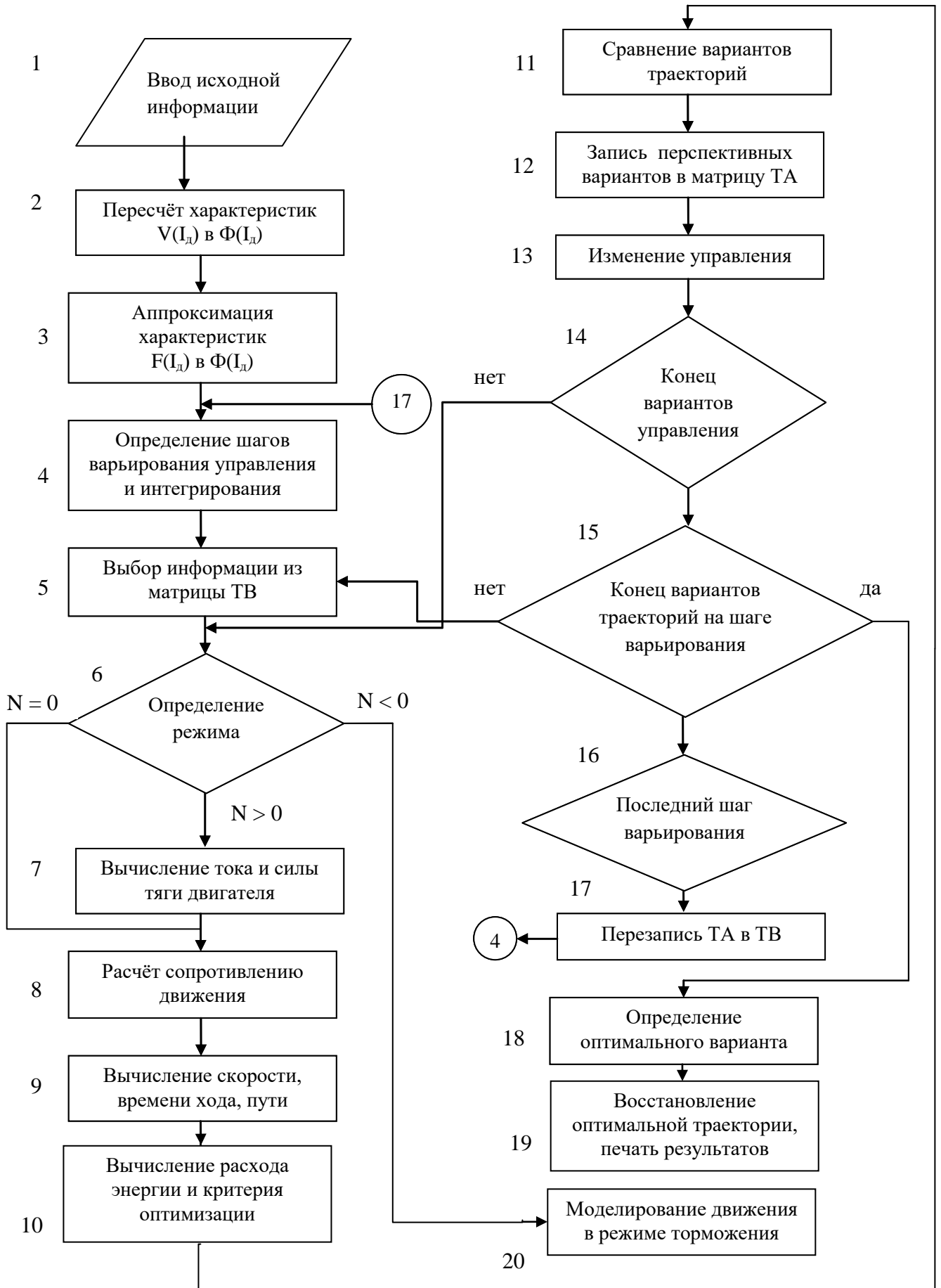


Рисунок 3.2 – Блочная схема алгоритма по определению оптимальных режимов ведения подвижного состава [15]

В следующем блоке 13 определяется изменение управления подвижным составом, а именно изменение позиции управления.

Последующие блоки с 14 по 16 производится проверка выбранных траекторий движения с последующей перезаписью оптимальной траектории в матрицу ТВ (блок 17). В данной матрице содержится вся информация о наиболее оптимальных (перспективных) траекториях движения по всему участку движения с начала движения и до полной остановки поезда. В блоке 18 выбирается финальный оптимальный вариант траектории движения поезда.

В заключение следует сказать, что с использованием вышеописанных условий переключения для каждого конкретного участка пути можно подобрать наиболее оптимальную траекторию движения поезда. Но для этого требуется непосредственно доказать, что данная траектория является оптимальной, так как в некоторых случаях может быть предложено более одной траектории из общего числа оптимальных. Также, для большей полноты решения данной задачи требуется найти координаты точек переключения режимов на оптимальной траектории. Как описывалось выше, всего существует 42 варианта переключения оптимальных режимов управления. В таблица 3.2 представлена подробная таблица для условий переключений.

Таблица 3.2 – Условия для переключения оптимальных режимов управления подвижным составом [14]

№	Режим слева	Режим справа	$v < V_{\max}$	$v = V_{\max} ; dV_{\max} = V_{\max}^+ - V_{\max}$		
				$dV_{\max} = 0$	$dV_{\max} > 0$	$dV_{\max} < 0$
			(а)	(б)	(в)	(г)
1	ТМ	СТ	-	-	-	$V_{\text{СТ}} \geq V_{\max}^+$ $s \in \text{СВ}$
2		РК	-	-	-	$V_{\text{СТ}} \geq V_{\max}^+$ $s \in \text{С}$
3		СР	-	-	-	$V_{\text{СТ}} \geq V_{\max}^+$ $s \in \text{С}$
4		ВБ	-	-	-	$V_{\text{СТ}} \geq V_{\max}^+$

Продолжение таблицы 3.2

5		С	-	-	-	$V_{CT} \geq V_{max}^+$
6		ТГ	-	-	-	$V_{CT} \geq V_{max}^+$ $s \in \Pi$
7	СТ	ТМ	$v = V_{CT}$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s \in CB$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s \in CB$	$V_{CT} \geq V_{max}^+$ $s \in CB$
8		ПК	$v = V_{CT}$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s \in CB$	$V_{CT} \geq V_{max}^+$ $s = KCB$
9		СР	-	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CT} \geq V_{max} = V_{CP}$ $s = KCe$	-
10		ВБ	-	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CT} = V_{max}^+$ $s = KCB$
11		С	-	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CT} \geq V_{max} = V_C$ $s = KCB$	-
12		ТГ	-	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB = НП$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s \in CB$ ИЛИ $s = KCB = НП$	$V_{CT} = V_{max}^+$ $s = KCB = НП$
13	ПК	ТМ	$v \leq V_{CT}$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s \in CB$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s \in CB$	$V_{CP} \geq V_{max}^+$ ИЛИ $s \in CB$
14		СТ	$v = V_{CT}$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s \in CB$	$V_{CT} = V_{max}$ $s \in CB$	$V_{CT} \geq V_{max}^+$ $s \in CB$
15		СР	$v = V_{CP}$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CT} \geq V_{max} = V_{CP}$ $s = KCB$	$V_{CP} \geq V_{max}^+$ И $s \in C$ ИЛИ $s = KCB$
16	ПК	ВБ	$v \geq V_{CP}$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_{CP} \geq V_{max}^+$ ИЛИ $s = KCB$
17		С	-	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB$	$V_C = V_{max}$ $s = KCB$	$V_C \geq V_{max}^+$
18		ТГ	-	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB = НП$	$V_{CT} \geq V_{max}$ $s = KCB = НП$	$s \in \Pi$
19	СР	ТМ	-	-	-	-
20		СТ	-	-	-	-
21		ПК	$v = V_{CP}$	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s \in C$	$V_{CP} \geq V_{max}$ И $s \in C$ ИЛИ $s = KC$	$V_{CP} = V_{max}^+$ $s \in C$

Окончание таблицы 3.2

22		ВБ	$v = V_{CP}$	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s = KC$	$V_{CP} \geq V_{max}$	$V_{CP} \geq V_{max}^+$ $s = KC$
23		С	-	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s = KC$	$V_{CP} \geq V_{max} = V_C$ $s = KC$	-
24		ТГ	-	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s = KC = НП$	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s \in C$ ИЛИ $s = KC = НП$	$V_{CP} = V_{max}^+$ $s = KC = НП$
25	ВБ	ТМ	-	-	-	-
26		СТ	-	-	-	-
27		РК	$v < V_{CP}$	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s \in C$	$s \in C$	$V_C \geq V_{max}^+$ ИЛИ $s \in C$
28		СР	$v = V_{CP}$	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s \in C$	$V_{CP} = V_{max}$ $s \in C$	$V_{CP} \geq V_{max}^+$ $s \in C$
29		С	$v = V_C$	$V_{CP} \geq V_{max}$ $s = KC$	$V_C = V_{max}$ $s = KC$	$V_C \geq V_{max}^+$
30		ТГ	$v \geq V_C$	$V_C \geq V_{max}$ $s = KC = НП$	$V_C \geq V_{max}$ $s \in СВ$ ИЛИ $s = KC = НП$	$s \in \Pi$
31	С	ТМ	-	-	-	-
32		СТ	-	-	-	-
33		РК	-	-	-	-
34		СР	-	-	-	-
35		ВБ	$v = V_C$	$V_C \geq V_{max}$	$V_C \geq V_{max}$	$V_C = V_{max}^+$
36	С	ТГ	$v = V_C$	$V_C \geq V_{max}$ $s = НП$	$V_C \geq V_{max}$ $s = НП$	$V_C = V_{max}^+$ $s = НП$
37	ТГ	ТМ	-	-	-	-
38		СТ	-	-	-	-
39		РК	-	-	-	-
40		СР	-	-	-	-
41		ВБ	$v \leq V_C$	$V_C \geq V_{max}$	$V_C \geq V_{max}$	<b>с</b>
42		С	$v = V_C$	$V_C \geq V_{max}$	$V_C = V_{max}$	$V_C \geq V_{max}^+$

где:  $V_{max}^+$  – ограничение максимальной скорости с правой стороны от точки переключения;

$V_{\max}$  – ограничение максимальной скорости с левой стороны от точки переключения;

$s \in \Pi$  – момент переключения при расположении на крутом подъёме;

$s \in C$  – момент переключения при расположении на крутом спуске;

$s \in C\text{В}$  – момент переключения при расположении на сверхкрутом спуске;

$s \in \text{НП}$  – момент переключения, при расположении в начале крутого подъёма;

$s \in \Pi$  – момент переключения, при расположении на конце крутого спуска;

$s \in \Pi$  – момент переключения, при расположении в конце сверхкрутого спуска.

В работах Л.А. Мугинштейна [50-55] в соавторстве с другими учёными (А.Е. Илютович, И.А. Ябко [99]) представлен алгоритм оптимизации управления на основе численной реализации в виде модулей (в которых происходят расчёты энергооптимальных траекторий движения).

Анализ теоретических исследований показал, что оптимальная траектория движения подразумевает последовательное сочетание режимов тяги и торможения. Всего возможно пять типов сочетаний:

- движение с максимальной силой тяги (разгон);
- движение с постоянной скоростью в режиме тяги;
- движение по инерции (выбег);
- движение по инерции с подтормаживанием на уклоне при максимально допустимой на данном участке пути скорости;
- движение с постоянной скоростью на уклоне; максимальное торможение.

Для лучшего понимания эти режимы схематично представлены на рисунке 3.3 в виде квадрата. В соответствии с условиями оптимальности, требуются только те точки, которые лежат на нижней и левой сторонах квадрата (они изображены утолщёнными линиями). В этих точках невозможно одновременное использование тяги и торможения, за исключением точки 3, находящейся в углу, где и тяга, и торможение равны нулю.

Рассмотрим более подробно представленные пять режимов движения поезда.

Первый режим начинается в момент начала движения и при разгоне подвижного состава на участках с сложным профилем пути. Также

используется, когда требуется разгон после движения с постоянной скоростью.

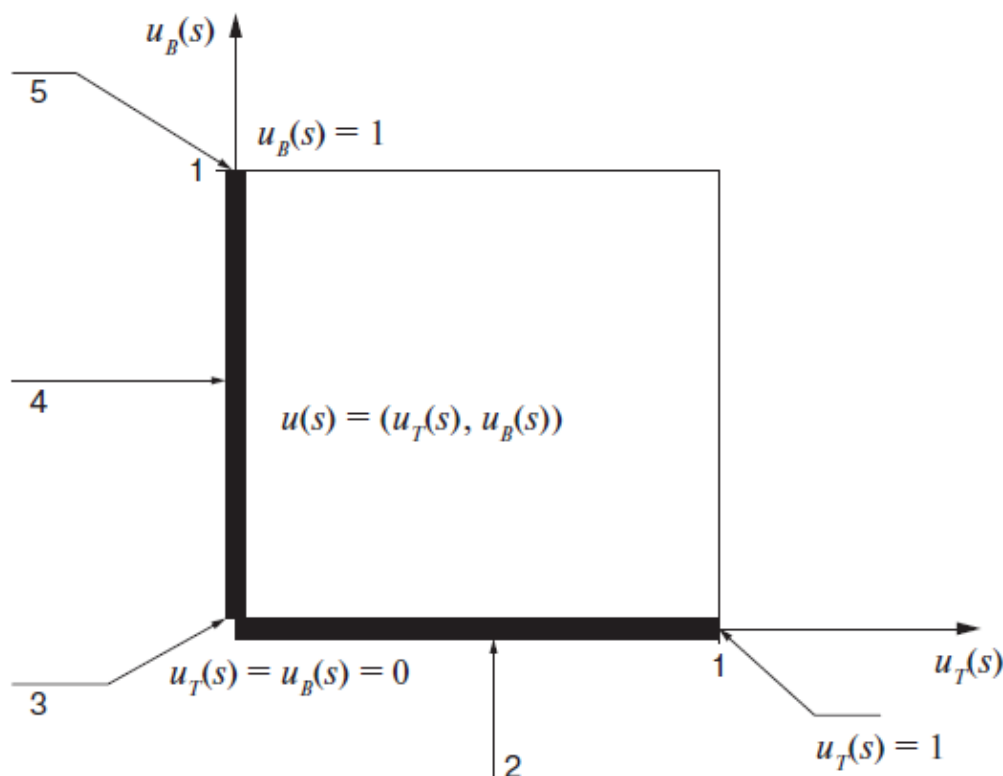


Рисунок 3.3 – Графическое изображение пяти возможных управлений режимов согласно [52]

Второй режим осуществляется при движении со скоростью стабилизации или с максимально допустимой скоростью на определённом участке пути, если максимально допустимая скорость меньше скорости стабилизации.

Третий режим характеризует движение по инерции (выбег).

Четвёртый режим применяется во время движения по уклону (спуску) при условии, что последующее движение будет с максимально допустимой скоростью на данном участке.

Пятый режим реализуется непосредственно перед остановкой поезда, когда требуется снижение скорости.

В представленной работе для решения задачи оптимизации берётся функция Гамильтона – Понтрягина на множестве допустимых управлений для каждого момента переключения режима управления с последующим нахождением нового управления  $u$ :

$$H(s, p_0(s), z_0(s), u_0(s)) = -u_T U_{T_{\max}}(K_o(s)) + \frac{\lambda_{T0}}{(K_o(s))^{1/2}} +$$

$$+ 2p_{K0}(s)(-W(s, K_o(s)) + u_T U_{T_{\max}}(K_o(s)) - u_B U_{B_{\max}}(K_o(s)))$$
(3.17)

где  $u_0(s)$  – координата управления, где значение точки функции  $H(...u) = H(s, p_0(s), z_0(s), u_0(s))$  достигает минимума;

$s$  – путь;

$p(s), z(s), u(s)$  – вектор функции управления и фазовых координат.

На данной основе строится основной оптимизационный алгоритм для определения оптимальной траектории движения поезда.

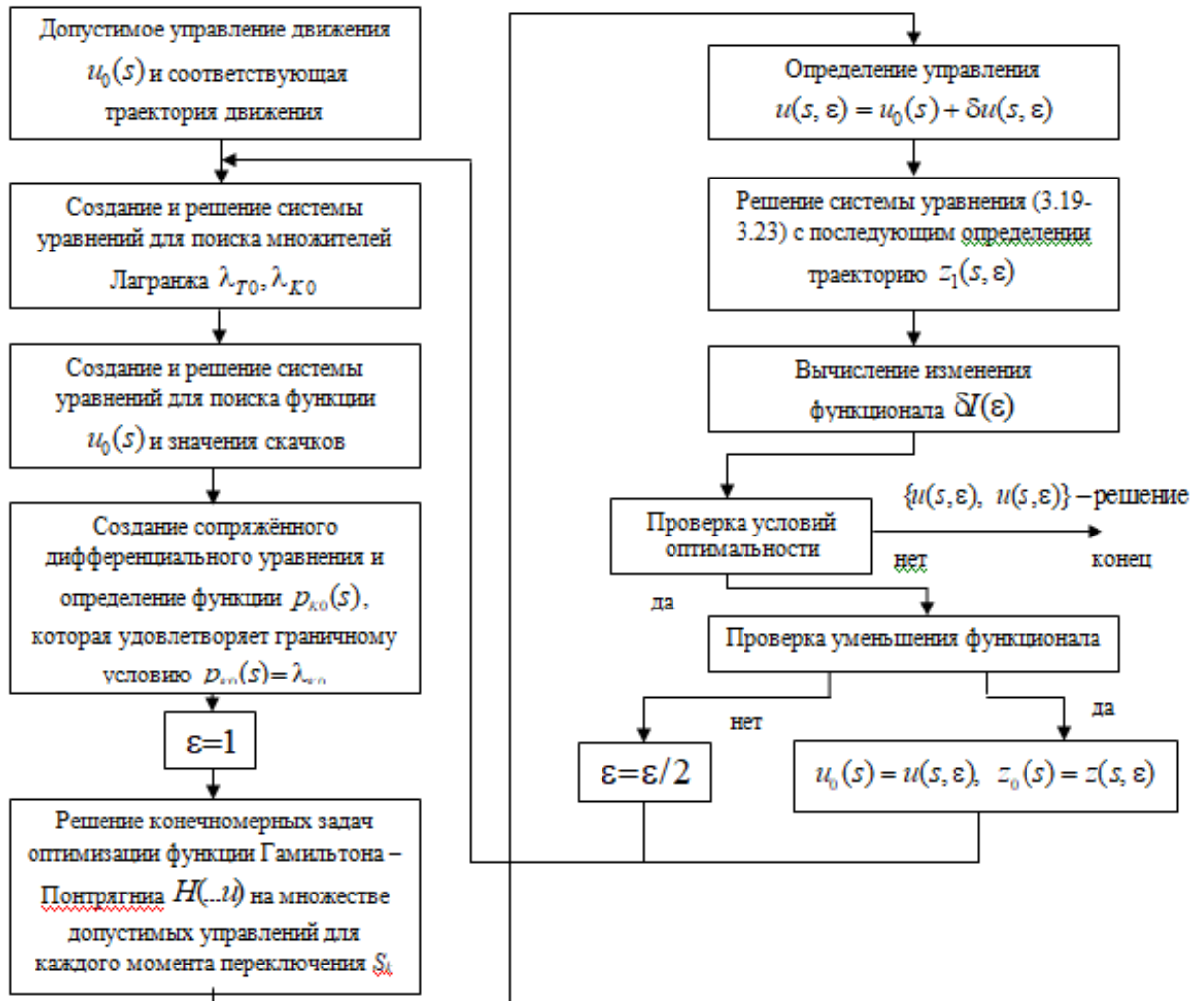


Рисунок 3.4 – Блочная схема оптимизационного алгоритма согласно [55]

Для поиска оптимального управления движением электроподвижного состава, движение поезда описывается следующими выражениями:

$$\frac{dJ(s)}{ds} = u_T(s)U_{T_{\max}}(K(s)) ; \quad (3.19)$$

$$\frac{dt(s)}{ds} = \frac{1}{[K(s)]^{1/2}} ; \quad (3.20)$$

$$\frac{dK(s)}{ds} = 2[-W(s, K(s)) + u_T(s)U_{T_{\max}}(K(s)) - u_B(s)U_{B_{\max}}(K(s))] ; \quad (3.21)$$

$$J(0) = 0, \quad t(0) = 0, \quad K(0) = K_0 ; \quad (3.22)$$

$$t(S) = T, \quad K(S) = K_T, \quad 0 \leq s \leq S, \quad (3.23)$$

где  $S$  – длина выбранного участка;

$T$  – время хода поезда;

$u_T(s), u_B(s)$  – управления, которые являются безразмерными величинами и зависящие от отношения величин сил тяги и торможения.

В описанном выше алгоритме также учитывается оценка увеличения расхода электроэнергии  $A$  в сравнение с энергией  $A^*$ , затрачиваемой в режиме тяги при постоянной скорости стабилизации  $v = v^*$  на участке пути от  $s_0$  до  $s_1$ :

$$\frac{A}{A^*} - 1 < \frac{K(v^*)}{s_1 - s_0} \int_{s_0}^{s_1} \Delta^2(s) ds, \quad (3.24)$$

где  $\Delta = \frac{v}{v^*} - 1$ ;

$$K(v) = \frac{A_1 \cdot v^* + 3A_2 \cdot (v^*)^2}{A_0 + A_1 \cdot v^* + A_2 \cdot (v^*)^2} - \text{коэффициент безразмерный};$$

$A_j (j=0, 1, 2)$  – коэффициенты, которые выражают зависимость основного сопротивления движению подвижного состава от скорости его движения.

Представленная оценка показывает, что относительное увеличение расхода электроэнергии при движении значительно меньше ожидаемой величины. Применение этой оценки сводится к задачам по поиску точек переключения режимов на участке пути и определению расхода электроэнергии на тягу поездов. Если в процессе поиска обнаруживается траектория движения, при которой расход электроэнергии на тягу превышает заранее установленное значение, то переход осуществляется от  $n$  до  $n+1$ , и весь процесс повторяется до нахождения траектории, соответствующей заданному ограничению.

Следует отметить, что решение этих задач на каждом шаге сводится к классической формулировке задачи вариационного исчисления для поиска минимума функции. Этот подход позволяет применять стандартный метод множителей Лагранжа.

В работе Юренко К.И. [95] для реализации алгоритма управления режимами подвижного состава создаётся имитационная модель и её программно-алгоритмическая реализация, которая отражает все присутствующие функциональные взаимосвязи системы автоведения поезда, внешних факторов, а также самого поезда. Для данной модели определяется вектор управления движением подвижным составом, который имеет следующий вид:

$$Y = \{F = O_F(s), R = O_R(s), B = O_B(s)\}^T, \quad (3.24)$$

где  $T$  – надстрочный индекс, который обозначает транспонированную матрицу;

$O_F(s), O_R(s), O_B(s)$  – операторы, которые описываются систему управления при различных режимах движения поезда: тяга, электрическое торможение, механическое торможение. Операторы описываются согласно ограничениям на управление и на фазовые координаты;

-  $F \leq F_{\max}, R \leq R_{\max}, B \leq B_{\max}$  – задаваемые ограничения, которые непосредственно зависят от конструкционных особенностей подвижного состава;

-  $v \leq v_{\max}(s), a_{\text{уск.}} \leq dv/dt \leq a_{\text{зам.}}$  – основные требования, предъявляемые к безопасности движения и комфортности, где  $v_{\max}(s)$  максимально допустимая скорость движения подвижного состава на выбранном участке;

-  $a_{\text{уск.}}, a_{\text{зам.}}$  – максимально разрешенные значения ускорения и замедления подвижного состава выбранного типа;

-  $s(0) = s_0, s(t_3) = s_k, v(0) = v_0, v(t_3) = v_k$ , где  $s_0, s_k, v_0, v_k$  – задаваемые координаты и скорость движения подвижного состава в начале и в конце участка;  $t_3$  – время хода на участке заданное для выбранного поезда;

-  $Y \in M_Y$  – определённое множество реализаций управления подвижным составом, при которых реализуется минимум расхода электроэнергии на тягу поездов  $A \Rightarrow \min$ .

Ключевая задача оптимизации в представленной работе [92] заключается в поиске значения скорости движения поезда в каждой точке

пути и координат оптимального переключения режимов движения поезда (режимы тяги, выбега, рекуперации, механического торможения). Разработанная имитационная модель позволяет определить энергооптимальную траекторию движения по следующему алгоритму, представленному на рисунке 3.5 в виде блок-схемы.



Рисунок 3.5 –Блок-схема поиска оптимальных режимов движения поезда [92]

Распишем для большего понимания обозначения на представленном алгоритме:  $\Pi$  – параметры поиска,  $E$  – оценка (к примеру расход электроэнергии подвижным составом) выбранной траектории движения;  $Z_{\text{опт}}^*$ ,  $Z_{\text{опт}}$  – характеристики решения в настоящий момент времени и окончательные которые соответствуют оптимальным режимам управления движения подвижным составом;

Данный алгоритм использует методы нелинейного программирования (к примеру Нелдера-Мида) или метод случайного поиска. В данной модели осуществляется вариантный тяговый расчёт при помощи метода Эйлера. Другой особенностью модели является то, что значения основного и дополнительного сопротивления движению, масса состава пассажирами или иными грузами могут уточняться непосредственно в процессе движения благодаря разработанным методам идентификации параметров.

В начальный момент времени формируются исходные параметры для имитационной модели  $X$  и  $Q$ , а также соответствующие им параметры поиска. В следующий момент времени в блоке «Варьирование режимов» определяется закон  $Y_{\text{РВХ}}$ , который в последствии моделирует работу РВХ (регулятор времени хода) и затем находятся следующие зависимости  $Y_{\text{зад}}(s)$ ,

которые определяют в процессе моделирование следующие значения  $Y(s)$ . На следующем шаге, с помощью блока «Имитационная модель движения поезда» находится вектор  $Z$ , который непосредственно характеризует рассчитанный вариант движения в настоящем цикле, а также вид  $Y(s)$ .

Блок «Имитационная модель движения поезда» позволяет определить вектор  $Z$ , который характеризует рассчитанный вариант движения поезда в текущем цикле. Далее идёт «Блок сравнения», который оценивает результаты от каждого цикла моделирования  $E$ , а также наиболее подходящая траектория движения  $Z_{\text{опт}}^*$  среди всех оцениваемых на данном этапе, передаётся в «Блок сохранения перспективных вариантов». На следующем этапе выполняется ещё один цикл по поиску и затем после завершения цикла в блоке оптимальных решений формируется итоговый вариант оптимального решения.

В данном алгоритме также вводится энергетический критерий  $E = At_{\phi}/t_3$ , который позволяет сравнивать различные режимы управления с поправкой на интервал движения. Суммарный расход энергии в алгоритме рассчитывается по следующей формуле 3.25.

$$A = \int_{s_0}^{s_k} \left( \frac{F}{\eta_{\text{ТГ}}} - R\eta_{\text{рк}} \right) ds = \int_{t_{s0}}^{t_{\phi}} \left( \frac{Fv}{\eta_{\text{ТГ}}} - Rv\eta_{\text{рк}} \right) dt \quad (3.25)$$

Работу представленного алгоритма поиска представляют в виде оператора  $J(X) = Y_{\text{РВХ}}$ , где  $Z = f(X, Q, Y_{\text{РВХ}}): A \Rightarrow \min; |t_3 - t_{\phi}| \leq t_{\text{до}}; |v_k - v_{\phi}| \leq v_{\text{до}}$ , когда  $X$  в представленном случае характеризует заданные исходные параметры поступающие в алгоритм, на основе которых осуществляется поиск оптимального закона управления подвижным составом, который обеспечивает лучшую характеристику  $Z$  (минимум расхода электроэнергии на тягу поездов  $A$  при фактических  $t_{\phi}$  и  $v_{\phi}$ , учитывая максимально допустимые отклонения скорости под конец участка  $v_{\text{до}}$  и отклонения по времени хода  $t_{\text{до}}$ .

Представленная модель, благодаря уточненным параметрам движения поезда смогла снизить расход электроэнергии на тягу поездов на 3%, в сравнение с обычной моделью без уточняющих параметров.

В работе А.В. Климовича [29-34] описан алгоритм построения оптимального графика движения подвижного состава на участке, представленный рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Схема алгоритма для построения оптимального графика движения подвижного состава [30]

Данный алгоритм позволит реализовать поиск оптимальной траектории движения, которая стремится к минимизации расхода электроэнергии на тягу поездов и алгоритм сориентирован на использование следующей целевой функции, которая представлена в виде:

$$J = \frac{gm(\omega(M_s[v]) + c_\omega D_s[v])l_{NM}}{\eta_{cp}}, \quad (3.26)$$

где  $\eta_{cp}$  – средневзвешенный коэффициент полезного действия подвижного состава;

$M_S[v], D_S[v]$  – математическое ожидание и дисперсия скорости движения;

$\omega$  – удельное сопротивление движению;

$c_\omega$  – постоянный коэффициент;

$l_{NM}$  – расстояние участка.

Из представленного алгоритма следует, что это изменённый метод динамического программирования. Изначально задаются основные закономерности для возможности построения энергооптимальной траектории движения поезда. Затем рассматриваются все участки разгона и торможения состава на станциях, где начинается движение и завершается. Основные закономерности отображены в одном из научных трудов [29]. На втором этапе строится энергооптимальная траектория движения поезда на фрагментах участка, невозможно поддерживать постоянную скорость движения поезда, к таким участкам можно отнести так называемые вредные подъемы и критические спуски. На третьем этапе строится энергооптимальная траектория движения на участках, где подвижной состав

Систематизируем описанные алгоритмы выше в сводную таблицу 3.3.

Проанализировав работы других учёных, можно прийти к следующему выводу:

- оптимизация графика движения поездов (поиск оптимальной траектории движения), остаётся актуальной задачей и что за счёт совершенствования алгоритмов расчёта открываются новые возможности решения данной задачи;

- в трудах для поиска минимума функции в основном используются принцип максимума Понтрягина, динамического программирования Белмана, нелинейное программирование;

- для повышения точности построения оптимального графика движения поездов необходимо учитывать внешние ограничения инфраструктуры, а также в реальном времени учитывать режимы ведения соседних участников движения.

Таблица 3.3 – Сравнение алгоритмов для оптимального управления подвижным составом

№ п/п	Работа	Краткое описание, особенности	Достоинства	Недостатки
1	[12]	- Создание программы для эффективного управления движением поезда, включающей в себя применение рекуперативного торможения	1) Уточнение параметров движения	
1	[12]	- Алгоритм оптимального управления, разработанный на основе принципа максимума Понтрягина с учетом ограничений, а также исследуется возможность использования динамического программирования. - Подробный разбор режимов управления поезда и всевозможные случаи их переключения. - Рассматривается не единичный критерий оптимальности, а комплексный критерий оптимизации, учитывающий не только расход электроэнергии, но и количество возможных переключений режимов. Этот критерий имеет следующую форму: $A^* = \sum_{i=1}^m (\Delta A_i + \lambda_1 T_i + \lambda_2 \Delta M_i)$	2) Обеспечение высокой точности координат для переключения режимов управления;	1) Отсутствие реализации использования алгоритма в режиме реального времени; 2) Алгоритм не принимает во внимание текущие параметры соседних поездов; 3) Подход не учитывает возможности инфраструктуры (загруженность подстанций);
2	[48-49]	- Алгоритм оптимизация на основе численной реализации в виде модулей; - Задача оптимизации решается с использованием принципа максимума Понтрягина для множества допустимых управлений в каждом моменте переключения режимов, а также классическим методом вариационного исчисления; - Критерий оптимальности записывается в следующей форме:	1) Скорость выполнения расчёта (от 3 до 12 с. рассчитывается до 300 км участка); 2) Исполнение алгоритма в режиме реального времени;	1) Отсутствие реализации использования алгоритма в режиме реального времени; 2) Подход не учитывает возможности инфраструктуры (загруженность

Продолжение таблицы 3.3

№ п/п	Работа	Краткое описание, особенности	Достоинства	Недостатки
2	[48-49]		1) Подтверждена эффективность систем	подстанций
3	[90]	$\frac{A}{A^*} - 1 < \frac{K(v^*)}{s_1 - s_0} \int_{s_0}^{s_1} \Delta^2(s) ds$ <p>- Создана имитационная модель движения подвижного состава в виде программно-алгоритмического комплекса, отражающая основные функциональные взаимосвязи системы автоведения с внешними факторами;</p> <p>- Задача оптимального управления решается с использованием методов нелинейного программирования и случайного поиска;</p> <p>- За критерий оптимальности принимают:</p> $E = At_{\phi} / t_3$	<p>1) Уточнение параметров движения (сопротивление движению, масса состава, коэффициент сцепления);</p> <p>2) Скорость выполнения расчёта (менее 0.5 с. для 30 км пути);</p> <p>3) Исполнение алгоритма в режиме реального времени;</p>	<p>1) Алгоритм не принимает во внимание текущие параметры соседних поездов;</p> <p>2) Подход не учитывает возможности инфраструктуры (загруженность подстанций);</p> <p>3) Отсутствие реализации использования алгоритма в режиме реального времени;</p>
4	[27]	<p>- Алгоритм расчёта оптимального графика движения подвижного состава, который основывается на применении целевой функции;</p> <p>- Представленный алгоритм является модернизацией метода динамического программирования;</p>	<p>1) Простота использования методики;</p> <p>2) Объём памяти для вычисления ЭВМ требуется в 2 раза меньше памяти;</p>	<p>1) Алгоритм не принимает во внимание текущие параметры соседних поездов;</p>

## Окончание таблицы 3.3

4	[27]	<p>- Критерий оптимальности записывается в следующем виде:</p> $J = \frac{gm(\omega(M_S[v]) + c_\omega D_S[v])l_{NM}}{\eta_{cp}}$	<p>1) Алгоритм не учитывает возможности инфраструктуры (загруженность подстанций); 2) Отсутствие реализации использования алгоритма в режиме реального времени;</p>
---	------	---	---

Проанализировав работы других учёных, можно прийти к следующему выводу:

- оптимизация графика движения поездов (поиск оптимальной траектории движения), остаётся актуальной задачей и что за счёт совершенствования алгоритмов расчёта открываются новые возможности решения данной задачи;

- в трудах для поиска минимума функции в основном используются принципы максимума Понтрягина, динамического программирования Белмана, нелинейного программирования;

- для повышения точности построения оптимального графика движения поездов необходимо учитывать внешние ограничения инфраструктуры, а также в реальном времени учитывать режимы ведения соседних участников движения.

Совершенствование алгоритма представлено в следующей главе.

### 3.2. Разработка алгоритма к системе автоматизированного управления магистральным электровозом

В данном разделе рассмотрен оптимизационный алгоритм [7, 83, 111], предъявляемый к системе автоведения. Представлена целевая функция

оптимизации для построения оптимального графика движения поезда. На основе описанного алгоритма построен оптимальный график движения. Алгоритм представлен на рисунке 3.7.

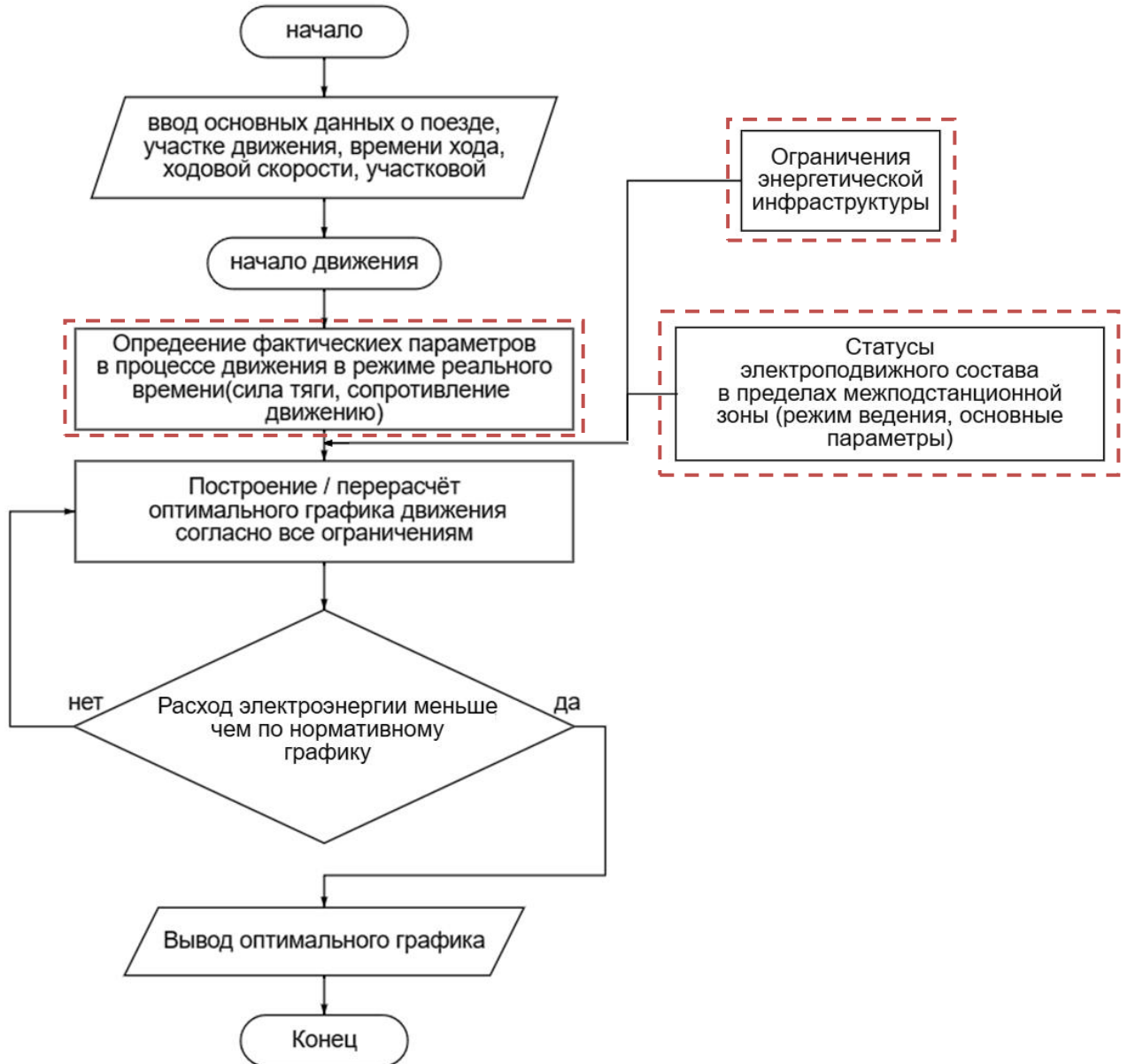


Рисунок 3.7 – Алгоритм системы автоматизированного управления магистральным электровозом

При разработки алгоритма, добавлены авторские блоки, которые выделены пунктиром (блок ограничений энергетической инфраструктуры, блок учитывающий статусы электроподвижного состава в пределах межподстанционной зоны, блок определения фактических параметров

движения). Из представленного выше алгоритма видно, что ключевыми блоками здесь являются: блок определения фактических параметров, блок построения/перерасчёта оптимального графика движения поездов согласно всем ограничениям и затем блок сравнения построенного графика движения с нормативным графиком движения задаваемым службой движения. Если построенный график имеет меньший расход электроэнергии на тягу поезда или равный предложенному графику движения от движущихся поездов, поезд начинается двигаться по построенному графику. В ином случае, алгоритм возвращается на шаг назад и выполняет перерасчёт основных параметров. Основные задаваемые ограничения рассмотрены в разделе 3.3.

Особенностью указанного алгоритма наряду с прочим является учет ограничений мощности системы тягового электроснабжения на основе данных мгновенной загрузки тяговых подстанций и напряжений на токоприемнике электровоза рассматриваемой межподстанционной зоны.

Оптимизационные расчёты и построение оптимальной траектории движения выполнено в среде *Mathcad 14*. Данная среда позволяет оперативно рассчитать минимум целевой функции через метод *minimize*. Рассмотрим процесс реализации.

### 3.2.1. Критерий оптимальности и целевая функция

В настоящее время можно выделить несколько общепринятых критериев оптимальности [29, 54]: максимальная пропускная способность участка, минимизация механической работы локомотива, минимизация расхода электрической энергии на тягу поезда, минимизация приведённых затрат на перевозки.

При заданном пройденном расстоянии поезда по перегону в качестве критерия оптимальности принимаем расход энергии на тягу электровоза [29]:

$$A_{\text{э}} = \frac{m_c}{\eta_T \cdot \xi} \int_{S_H}^{S_k} [u_f \cdot f_{\text{max}}(v)] ds, \quad (3.27)$$

где  $\eta_{\text{ТГ}}$  – коэффициент полезного действия подвижного состава в режиме тяги;

$f_{\text{max}}(v)$  – удельное значение силы тяги, н/кН;

$m_c$  – масса состава, т;

$S_k, S_n$  – начальная и конечная координата поезда, км;

$\xi$  – переводной коэффициент;

Ограничение на управление задаётся следующим неравенством:

$$\begin{cases} 0 \leq u_f \leq 1; \\ 0 \leq u_b \leq 1; \\ 0 \leq u_r \leq 1; \\ u_f \cdot u_r = 0. \end{cases} \quad (3.28)$$

Ещё несколькими ограничениями непосредственно для целевой функции выступают:

– ограничение удельной силы тяги в каждый момент времени:

$$a \leq f_y \leq b \quad (3.29)$$

где  $a, b$  – граничные значения удельной силы тяги для  $f_y$ ;

– ограничение по основному уравнению движения поезда во второй форме :

$$\frac{v_k(v_k + v_n)}{s_k + s_n} = (f_y - w) \frac{\xi}{(1 + \lambda)}, \quad (3.30)$$

где  $w$  – удельное значение сопротивления движения поезда, н/кН;

$f_y$  – удельное значение силы тяги поезда, н/кН;

$\xi$  – переводной коэффициент;

$(1 + \lambda)$  – коэффициент инерции вращающихся частей;

$S_k, S_n$  – начальная и конечная координата поезда, км;

$v_k, v_n$  – начальная и конечная скорость поезда для каждого момента времени, км/ч.

– ограничение времени хода подвижного состава:

$$T_{XII} = \int_{S_H}^{S_k} \frac{1}{v} ds, \quad (3.31)$$

В качестве ограничений со стороны системы тягового электроснабжения выступают токи фидеров в пределах межподстанционной зоны, а также минимальное значение напряжения на токоприёмнике:

$$\begin{cases} I_{\phi \max} > I_{\text{факт}} \\ U_{T \min} < U_{T\text{-факт}} \end{cases}, \quad (3.32)$$

где  $I_{\phi \max}$  – максимальное напряжение на фидерах тяговых подстанций;

$I_{\text{факт}}$  – фактическое значение на фидерах тяговых подстанций;

$U_{T \min}$  – минимальное значение напряжения на токоприёмнике магистрального электровоза;

$U_{T\text{-факт}}$  – фактическое значение напряжения на токоприёмнике магистрального электровоза.

Общий подход заключается в определении коэффициентов, определяющих управляющие воздействия согласно уравнению движения поезда:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{1}{V} \cdot [u_f \cdot f_{\max}(v) - u_b \cdot b_{T \max}(v) - u_r \cdot r_{\max}(v) - \omega(v) - g(s)] \quad (3.33)$$

Таким образом, оптимизационная задача звучит следующим образом: для выбранного объекта управления электровоза, заданного уравнением движением поезда (3.33), необходимо найти такие управляющие воздействия  $x_1$ , для которых присутствуют ограничения (3.28, 3.29, 3.30, 3.31, 3.32), что бы минимизировать выбранный критерий оптимальности (3.27).

В процессе выполнения расчёта рассматривалось несколько вариантов событий:

- кривая скорости движения построена по фактическим данным, полученным с РПДА-Г магистрального электровоза;

- кривая скорости движения построена согласно правилам тяговых расчётов;

- кривая скорости построена согласно уточненным фактическим значениям сил тяги, сопротивления движению и эквивалентной массы состава.

Уточнённое сопротивление движения для второго случая представлено на рисунке 3.8.

Рассмотрим кривые скорости движения для описанных выше вариантов, представленные на рисунке 3.8. За основу взят участок разгона Алтайская – Артышта 2 протяжённостью 2.6 км.

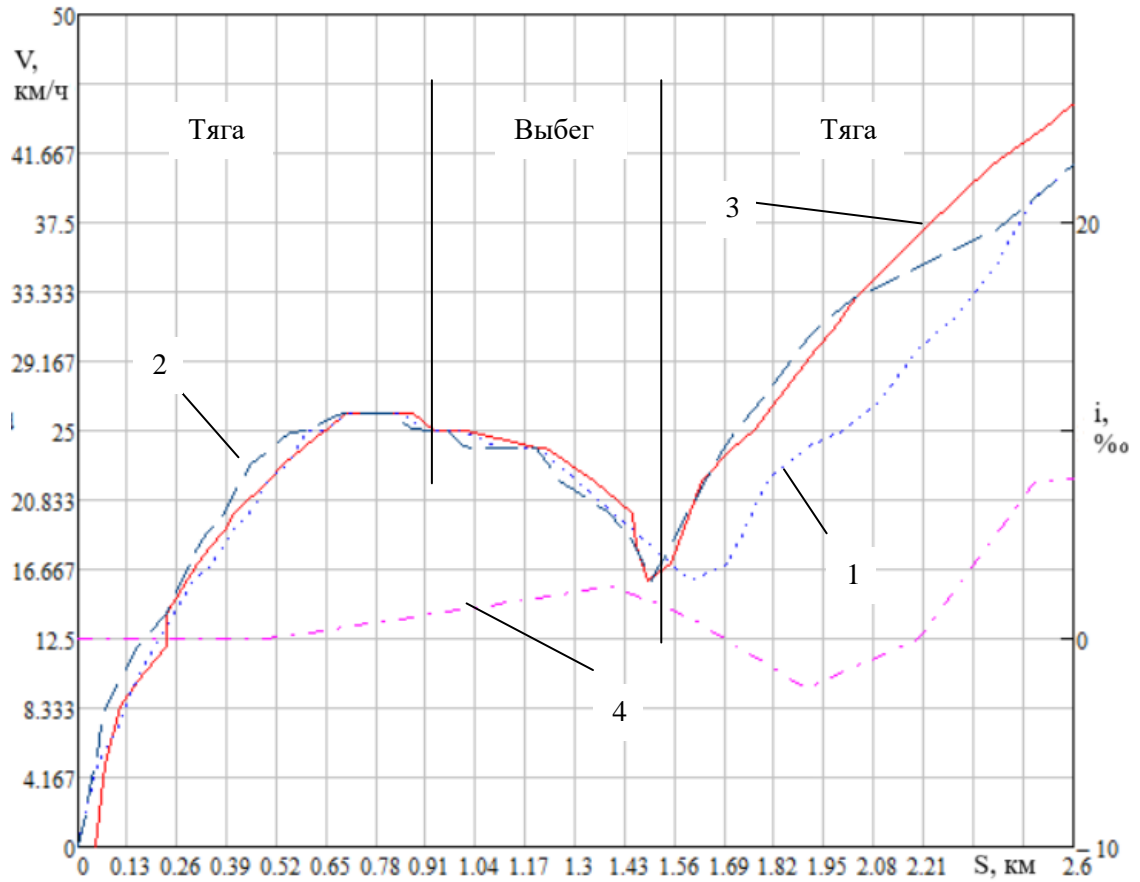


Рисунок 3.8 – Энергооптимальная траектория движения  
1 – по РПД файлам, 2 – расчёт согласно ПТР, 3 – по фактическим  
определённым данным, 4 – профиль пути

Более детально рассмотрим участки разгона (участки до выбега и после него). На рисунке 3.9 представлен участок разгона с 0 до 25 км/ч.

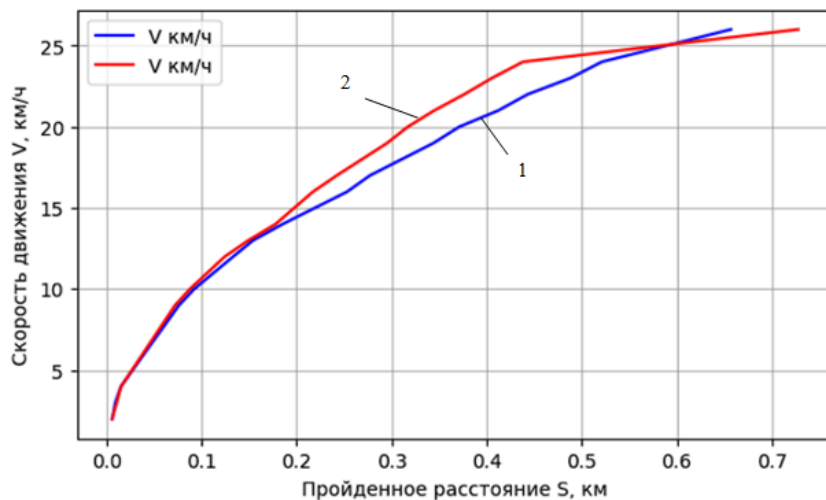


Рисунок 3.9 – Кривая скорости движения  
1 – по РПД файлам, 2 – по фактическим определённым данным

Из рисунка видно, что вторая линия, которая получена по фактическим параметрам имеет сходимость в начале движения и затем происходит незначительное увеличение скорости движения. В итоге обе линии пересекутся на скорости 25 км/ч. Более быстрый набор скорости позволяет нам экономить электроэнергию на тягу поезда. В данном случае, сравнивая расход электроэнергии на тягу через совершённую механическую работу, получаем следующие значения: 1 кривая – расход 83,83 кВт·ч, 2 кривая – расход 83,2 кВт·ч. Снижение расхода электроэнергии на тягу составило 0.7%, что подтверждает эффективность использования фактически определённого сопротивления движению поезда.

На рисунке 3.10 представлен участок разгона после использования режима выбега со скорости 16 до 45 км/ч. Протяжённость данного участка составляет 1.2 км.

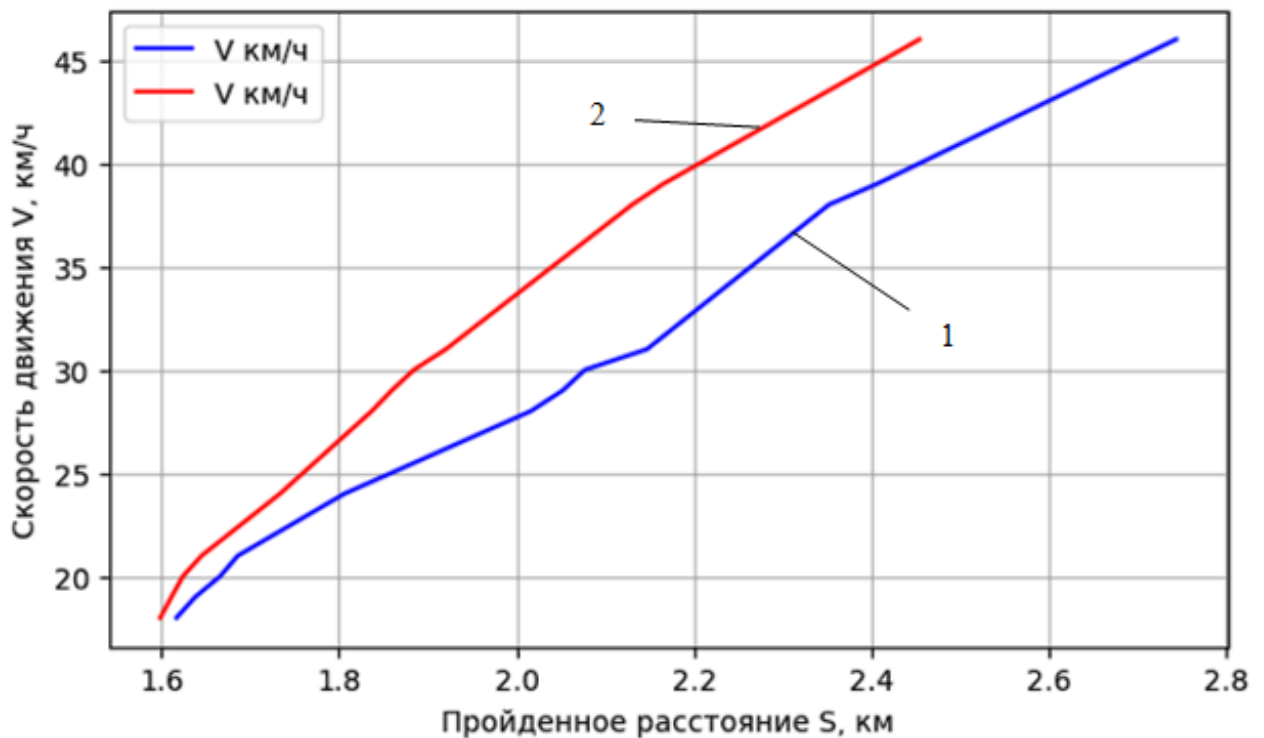


Рисунок 3.10 – Кривая скорости движения

1 – по РПД файлам, 2 – по фактическим определённым данным

Из рисунка следует, что на данном участке разгона после выбега, заметно, явное различие у кривых. При движении по второй траектории, которая построена по фактическим значениям сопротивления движению видно, что поезд преодолеет меньшее расстояние, чтобы выйти на требуемую

скорость, в сравнении с кривой скорости под номером один. Снижение расхода электроэнергии на тягу поезда на данном участке составляет примерно 0.9%. В большей степени это реализовано за счёт большего ускорения. Увеличение ускорения приводит к меньшему расходу электроэнергии на тягу, данное утверждение подтверждено во многих трудах [69]. А также, в данных трудах пишется о том, что для грузового движения ускорение не играет значительной степени. Но на данном примере заметно, что при соблюдении всех условий по максимально допустимой скорости на данном участке и максимально допустимому ускорению, появляется возможность сэкономить значительный процент электроэнергии.

В таблице 3.4 сведём полученные показатели выполненных расчётов.

Таблица 3.4 – Основные показатели

Кривая скорости движения	Время хода по участку, мин	Техническая скорость, км/ч	Расход электроэнергии, кВт·ч	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч / 10·ткм
2 – по ПТР	7,1	21,34	168,7	154,13
3 – по фактическим данным	7,1	22,91	165,3	151,66

Из таблицы 3.4 следует, что график движения построенный по фактическим определённым данным показал снижение удельного расхода электроэнергии примерно на 1,6%. При данном графике незначительно возросла техническая скорость по участку.

На рисунке 3.11 построим график движения участок пути протяженностью 5 км. В таблицу 3.5 сведём полученные показатели расчёта.

Из таблицы 3.5 следует, что график движения, построенный по фактическим определённым данным показал снижение удельного расхода электроэнергии примерно на 2,2%. При данном графике незначительно возросла техническая скорость по участку и снизилось время хода поезда [7].

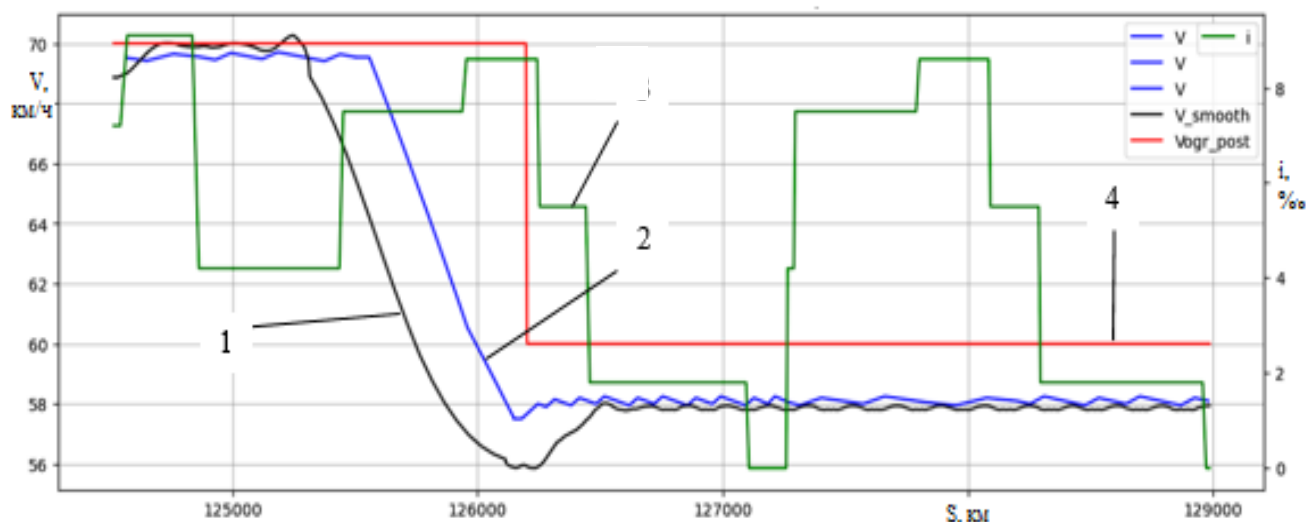


Рисунок 3.11 – Энергооптимальная траектория движения

1 – расчёт ПТР, 2 – расчёт с уточненным сопротивлением движением и эквивалентной массы состава, 3 – профиль пути, 4 – ограничения скорости

Таблица 3.5 – Основные показатели

Кривая скорости движения	Время хода по участку у, мин	Техническая скорость, км/ч	Расход электроэнергии, кВт·ч	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч / 10·ткм
1 – по ПТР	5,57	61,8	435	237,14
2 – по фактическим данным	5,31	62,2	413	231,13

Рассмотрим реализацию режима выбега. Из рисунка 3.8 видно, что выбег завершился немного раньше, чем, было в реальной поездке, но также он схож с кривой скорости выбега по расчётам ПТР. Схожесть с расчётами ПТР можно объяснить тем, что в обоих случаях задавалась одинаковое значение эквивалентной массы состава. На рисунке 3.12 выбег начался позже и закончился на другой скорости (в отличии от расчёта согласно ПТР).

Скорость в конце выбега будет зависеть от определённого значения эквивалентной массы состава, и от данной эквивалентной массы будет зависеть длина пройденного пути и изменение скорости движения в режиме

выбега. Данное расстояние можем определить через запасенную кинетическую энергию поезда по следующим формулам (3.34, 3.35, 3.36):

$$E_k = \frac{(1 + y) \cdot m \cdot 1000 \cdot V_k^2}{2}, \quad (3.33)$$

где  $m$  – масса состава, т;

$V_k$  – скорость движения поезда в момент перед выбегом, км/ч;

$(1 + y)$  – коэффициент инерции вращающихся частей.

$$L = \frac{G \cdot 1000 \cdot V_k^2}{m_c \cdot g \cdot (w_o + w_i)}, \quad (3.34)$$

где  $G$  – эквивалентная масса состава, т;

$w_o, w_i$  – удельное основное сопротивление движению и сопротивление от уклона пути Н/кН;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

$$V_k = \sqrt{\left(\frac{V_n^2}{3.6}\right) - 2\left(\frac{w_o + w_i}{1000 \cdot G}\right) \cdot L}, \quad (3.35)$$

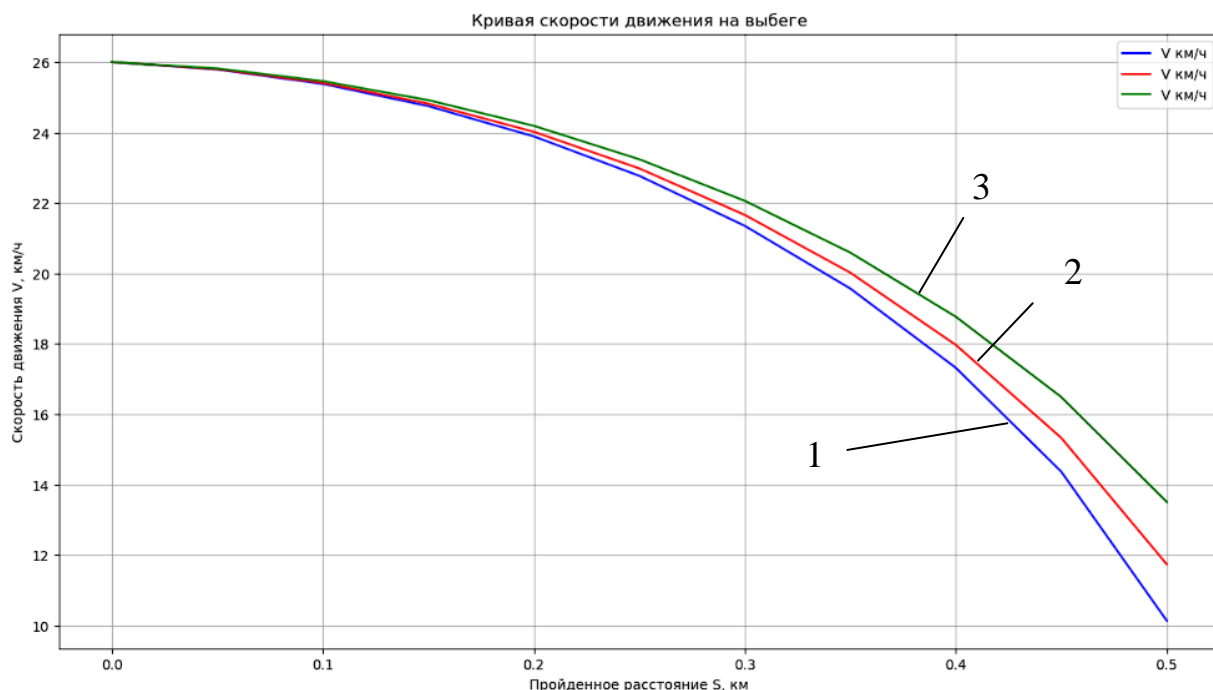
где  $L$  длина выбега, км;

$V_n$  – скорость движения поезда в момент перед выбегом, км/ч;

На рисунке 3.12 показано изменение скорости движения в конце выбега в зависимости эквивалентной массы состава. Из рисунка видно, что при изменении эквивалентной массы состава, которая показывает нам меру инертности поезда, зависит конечная скорость после режима выбега. Чем больше масса, тем на большей скорости у нас завершится выбег. Третьей линии соответствует эквивалентная масса состава 6000 тонн (выбег закончится примерно на 13.7 км/ч), второй линии тонн (выбег закончится примерно на 12 км/ч), а первой линии 5100 тонн (выбег закончится примерно на 10 км/ч).

Можно сделать вывод, что выполненный тяговый расчёт по фактическим определённым параметрам сопротивления движению и эквивалентной массы состава имеет статическую сходимость с выполненным тяговым расчётом, согласно ПТР. Выполненные расчёты показали эффективность использования фактических определённых параметров в процессе движения (силы тяги, сопротивления движению, эквивалентной массы состава). За счёт использования данных параметров снижается удельный расход электроэнергии на от 1,1 до 4,5%. Также незначительно

повышается техническая скорость поезда по участку и снижается время хода. За счёт определения эквивалентной массы состава (показывает меру инертности поезда) можно точнее определить запас кинетической энергии поезда для дальнейшего её использования в режиме выбега.



1 – при эквивалентной массе состава 5100, 2 – при эквивалентной массе состава 5500, 3 – при эквивалентной массе состава 6000

Рисунок 3.12 – Кривая скорости движения в режиме выбега при различных значениях эквивалентной массы состава

Технические требования, предъявляемые к современной системе автоведения поезда с учётом предлагаемых подходов, будут представлены в следующей главе.

### 3.3. Выводы

1) Разработан алгоритм автоматизированного управления магистральными электровозами, учитывающий фактические параметры движения поезда (сопротивление движению) и внешние факторы (ограничения энергетической инфраструктуры, статусы электроподвижного состава на межподстанционной зоне).

2) Получены результаты построения энергооптимальных траекторий в режиме автоведения поезда по минимуму расхода

электроэнергии на тягу поездов на рассматриваемом участке, учитывающей фактические параметры движения поезда и внешние факторы. Реализация автоматизированного управления движением поезда на основе фактических параметров сопротивления движению поезда, определяемых предлагаемым способом, позволяет снизить удельный расход электроэнергии на расчетном участке на 1,6%.

## **4. АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.1. Общие сведения об эксперименте**

Для апробации предлагаемых решений, выбран участок Западно-Сибирской железной дороги между станциями Алтайская – Артышта 2, а именно межподстанционная зона Шпагино-Смазнево (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

В процессе эксперимента происходил сбор данных (тягового-энергетические характеристики) с грузовых поездов которые движутся по заданному участку, на которых установлено разработанное интеллектуальное электронное устройство. Представленное устройство реализует управляющие воздействия на грузовой электровоз, учитывая режим ведения соседних участников движения (других электровозов) в режиме реального времени. Формирование управляющих воздействий достигается за счёт измерения основных параметров электроподвижного состава (ток, напряжение, мощность и др.), а также за счёт измерения параметров фидеров контактной сети тяговых подстанций [67, 78, 82].

План проведения эксперимента по времени:

- 1 декабря 2022 г. в депо Карасук на электровозы ВЛ80с №1738 и №1831 установлено оборудование ОмГУПС для измерения основных параметров электровоза и передачи данных (токов якоря, напряжения поезда) на облачный сервер по беспроводным каналам связи (рисунок 4.1, 4.2).

- 2 декабря 2022 г. измерительные устройства устанавливались на участке на тяговых подстанциях Смазнево и Шпагино. Измерялись основные параметры подстанций (рисунок 4.3): токи и мощности фидеров, напряжение на шинах.

- 3 декабря 2022 г. на станции Алтайская электровозы ВЛ80с №1738 и №1831 направлены под поезда.

Поезда проследовали друг за другом до станции Артышта-2. Извлечены картриджи с регистраторов параметров движения для расшифровки. (время московское)

Таблица 4.1 - Локомотив ВЛ80С 240 1738 1 Дорога 83 Депо 10

Секции: 17381 17382 Оборудован АВ, СИМ, ИСАВП-РТ-М									
Алтайская	122	2 дек	07:30	ТЧ71	После ТО-2	70 ч.	05591	8307	03:30
-"-	105		03:34	ТЧ71	После ТО-2	90 ч.			
-"-	114		03:44	ТЧ71	После ТО-2	90 ч.	01776	8307	03:30
-"-	103		04:11		После ТО-2	91 ч.		-"-	
опАлтПл	О		05:17	2012	8400 599 8500		ДОРОФЕЕВ		03:30
Укладочный	С		05:33	2012	-"-		-"-		-"-
<b>Шпагино</b>	<b>П</b>		<b>06:20</b>	<b>2012</b>	-"-		-"-		-"-
-"-	О		<b>09:06</b>	<b>2012</b>	-"-		-"-		-"-
Батунная	С		09:33	2012	-"-		-"-		-"-
Заринская	С		09:43	2012	-"-		-"-		-"-
<b>Смазнево</b>	<b>С</b>		<b>10:09</b>	<b>2012</b>	-"-		-"-		-"-
Голуха	С		10:29	2012	-"-		-"-		-"-
Тягун	С		10:57	2012	-"-		-"-		-"-
Аламбай	С		11:24	2012	-"-		-"-		-"-
Артышта-2	П		11:57	2012	-"-		-"-		-"-

Таблица 4.2 - Локомотив ВЛ80С 240 1831 1 Дорога 83 Депо 10

Секции: 18311 18312 Оборудован АВ, СИМ, ИСАВП-РТ-М									
Алтайская	122	2 дек	07:30	ТЧ71	После ТО-2	22 ч.	05591	8307	03:30
-"-	105		03:34	ТЧ71	После ТО-2	42 ч.			
-"-	114		03:39	ТЧ71	После ТО-2	42 ч.	05436	8307	03:35
-"-	103		05:24		После ТО-2	44 ч.		-"-	
опАлтПл	СФ		05:45	4402	0001 003 8627		ДОРОГАЙКИН		03:35
-"-	О		05:54	4402	-"-		-"-		-"-
Укладочный	П		06:07	4402	-"-		-"-		-"-
-"-	102		06:08		После ТО-2	44 ч.	05436	8307	03:35
Укладочный	О		08:31	2014	8400 601 8500		ДОРОГАЙКИН		03:35
<b>Шпагино</b>	<b>П</b>		<b>09:07</b>	<b>2014</b>	-"-		-"-		-"-
-"-	О		09:14	2014	-"-		-"-		-"-
Батунная	С		09:45	2014	-"-		-"-		-"-
Заринская	С		09:55	2014	-"-		-"-		-"-
<b>Смазнево</b>	<b>С</b>		<b>10:21</b>	<b>2014</b>	-"-		-"-		-"-
Голуха	С		10:43	2014	-"-		-"-		-"-
Тягун	С		11:08	2014	-"-		-"-		-"-
Аламбай	С		11:35	2014	-"-		-"-		-"-
Артышта-2	П		12:29	2014	-"-		-"-		-"-

Данные с электровозов и тяговых подстанций записаны. Данные с регистраторов параметров движения расшифрованы.

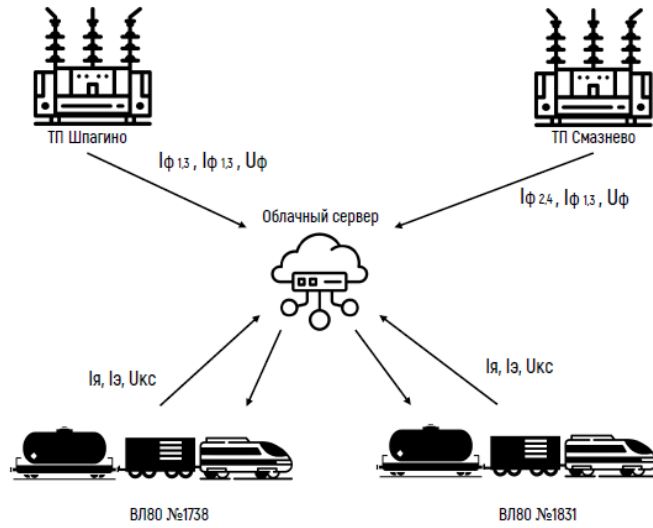


Рисунок 4.1 – Схема передачи данных



Рисунок 4.2 – Измерительное и коммуникационное оборудование на электровозе

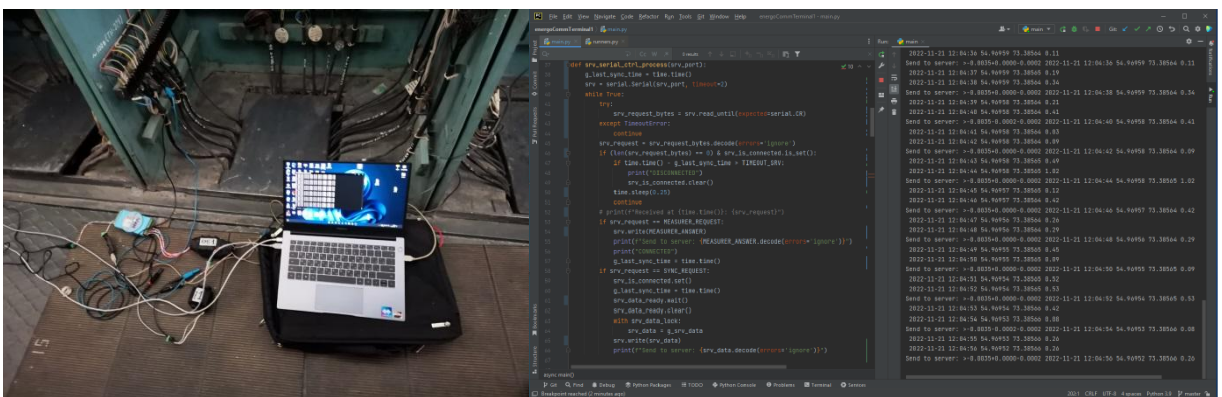


Рисунок 4.3 – Измерительное, коммуникационное оборудование на подстанции и окно с данными

## 4.2. Описание использованного оборудования

На электровозах устанавливалось интеллектуальное электронное устройство (ИЭУ). В основе ИЭУ, устанавливаемого на ЭПС, заложены компоненты и блоки согласно структурной схеме (рисунок 4.4).

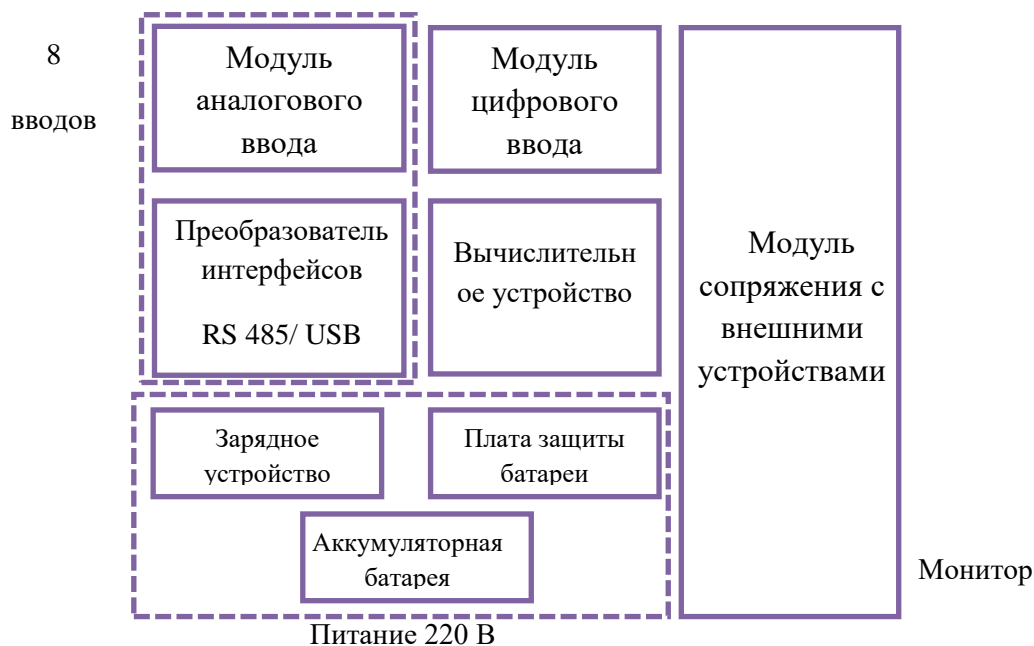


Рисунок 4.4 – Структурная схема взаимодействия компонентов и блоков ИЭУ

На рисунке 4.5 представлен общий вид устройства, которое собрано из представленных выше основных компонентов.

Во время выполнения экспериментальных работ на подстанциях и электровозах было использовано следующее измерительное и коммуникационное оборудование:

- ADAM-4017-D2E Модуль ввода, 8 каналов аналогового ввода, Modbus ASCII Advantech;
- преобразователь интерфейса USB-RS485;
- GPRS терминал (промышленный роутер) TELEOFIS WRX768-L4;
- модуль расчёта среднеквадратичного значения AD637;
- датчик постоянного тока АНКС-КАА ACREL;
- GPS треккер SMART S-2412;
- измерительные клещи CPR-1000 CIRCUTOR.



Рисунок 4.5 – Интеллектуальное электронное устройство. Общий вид

Рассмотрим основные технические характеристики оборудования.

1) ADAM-4017 – 16-битный модуль с 8 каналами аналогового ввода с программируемыми диапазонами входных сигналов для всех каналов (рис. 4.6, таблица 4.1).



Рисунок 4.6 – Общий вид

Таблица 4.3 – Технические характеристики

Конструкция ADAM-4017+	Модуль с последовательным интерфейсом
Тип интерфейса	RS-485
Скорость передачи данных ADAM-4017+	1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 Бит/сек
Максимальная длина линии связи	1200 м

## Продолжение таблицы 4.3

Протокол передачи данных	Совместим с протоколом ADAM-4000, Modbus
Количество каналов аналогового ввода ADAM-4017+	8 дифференциальных
Диапазоны биополярного сигнала по напряжению	-0.15...+0.15, -0.5...+0.5, -1...+1, -5...+5, -10...+10 В
Диапазоны биополярного сигнала по току	-20...+20 мА, 4...20 мА
Гальваническая изоляция ADAM-4017+	3000 В
Погрешность	0.1...0.1 %

2) Компактный преобразователь предназначен для взаимного преобразования сигналов интерфейсов USB и RS-485. Позволяет подключать к промышленной информационной сети RS-485 персональный компьютер, имеющий USB-порт (рисунок 4.7, таблица 4.4).

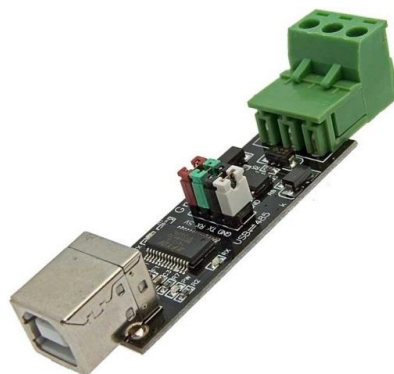


Рисунок 4.7 – Преобразователь интерфейсов

Таблица 4.4 – Технические характеристики

Поддержка	Win7/Vista/Xp/MAC/Linux
Чип	FT232RL+75176
Интерфейс	USB 2.0
Скорость передачи данных	300-9216000 бод
Дальность связи	1200м
Напряжение питания	5В

1) TELEOFIS WRX768-L4 — промышленный терминал оснащен интерфейсом RS-485 и встроенным микроконтроллером для автоматической дистанционной передачи данных с использованием технологий GPRS и CSD. Устройство имеет встроенный блок питания, который работает от сети

переменного тока 85-265В. Этот терминал предназначен для диспетчеризации различных приборов учёта и промышленных объектов, включая аварийные и охранные системы, котельное оборудование, а также вентиляционные и осветительные установки.



Рисунок 4.8 – Терминал WRX768-L4

#### **Основные функции и возможности терминала:**

Режимы работы: TCP-клиент и TCP-сервер. Поддержка одновременной работы в режимах "Клиент" и "Сервер".

Основной и служебный каналы GPRS могут быть настроены для работы с сервером TCP-соединений M2M24.ru. Этот сервер обеспечивает связь между узлами учёта, которые не могут получить внешний IP-адрес и работают в режиме TCP-клиента. Общие технические характеристики:

- GSM-модуль: Telit GL868-DUAL V3
- GSM-диапазон: 900/1800 МГц
- Выходная мощность 2Вт (EGSM900) и 1Вт (DCS1800)
- CSD: 9600 бит/сек
- GPRS class 10: до 85.6 кбит/с (DL), до 42.8 кбит/с (UL)
- Слот для SIM-карт (x2)
- Рабочая температура: -40...+70°C.

4) AD637 (рисунок 4.9) вычисляет истинное среднее квадратное или абсолютное значение любого сложного входного сигнала постоянного или переменного тока и дает эквивалентное выходное напряжение постоянного тока.

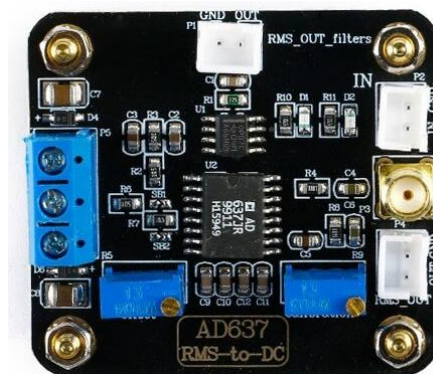


Рисунок 4.9 – AD637

Общие технические характеристики:

- Напряжение питания: от  $\pm 3$  В до  $\pm 18$  В постоянного тока;
- Полоса пропускания: 8 МГц (вход 2 В rms) 600 кГц (Вход 100 мВ rms);
- Точность обнаружения: Максимальная нелинейность 0.02%, входной гребневый коэффициент от 0 В до 2 В составляет 3;
- Дополнительная погрешность 0.10%.

5) Датчик АНКС-КАА АСREL (рисунок 4.10) предназначен для измерения постоянного тока основанный на эффекте Холла.



Рисунок 4.10 – Датчик тока

Общие технические характеристики:

- Номинальный входной постоянный ток 400-2000 А;
- Номинальный выходной постоянный ток 4-20 мА;
- Класс точности 1.0;
- Напряжение питания 24В (постоянное напряжение);

б) Трекер (рисунок 4.11) со встроенными ГЛОНАСС/GPS- и GSM-антеннами, без встроенной АКБ. Устройство позволяет подключать, как проводные, так и беспроводные датчики уровня топлива, а также беспроводные датчики температуры.



Рисунок 4.11 – Треккер

Таблица 4.5 – Технические характеристики

GSM/GPRS/Bluetooth	
Частотные диапазоны GSM	GSM 850, EGSM 900, DCS 1800, PCS 1900
GPRS класс	B, мультислот класс 12
Мощность передатчика	Класс 4 (2W) в GSM 850 и EGSM 900 Класс 1 (1W) в DCS 1800 и PCS 1900
Максимальная скорость передачи/приёма данных, кбит/с	85,6
Количество используемых SIM-карт	1
Bluetooth	есть, v.4.0
GNSS	
Поддерживаемые навигационные системы	ГЛОНАСС/GPS
Количество каналов:	сопровождения: 33, захвата: 99
Чувствительность (в лабораторных условиях)	по слежению: -167 дБм холодный старт: -149 дБм

7) Токоизмерительные клещи модели CP-5 (рисунок 4.12) от компании CIRCUTOR применяются для измерения переменного тока без разрыва цепи.



Рисунок 4.12 – Токоизмерительные клещи

Характеристики токоизмерительных клещей CP-5:

- Диапазон измерений: 0,5...5 А переменного тока
- Номинальная частота: 48 ... 65 Гц
- Выходн. напряжение: 2 В пер. тока
- Диэлектрическая прочность: 5200 В, 50 Гц, 1 мин.

8) Модуль MB110 (рисунок 4.13) предназначены для измерения аналоговых сигналов встроенными аналоговыми входами, преобразования измеренных величин в значение физической величины и последующей передачи этого значения по сети RS-485.



Рисунок 4.13 – Модуль MB110

Модуль MB110-224.8A имеет 8 каналов аналогового ввода. Аналоговые входы модуля могут работать в следующих режимах:

- измерение тока в диапазонах: 0-5 мА, 0-20 мА и 4-20 мА;
- измерение напряжения в диапазонах: -50 - +50 мВ, 0-1В, 0-5В, 0-10В.

Коммуникационные возможности MB110-224.8A.

- Модуль работает в сети RS-485 в режиме SLAVE по протоколам ОВЕН, ModBus-RTU, ModBus-ASCII или DCON;
- Максимальная скорость обмена - 115200 бит/с;

- имеется бесплатный OPC-драйвер и библиотека стандарта WIN DLL для подключения к SCADA-системам и контроллерам других производителей.

#### 4.2.1. Место установки и схема подключения оборудования

Проведение измерений осуществляется с помощью измерительных систем электрической энергии, подключаемых к соответствующим измерительным цепям тяговых подстанций (рисунок 4.14, 4.15).

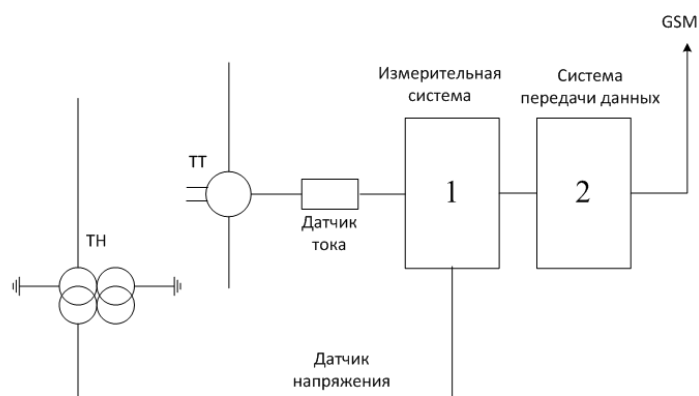


Рисунок 4.14 – Подключение измерительных систем электроэнергии к фидерам контактной сети подстанции

Для проведения эксперимента были заданы необходимые условия для его выполнения:

- нормальные условия работы тяговых подстанций;
- измерения всех параметров электровозов и тяговых подстанций (Шпагино, Смазнево) проходят при нормальной схеме секционирования контактной сети.

Электровозы, выделенные под проведение экспериментальных исследований были оснащены рабочими системами автоведения, а также регистраторами параметров движения поезда (РПДА). Движение электровозов по участку Алтайская – Артышта 2 между тяговыми подстанциями Шпагино, Смазнево заранее спланировано, для этого корректировался существующий график движения поездов. Расположение основного оборудования на тяговых подстанциях Шпагино, Смазнево и на электровозах серии ВЛ80С, а также точные места подключения изображены на рисунках 4.16-4.19.

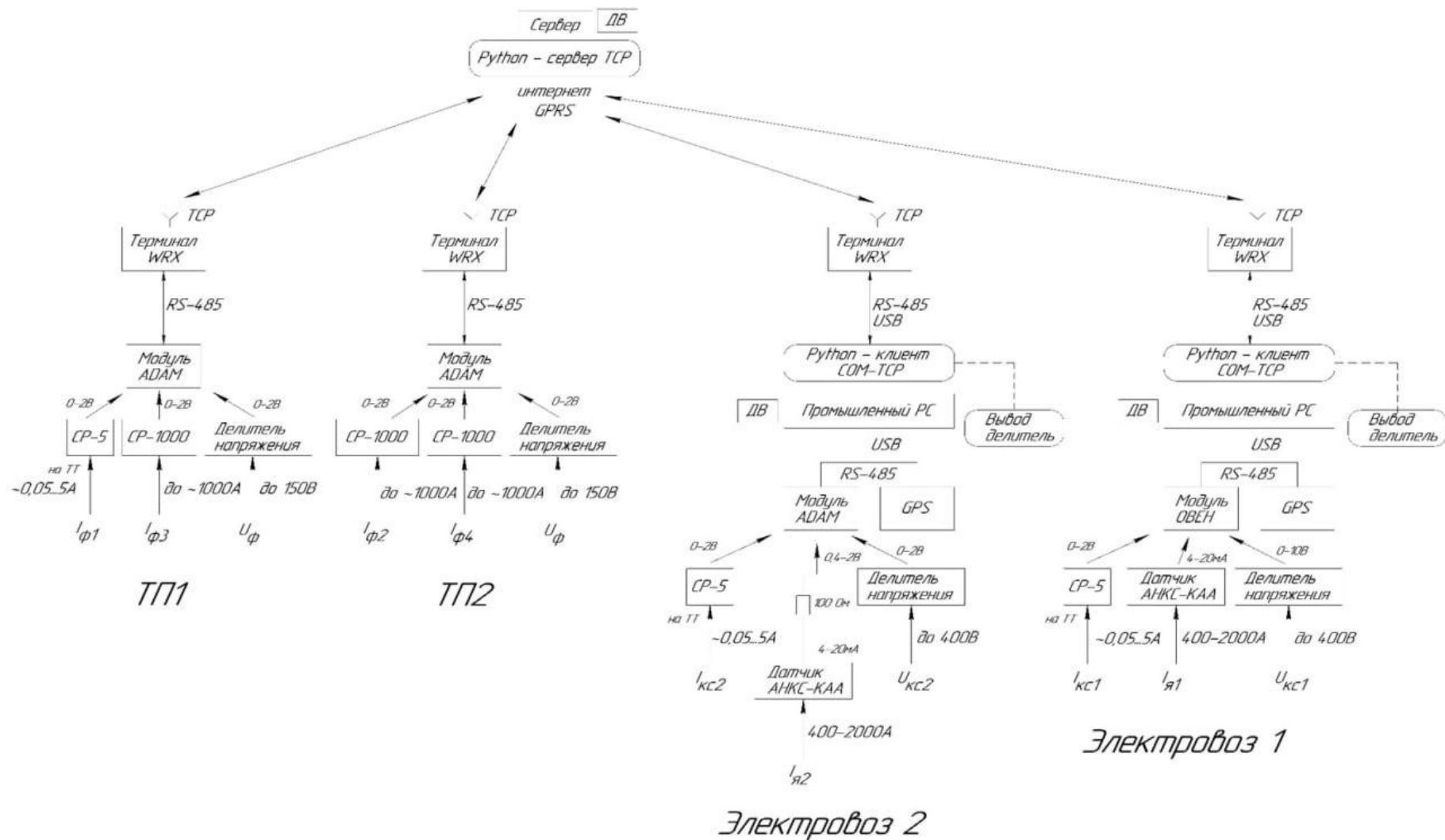


Рисунок 4.15 – Схемы измерительных и коммуникационных систем

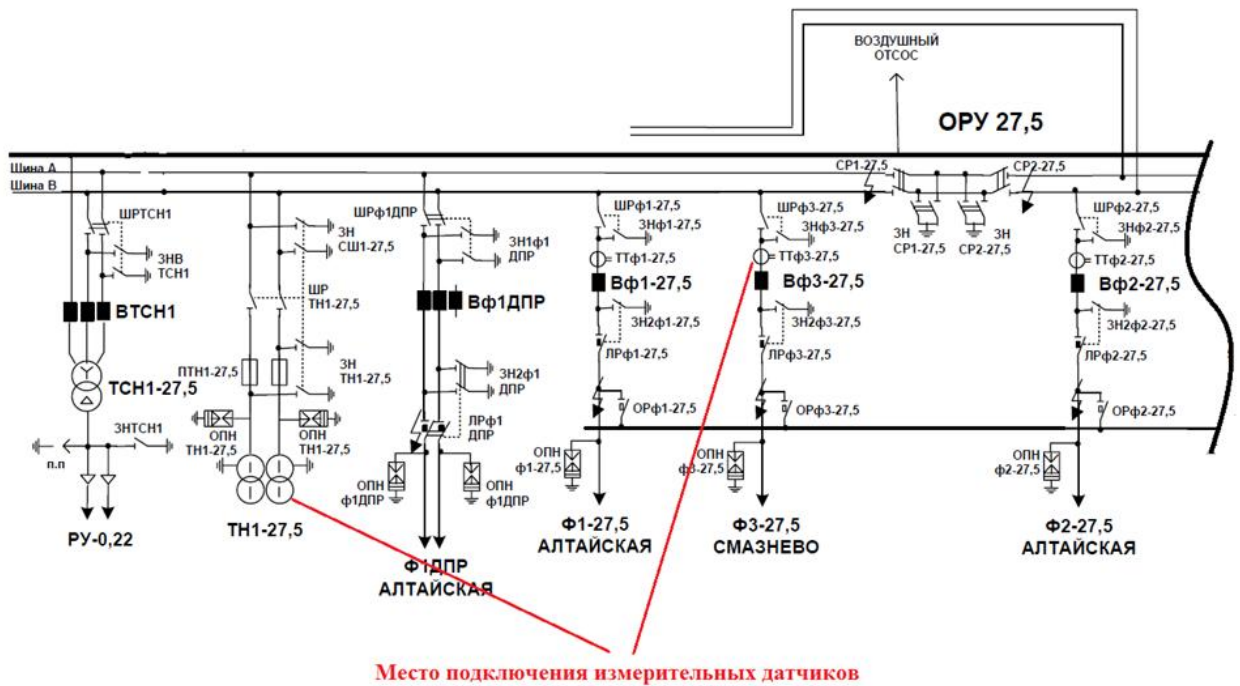


Рисунок 4.16 – Подключение измерительных систем электроэнергетики к фидерам контактной сети подстанции

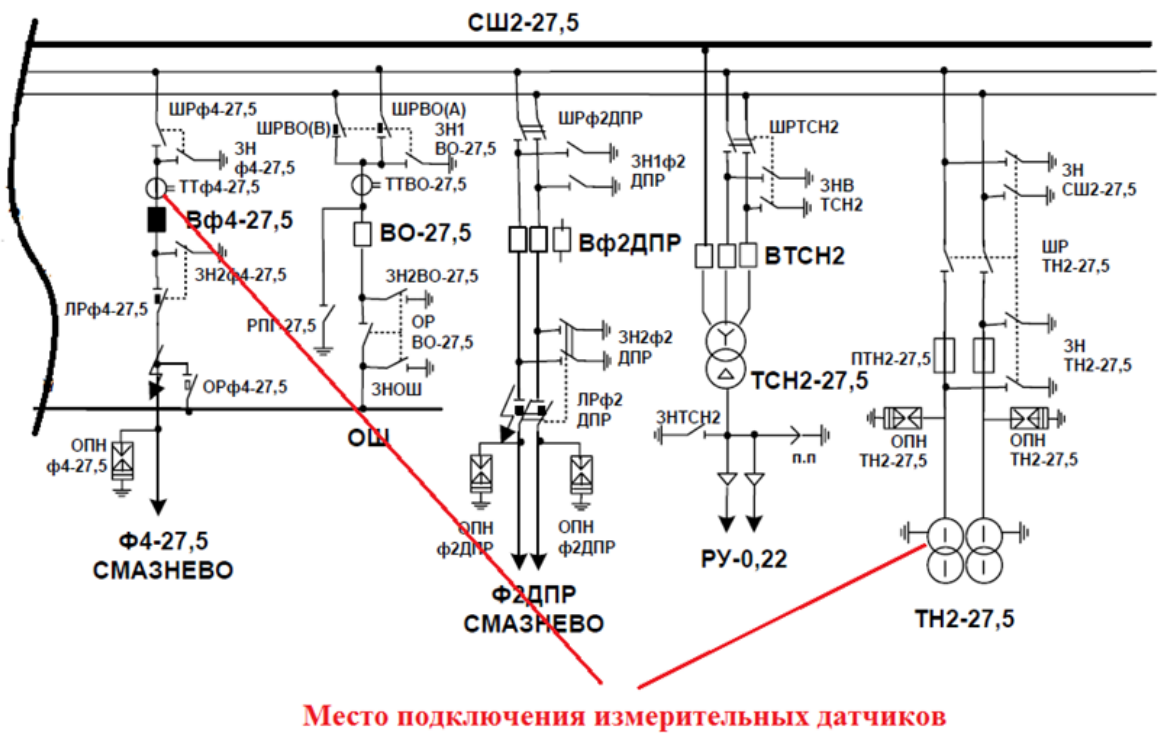


Рисунок 4.17 – Подключение измерительных систем электроэнергетики к фидерам контактной сети подстанции

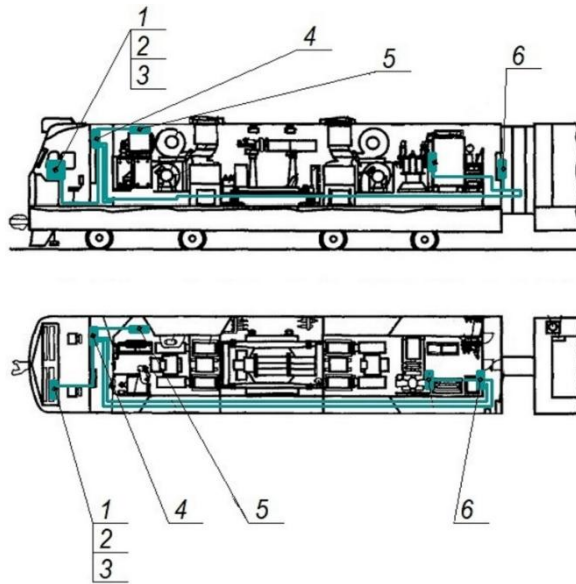


Рисунок 4.18 – Монтажная схема ВЛ80С

1 – интеллектуальное электронное устройство, 2 – GPS треккер, 3 – терминал WRX, 4 – модуль ADAM / MB110, 5 – датчик тока АНКС-КАА, 6 – измерительные клещи

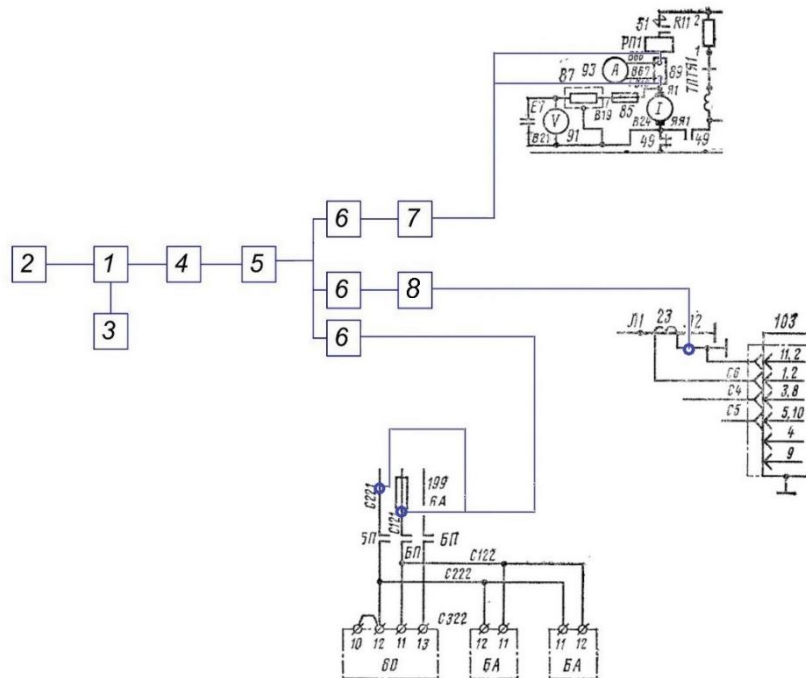


Рисунок 4.19 – Структурная схема подключения оборудования на электровоз

1 - интеллектуальное электронное устройство, 2 – терминал WRX, 3 – GPS треккер, 4 – преобразователь интерфейсов, 5 – модуль ADAM / MB110, 6 – модуль AD637, 7 – датчик тока АНКС-КАА, 8 – измерительные клещи

#### 4.2.2. Определяемые параметры

В процессе экспериментальных исследований определялись следующие параметры, представленные в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Определяемые параметры

Наименование	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пределы измерений	Перечень оборудования
1	2	3	4	5	6
Ия (ток якоря) (1 эл-воз.)	А	1500 / 4-20мА	2000	0-2000	Датчик тока АНКС-КАА / модуль МВ110.8а (ОВЕН)
Икс (ток контактной сети) (1 эл-воз.)	А	500/5А	750/7.5	0-500	Датчик тока СР-5 / модуль МВ110.8а (ОВЕН)
Укс (напряжение контактной сети) (1 эл-воз.)	В	380 /9.5В	400	До 400	Модуль МВ110.8а (ОВЕН) с делителем напряжения
Ия (ток якоря) (2 эл-воз.)	А	1500 / 4-20мА	2000	0-2000	Датчик тока АНКС-КАА / модуль АДАМ- 4017 (1)
Икс (ток контактной сети) (2 эл-воз.)	А	500/5А	750/7,5	0-500	Датчик тока СР-5 / модуль АДАМ-4017 (1)

Окончание таблицы 4.6

Наименование	Ед. изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пределы измерений	Перечень оборудования
1	2	3	4	5	6
Uкс (напряжение контактной сети) (2 эл-воз.)	В	380	400	До 400	модуль ADAM-4017 (1) с делителем напряжения
Iф (ток по фидеру 1 контактной сети) (ТП1)	А	500/5А	750/7,5	0-500	Модуль ADAM-4017 (2) / Датчик тока СР-5
Uф (напряжение по фидеру контактной сети) (ТП1)	В	27500/100	29000	76-105	Модуль ADAM-4017 (2) с делителем напряжения
Iф (ток по фидеру 2 контактной сети) (ТП1)	А	500/5А	750/7,5	0-500	Модуль ADAM-4017 (3) / Датчик тока СР-5
Iф (ток по фидеру 4 контактной сети) (ТП1)	А	500/5А	750/7,5	0-500	Модуль ADAM-4017 (3) / Датчик тока СР-5
Uф (напряжение по фидеру контактной сети) (ТП1)	В	27500/100	29000	76-105	Модуль ADAM-4017 (3) с делителем напряжения

Модули MB110.8A и ADAM-4017 устанавливаются совместно с устройством AD673, которое вычисляет среднеквадратичное значение входного сигнала. Измерения снимают в процессе всего эксперимента, с момента начала движения грузового электровоза и до окончания поездки.

Во время выполнения эксперимента данные фиксировались с двух тяговых подстанций Шпагино, Смазнево на участке Алтайская – Артышта 2, а также с двух электровозов серии ВЛ80С, которые двигались в попутном направлении друг за другом со стандартным межпоездным интервалом. Главным достоинством разработанной системы координированного управления является то, что данные измеряемые на электровозах и подстанциях сохраняются в память устройства в каждый момент времени (ежесекундно), после полученный массив проходит первичную обработку (приводится к единому формату) с дальнейшей передачей на удалённый сервер по беспроводным каналам связи. После сервера обработанные данные обратно передаются на электровозы на бортовой компьютер, где через разработанное программное обеспечение, происходит визуальное отображение на экране монитора следующих параметров:

- ток электровозов и подстанций;
- напряжение электровозов и подстанций.

### **4.3. Анализ измеренных данных**

#### **4.3.1. Данные с установленного оборудования на подвижном составе и тяговых подстанциях**

Во время проведения эксперимента измерялись следующие данные:

- 1) данные с оборудования установленного на 2-х электровозах и 2-х тяговых подстанциях (Шпагино, Смазнево);
- 2) данные с приборов учета тяговых подстанций Шпагино, Смазнево (АСКУЭ);
- 3) данные с бортовых систем электровозов (расшифровка файлов с регистраторов параметров движения).

Во время проведения эксперимента оборудование, в виде измерительных систем размещалось непосредственно на электровозах серии ВЛ80С (2 шт.), а также на двух тяговых подстанциях Шпагино, Смазнево, на участке Алтайская – Артышта 2. Измерительные системы фиксировали следующие параметры:

- ток секции электровоза;
- ток якоря;

- напряжение контактной сети;
- напряжение на шинах подстанций 27,5 кВ;
- токи фидеров.

Измерения на ТП Шпагино, ТП Смазнево осуществлялось с 2 по 3 декабря 2022 г., включая момент прохождения двух поездов по рассматриваемому участку.

На рисунке 4.20 представлено напряжение на электровозе № 1831, а также его статистические оценки (минимальные, максимальные значения, среднеквадратическое отклонение (СКО), распределение и другие параметры). Измерения проводились по действующим значениям с дискретностью 10 точек в секунду.

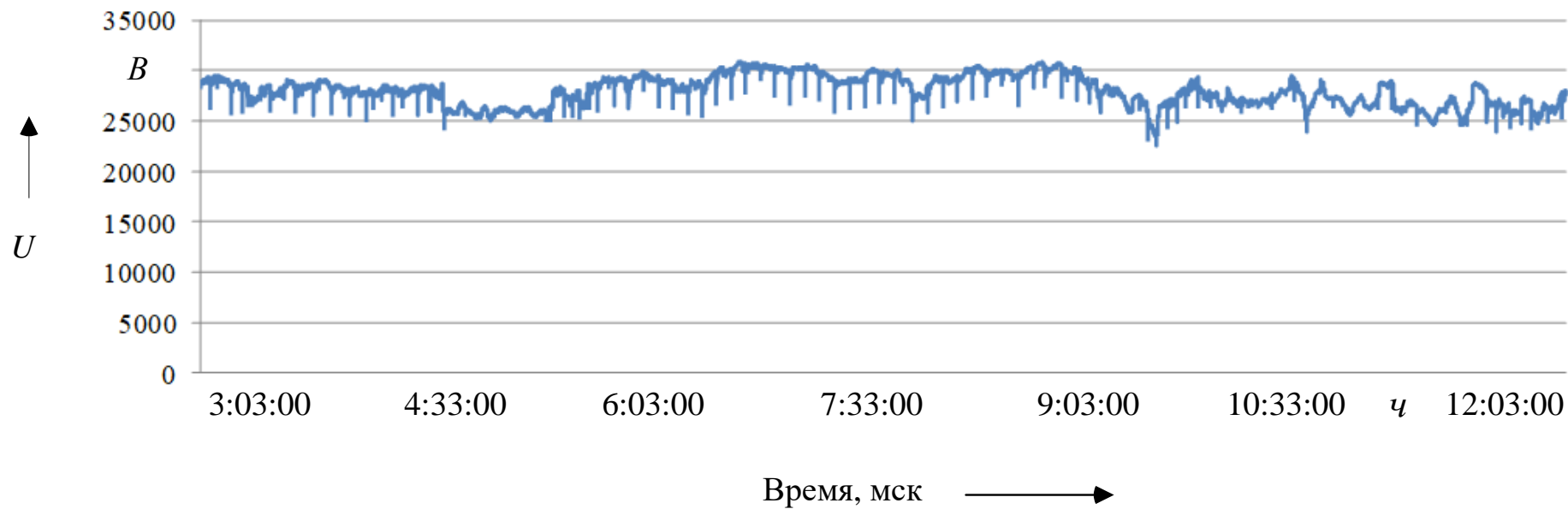
Напряжение на участке между тяговыми подстанциями Шпагино и Смазнево составляло 28,1 – 28,2 кВ, что является допустимым значением для контактной сети. Среднеквадратичное отклонение напряжения составляло 1,25 кВ, что подтверждает его стабильность на всём участке движения.

Аналогично, на рисунке 4.21 представлено напряжение на электровозе № 1738 вместе с его статистическими оценками.

На рисунке 4.22 представлены напряжения на шинах тяговых подстанций, которые были заявлены для эксперимента. Напряжение зафиксированное приборами показывали 28,6 – 28,9 кВ.

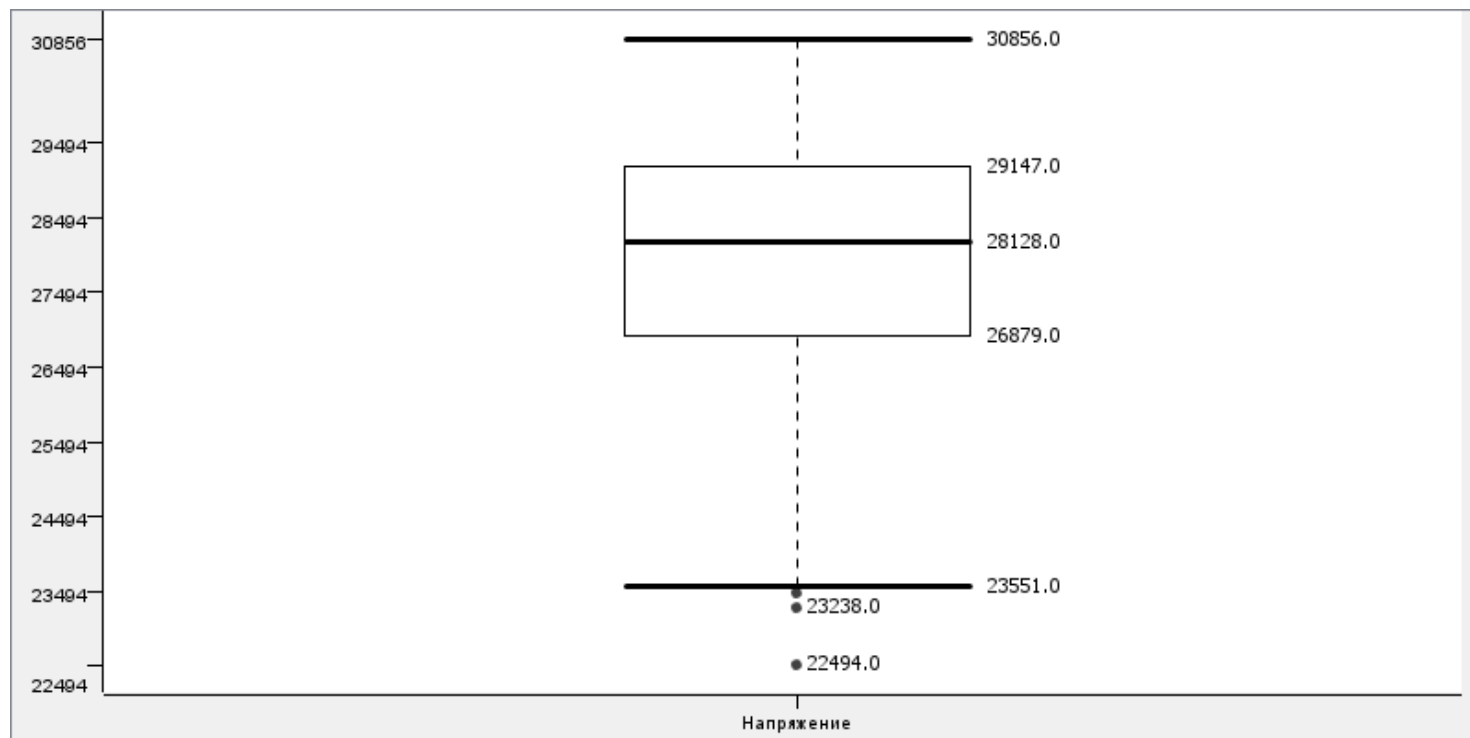
На рисунке 4.23 представлен ток секции и якоря электровоза № 1831. Поезд совершил длительную стоянку на станции Шпагино (до 9:06 мск) в ожидании второго поезда с электровозом № 1738, токи которого имеют аналогичную форму и значения.

На рисунке 4.24 представлены токи фидеров контактной сети: фидера 3, 4 ТП Шпагино и фидера 1,2 ТП Смазнево.



Column	Min	Mean	Median	Max	Std. Dev.	Skewness	Kurtosis	No. Missing	No. +∞	No. -∞	Histogram
U	24 173	28 047,7513	?	30 836	1 475,8725	-0,1133	-0,9408	0	0	0	

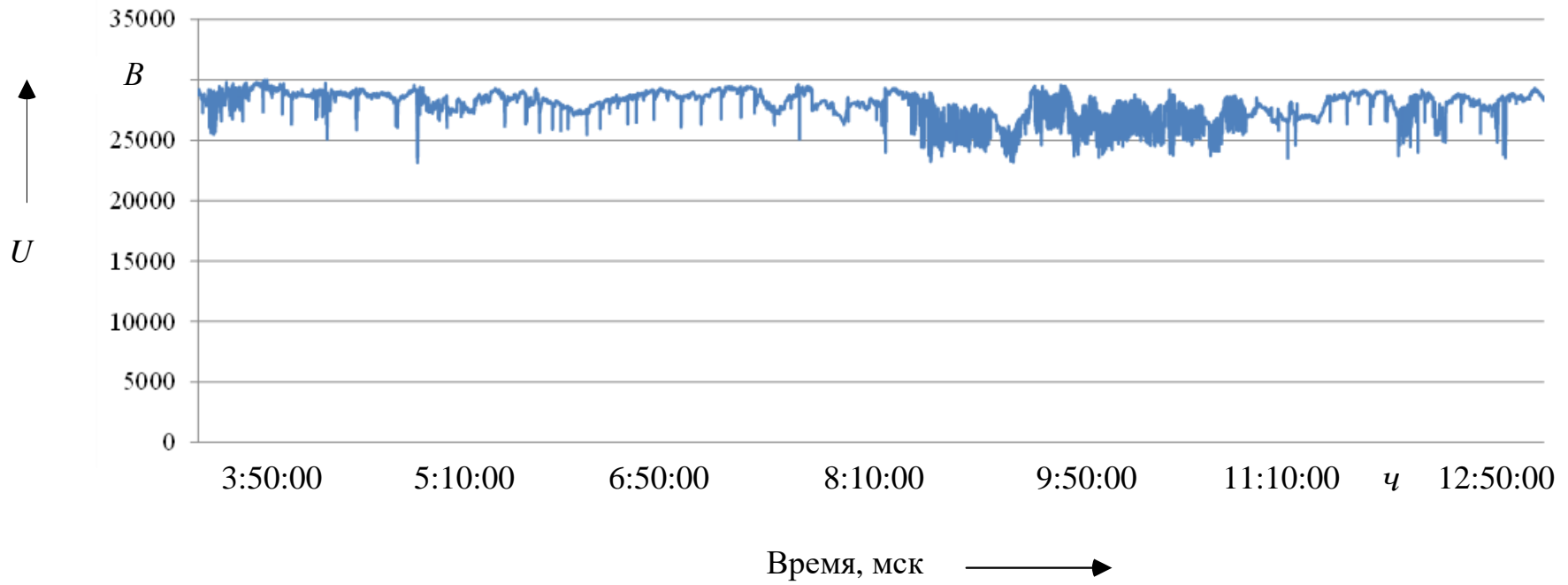
Рисунок 4.20, лист 1 – Напряжение на электровозе № 1831



б

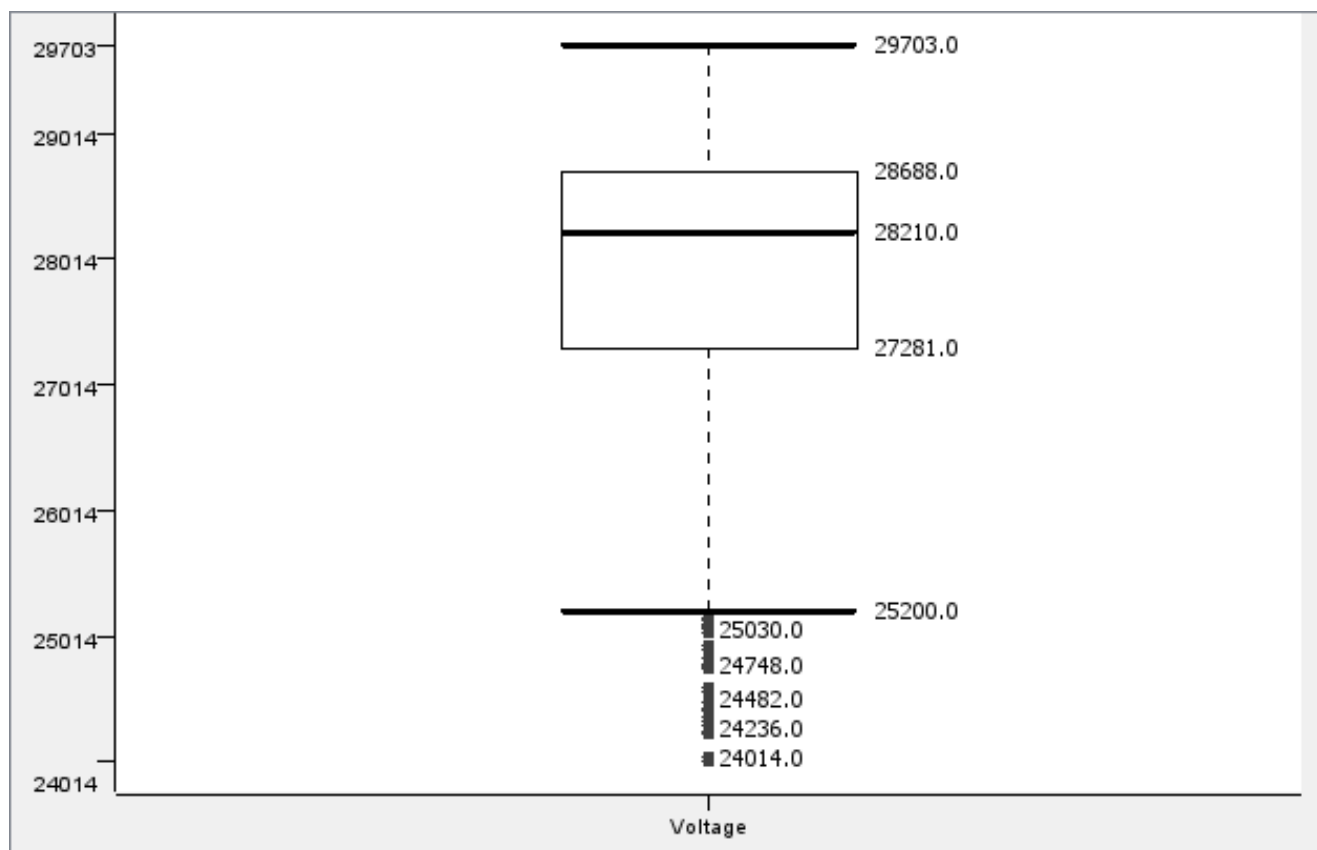
Лист 1 – график изменения напряжения на электровозе; лист 2 – статистическая оценка изменения напряжения на электровозе

Рисунок 4.20, лист 2 – Напряжение на электровозе № 1831



	Min	Mean	Median	Max	Std. Dev.	Skewness	Kurtosis	No. Missing	No. +∞	No. -∞	Histogram
Voltage	24 014	27 858,2592	?	29 703	1 161,6387	-1,0768	0,6054	0	0	0	

Рисунок 4.21, лист 1 – Напряжение на электровозе № 1738



б

Лист 1 – график изменения напряжения на электровозе; лист 2 – статистическая оценка изменения напряжения на электровозе

Рисунок 4.21, лист 2 – Напряжение на электровозе № 1738

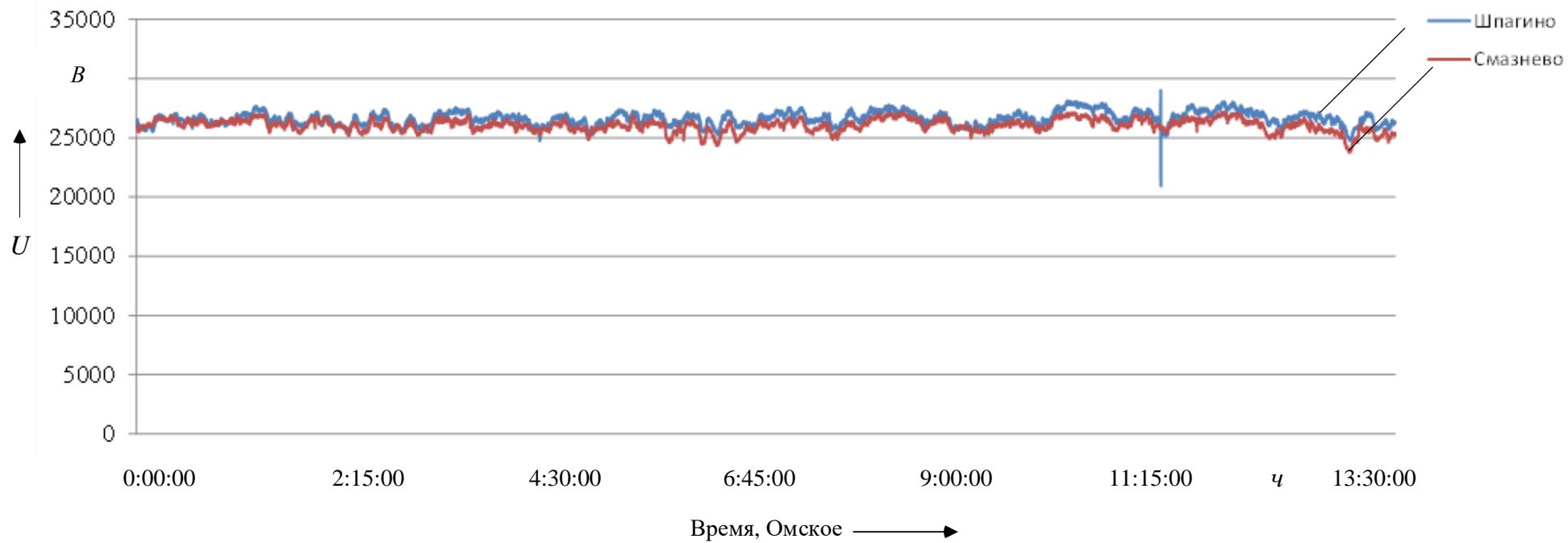


Рисунок 4.22– Напряжения на шинах ТП Шпагино, ТП Смазнево

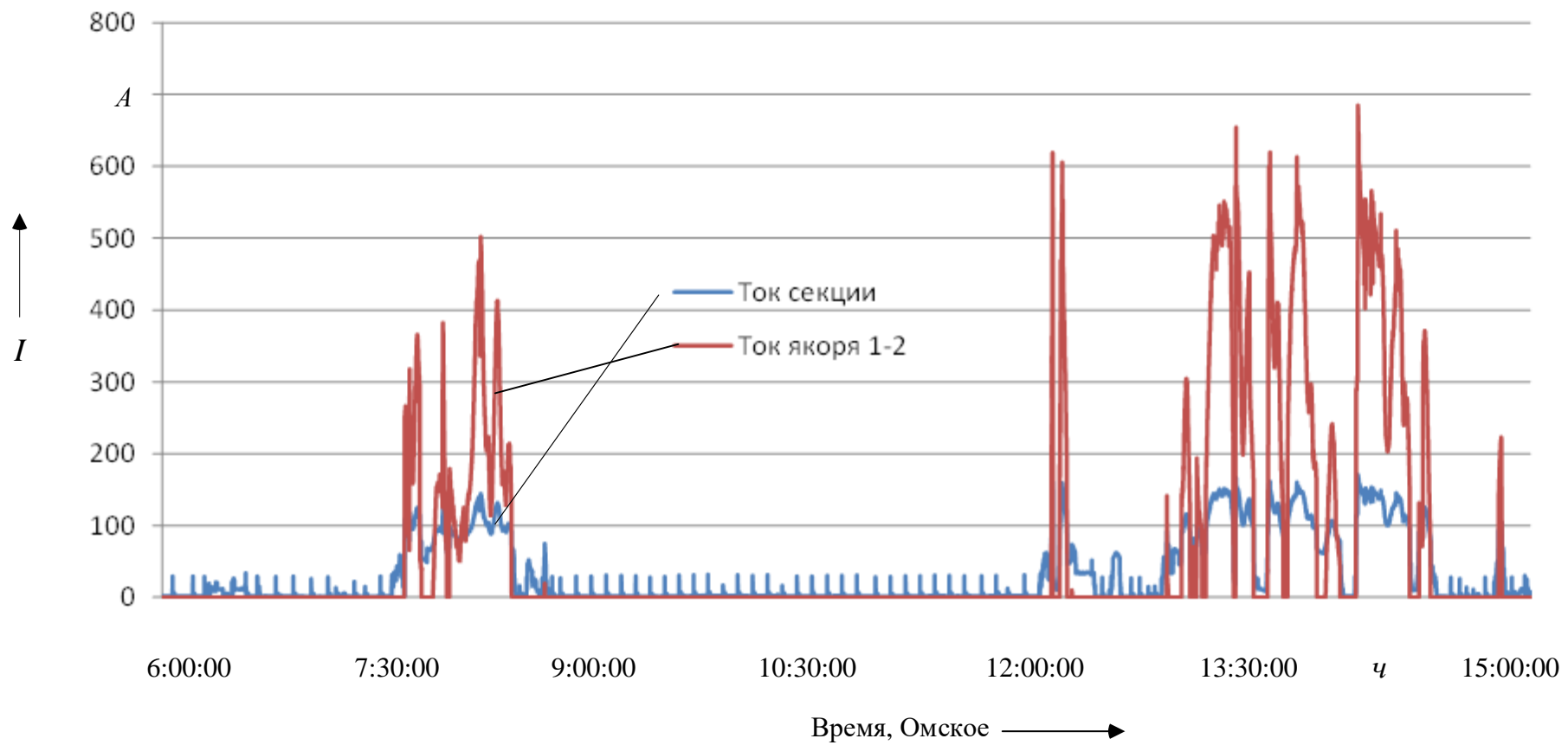


Рисунок 4.23 – Ток секции и якоря электровоза № 1831

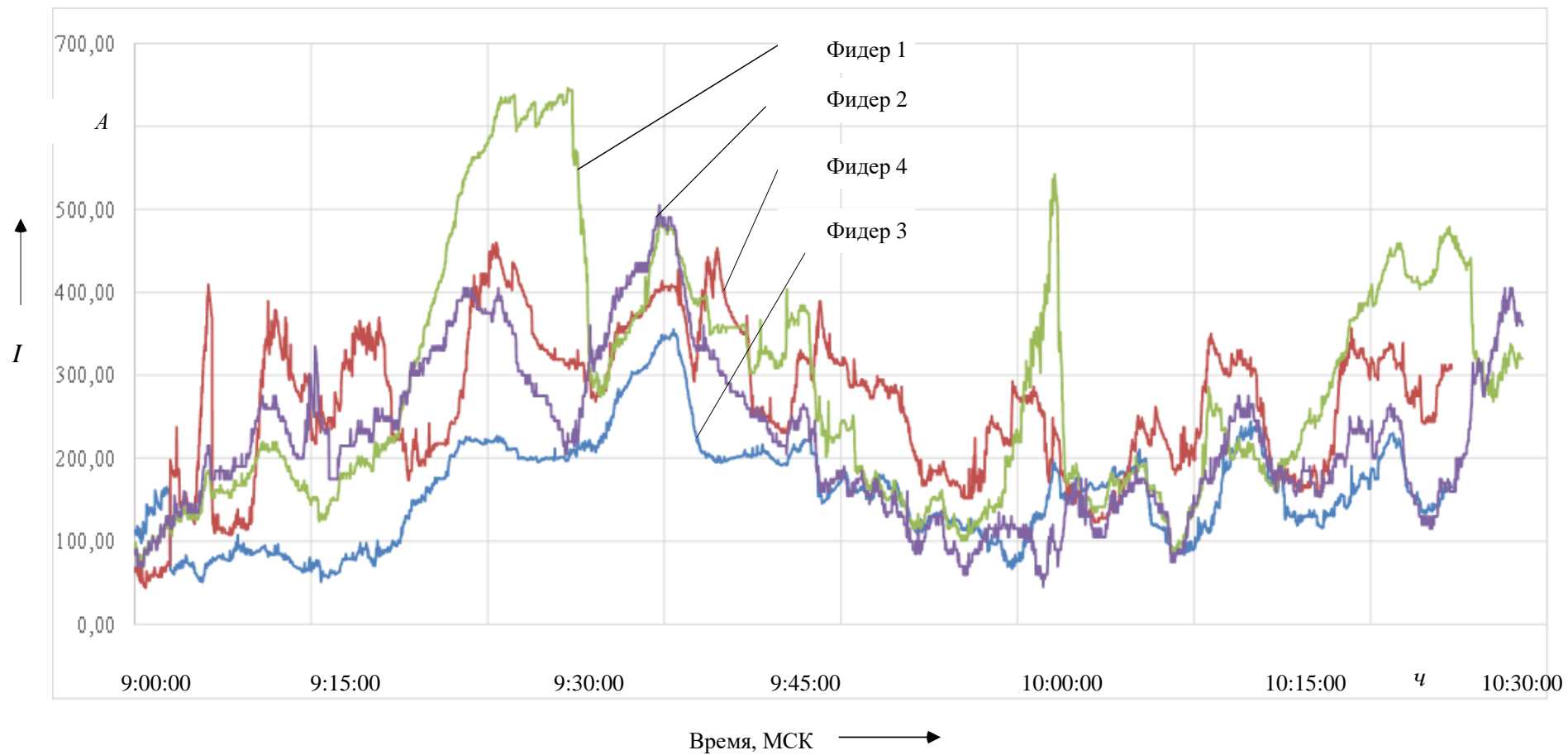


Рисунок 4.24 – Токи фидеров контактной сети (синхронизированные)

### 4.3.2. Данные с приборов учёта тяговых подстанций Шпагино, Смазнево

Токи и напряжения на фидерах контактной сети 4 ТП Шпагино и 2 ТП Смазнево, питающие четный путь, представлены в виде получасовых измерений на рисунках 4.25 и 4.26.

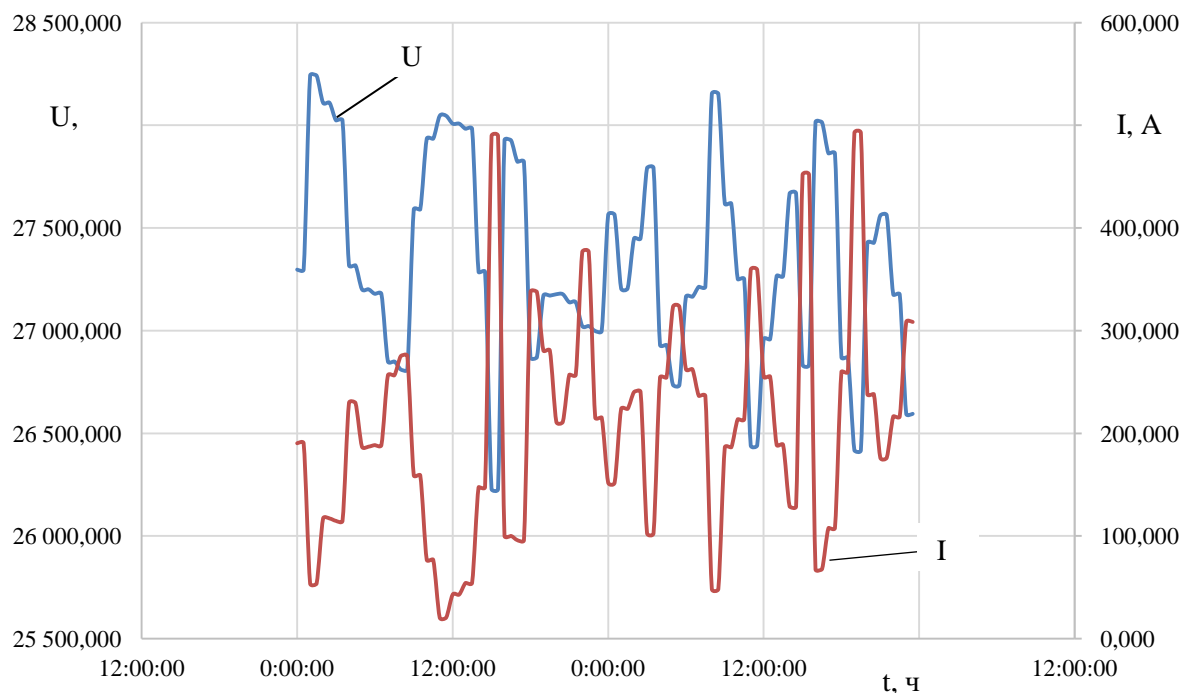


Рисунок 4.25 – Зависимость тока и напряжения от времени на станции Шпагино

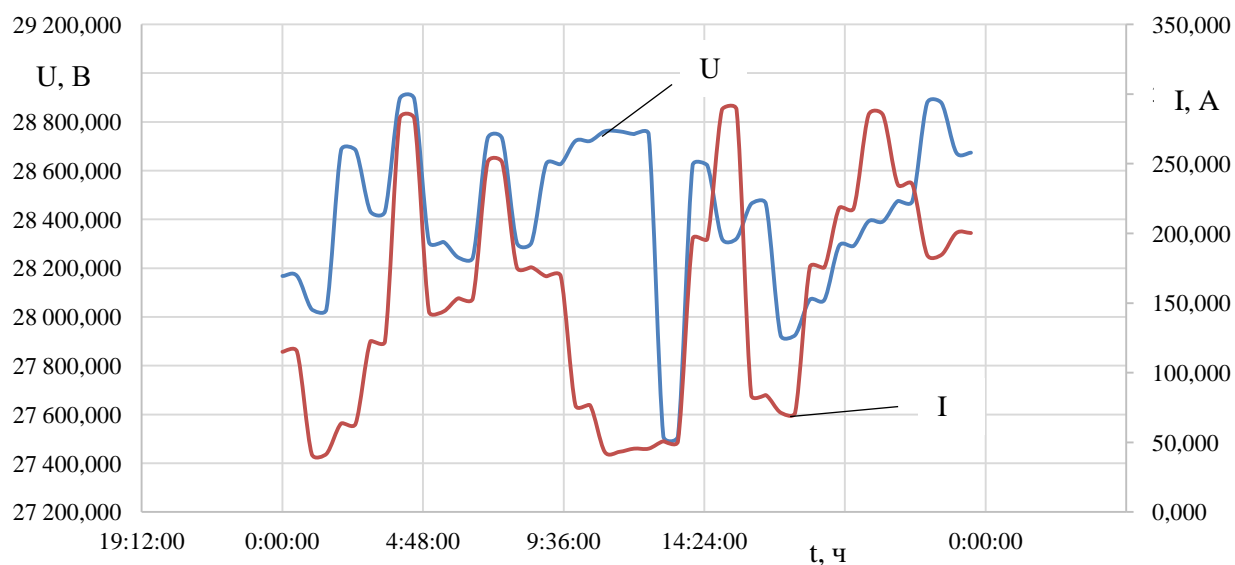


Рисунок 4.26 – Зависимость тока и напряжения от времени на станции Смазнево

### 4.3.3. Данные с бортовых систем электровозов

На рисунке 4.27 и 4.28 представлены измеренные регистраторами параметры движения значения токов и напряжений на электровозе № 1738 и № 1831 на участке межподстанционной зоны Шпагино-Смазнево.

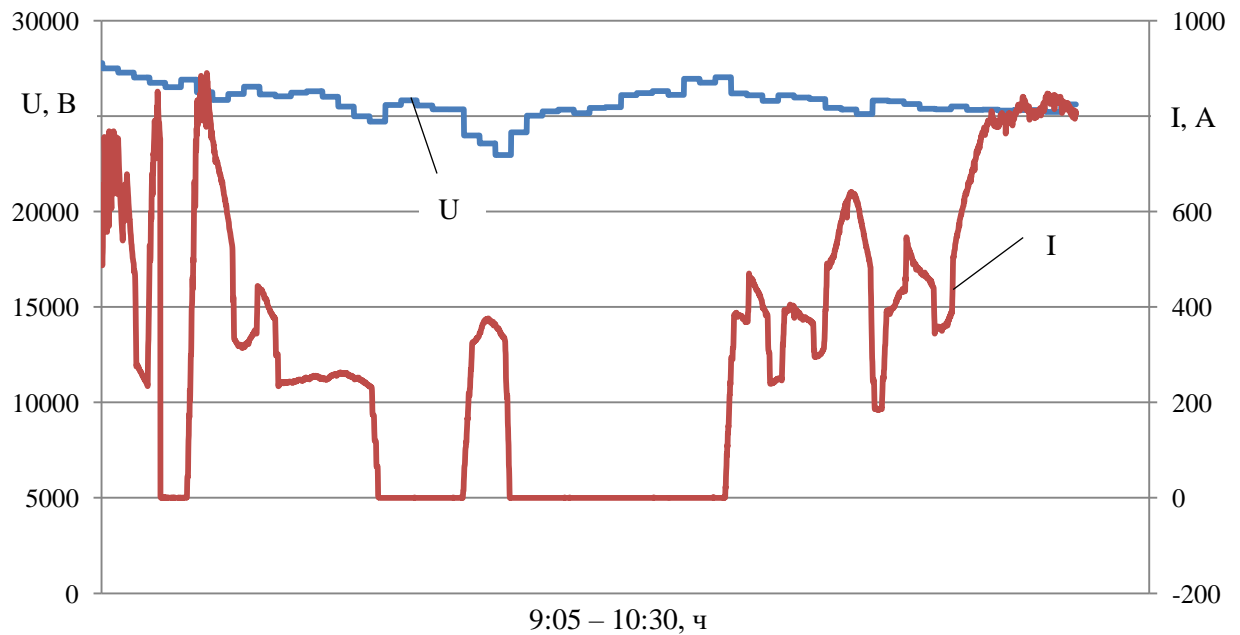


Рисунок 4.27 – Электровоз № 1738

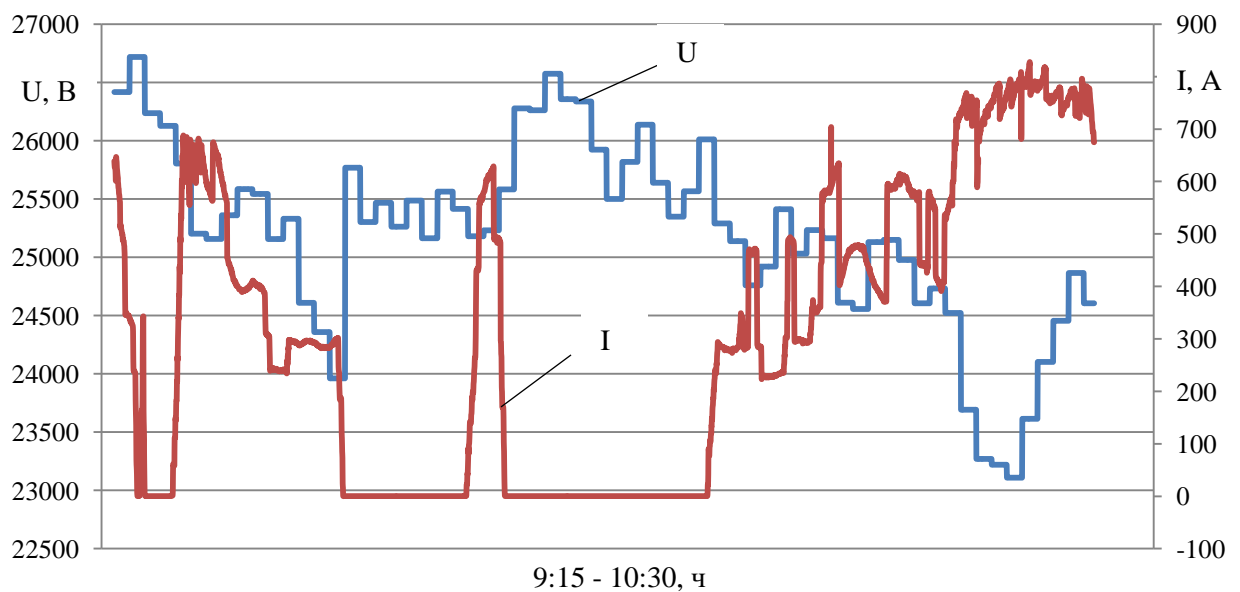


Рисунок 4.28 – Электровоз № 1831

Нулевые значения токов электровозов наряду с прочим связаны с проездом поездами нейтральных вставок контактной сети.

На рисунке 4.29 представлено сопоставление результатов измерений напряжений в контактной сети регистраторами параметров движения (кривая 2, усреднение поминутное) и измерительной системой установленной на электровозе (кривая 1, усреднение 10 точек в секунду). При этом штатными приборами на панели электровоза напряжение в контактной сети фиксировалось явно выше, чем измерено РПДА.

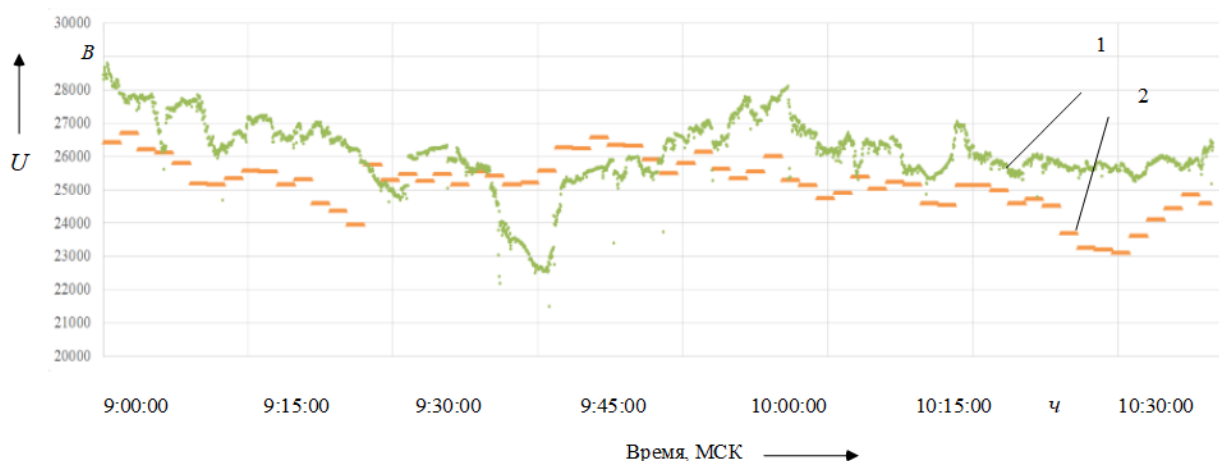


Рисунок 4.29 – Электровоз № 1831

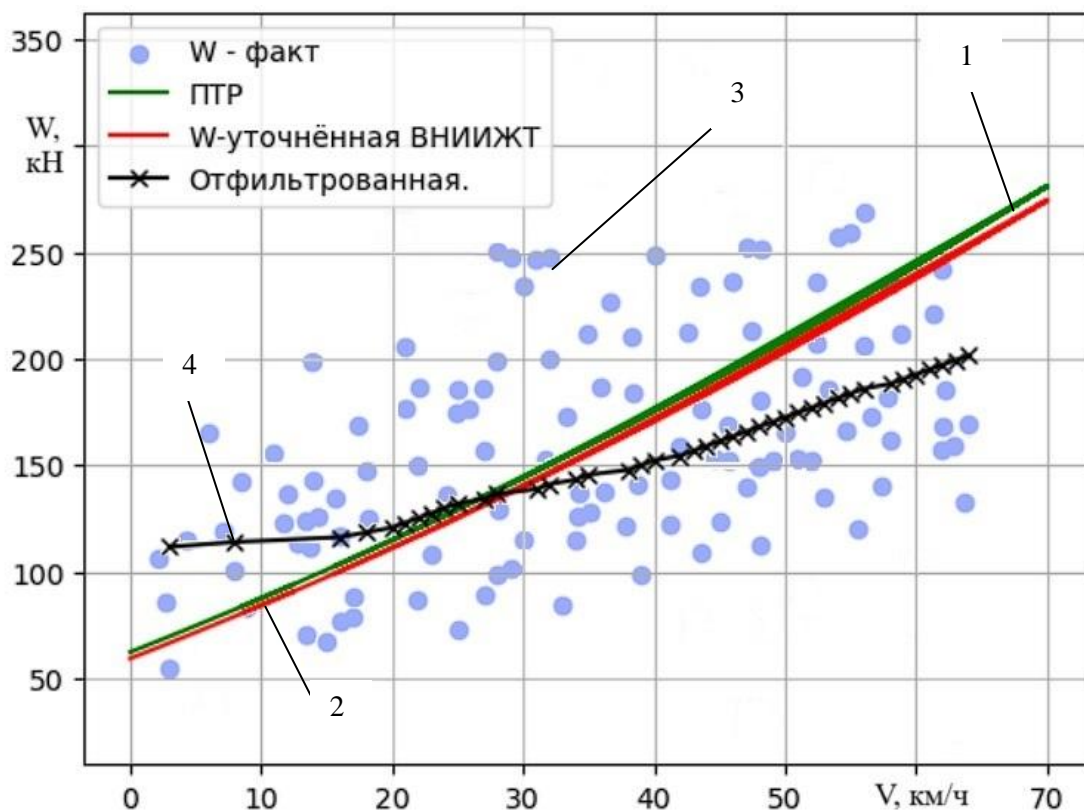
#### 4.4. Способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов

В предыдущих разделах представлены возможности снижения удельного расхода электроэнергии за счёт использования фактических параметров сопротивления движению и эквивалентной массы состава. На основе полученного массива синхронизированных данных получены фактические значения сопротивлений движения поезда на экспериментальном участке (рисунок 4.30).

В данном разделе на примере данных, полученных в результате проведенных испытаний, выполним оценку возможности реализации способа согласования параметров режимов работы магистральных электровозов.

На рассматриваемом участке перегона Шпагино-Смазнево отсутствует движение ЭПС, оборудованных рекуперативным торможением, за время проведения эксперимента напряжение в контактной сети находилось в

пределах допустимых значений, перегрузки по току (мощности) тяговых подстанций Шпагино и Смазнево не наблюдались.



1 – по ПТР, 2 – уточнённое в научных работах,  
3 – мгновенное значение по (3); 4 – фильтрация  
Рисунок 4.30 – Значения сопротивлений движения поезда на экспериментальном участке

Весьма актуальным является проработка вопроса, связанного с возможностью повышения пропускной способности рассматриваемого перегона, с точки зрения его потенциала на основе данных измерений в реальном времени. В компании ОАО «РЖД» на данный момент времени применяется разработка «Виртуальная сцепка». Представленные решения позволят установить соединение между электроподвижным составом по беспроводным каналам связи для передачи основных данных между электровозами. Основная идея способа заключается в следующем, что поезд, который, следует за ведущим составом и обрабатывает информацию впереди идущего состава, а после выполняет поиск оптимального режима ведения поезда. Представленная разработка позволяет добиться повышения безопасности вождения поездов за счёт поддержания наименьшего

расстояния между поездами, при условии, что сохраняется их скорость движения. Главным недостатком системы «Виртуальная сцепка» является то, что учитываются только режимы ведения впереди идущего поезда, без привязки к загруженности системы тягового электроснабжения на участке движения поездов.

На рисунке 4.31 показан способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов между соседними участниками движения. На разработанный алгоритм получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [78], а также имеется патент на изобретение [67].

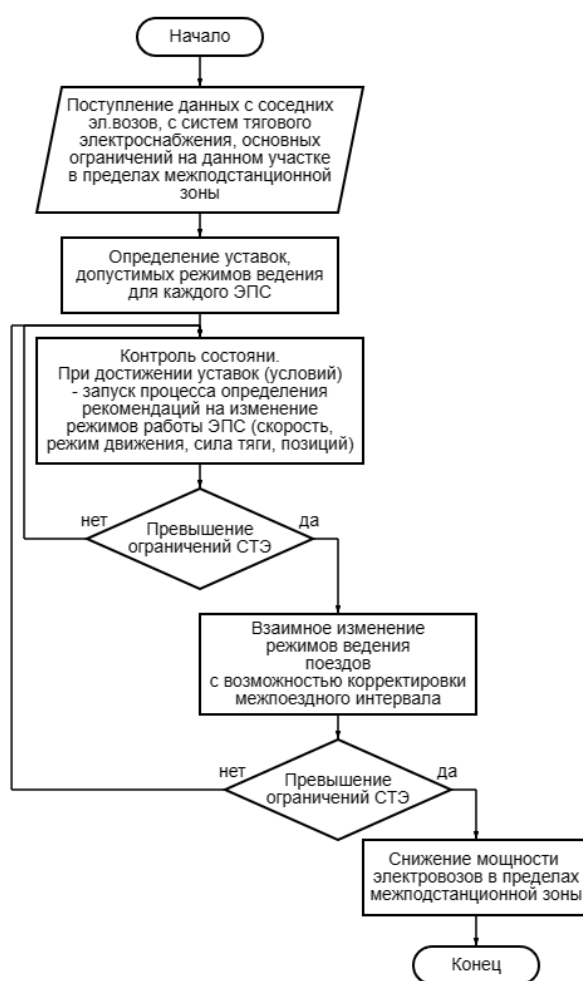


Рисунок 4.31 - Способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов между собой

В настоящее время разработанные подходы поиска ограничений на участках движения поездов, включая межпоездной интервал, не учитывают возможность получения данных о фактических параметрах

электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения в реальном времени по данным измерительных систем в условиях фактического состояния внешних воздействий, а не расчетных. Представленные модели, которые показывают текущие значения токов тяговых нагрузок системы электроснабжения, имеют значительное отличие от фактических значений.

Математическая постановка реализации режимов работы магистральных электровозов применительно к рассматриваемому участку может быть выполнена на основе оптимального распределения мощности между электровозами при обеспечении заданного (или лучшего) графика движения и представлена ранее.

При проведении эксперимента два электровоза с поездами были оборудованы измерительным оборудованием и двигались в попутном направлении по установленному для массы 4192 т межпоездному интервалу. Возможность рекуперации электровозами ВЛ80с отсутствовала. Загрузка системы тягового электроснабжения во время эксперимента, судя по измерениям на фидерах тяговых подстанций, не превышала 20-30 %.

По данным тяговых расчетов в КАРТЭС (рисунок 4.32) в качестве основных ограничений, препятствующих повышению пропускной способности рассматриваемого участка, являются минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов и то, при встречном направлении движения (нечетном направлении).

#### Минимальные напряжения на токоприёмниках локомотивов

Межподстанционная зона	Путь	Uэ, кВ	Поезд №, на км	
		миним.	3-мин	
404 ШПАГИНО – 405 СМАЗНЕВО	1-й	20,40	21,13	№ 9, 73,89
	2-й	26,65	26,79	№ 2, 104,55

#### Параметры режима межподстанционных зон

Наименование зоны	Длина,	Wп, кВ·А·ч	Ограничивающие параметры
	км	Wа, кВт·ч	
404 ШПАГИНО – 405 СМАЗНЕВО	59,3	6132	U3-мин 21,13 кВ, 1-й путь
		5101	t20-мин 45 °С, ф3-п

КОРТЭС – Расчёты режимов нагрузки системы переменного тока 25 кВ  
Вариант от 21.11.2022 11:02:23

Каталог: C:\D\ПРОПУСКНАЯ\База участков КОРТЭС (Рома)\12 Иртышская-  
Артышта II\6\_~ Ларичиха – АЛТАЙСКАЯ – АРТЫШТА II\  
файлы данных: АЛТАЙСКАЯ – АРТЫШТА II с КУ на ПС (выверена  
подвеска).ска

Рисунок 4.32 – Основные характеристики рабочего режима участка

Рассмотрим более подробно способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов.

На рисунке 4.33 представлен исполненный график движения поезда с электровозом 2014 по данным РПДА. На рассматриваемом участке для грузовых поездов два ограничения скорости. В случае уменьшения межпоездного интервала относительно установленного и при возникновении угрозы возникновения кратковременных перегрузок в системе тягового электроснабжения (запуск ситуационного управления в реальном времени) предполагается выдача дополнительных динамических ограничений скорости исходя из ограничений по потребляемой мощности электровозом:  $S, \text{кВА} / P, \text{кВт} \rightarrow \text{тяга } I, \text{А} \rightarrow F(V), \text{кН} \rightarrow V, \text{км/ч} \rightarrow \text{Роз} / \text{режим}$ .

Профиль пути на данном участке имеет уклоны различных знаков, что можно использовать для грамотного взаиморасположения поездов, следующих в попутном или встречном направлении, а также их режимов: тяга в подъем / выбег на спуске (синхронизированно) с целью управления спросом потребления электроэнергии.

На рисунках 4.34, 4.35 представлены фрагменты графиков потребления полной электрической мощности электровозами, следующими друг за другом во время эксперимента с интервалом 12 мин в попутном направлении, по данным измерений.

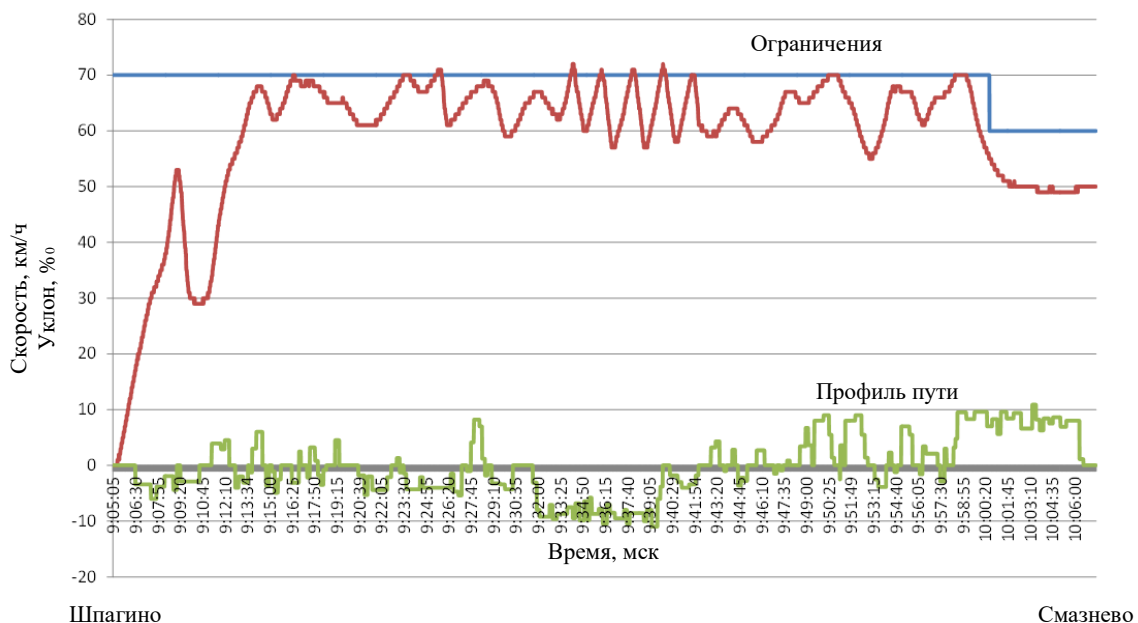


Рисунок 4.33 – Исполненный график движения поезда с электровозом 2014 по данным РПДА



Рисунок 4.34 – Фрагмент графика потребления электрической мощности электровоза по данным измерений



Рисунок 4.35 – Фрагмент графика потребления электрической мощности электровоза по данным измерений

Получены результаты определения параметров и режимов работы магистральных электровозов для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени с ограничениями со стороны системы тягового электроснабжения за счёт корректировки межпоездного интервала в пределах меподстанционной зоны (рисунок 4.36), а также за счёт

согласования режимов работы магистральных электровозов между собой в пределах одного участка между подстанциями и сохранением межпоездного интервала (для автоведения в режиме «виртуальная сцепка» (рисунок 4.37)).

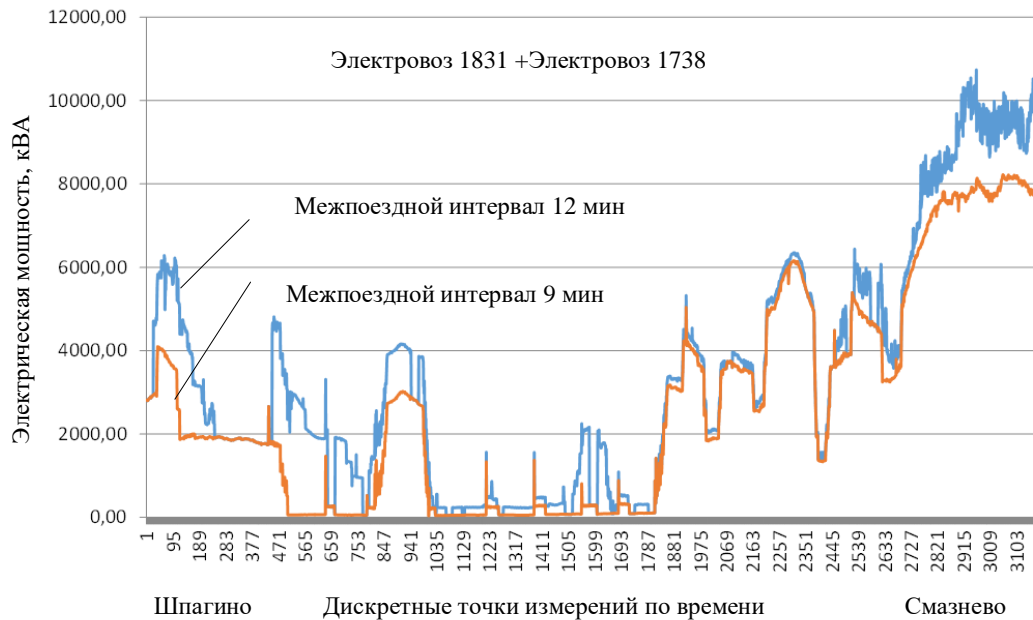
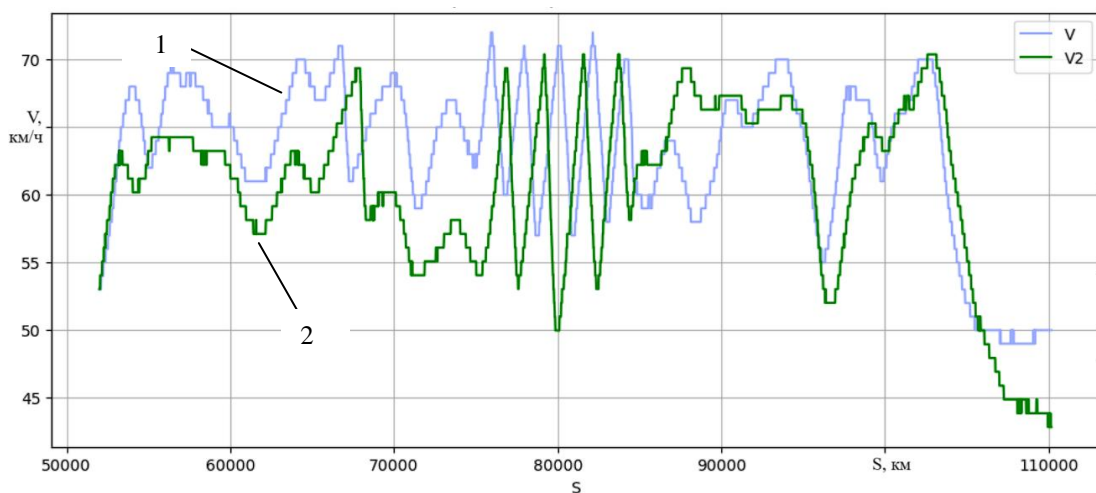


Рисунок 4.36 – Фрагмент графиков потребления электрической мощности электровозами в попутном следовании с учетом временного сдвига



1 – без ограничений; 2 – при ограничениях мощности (напряжения) системы тягового электроснабжения

Рисунок 4.37 – График движения попутных поездов с сохранением межпоездного интервала (виртуальная сцепка) при ограничениях энергетической инфраструктуры

За счет изменения межпоездного интервала на перегоне выходит снизить потребление пиковой мощности магистральными электровозами на 11%, а также за счет согласования режимов работы электровозов одной межподстанционной зоны между собой – снижение силы тяги с корректировкой скорости движения и сохранением межпоездного интервала позволяет снизить удельный расход электроэнергии одним магистральным электровозом (ведомым) на 1,8%, при этом, время хода по участку увеличилось с 60 минут до 63,5 минут (из заданного времени хода по участку магистральные электровозы не выбились).

На равнинных участках пути в пределах межподстанционной зоны возможно добиться снижения потребляемой мощности магистральными электровозами за счёт изменения межпоездного интервала при существующих ограничениях со стороны системы тягового электроснабжения (рисунок 4.38). А при появлении перегрузок, которые могут длиться по несколько минут, необходимо оперативно корректировать режимы работы соседних электровозов на участке.

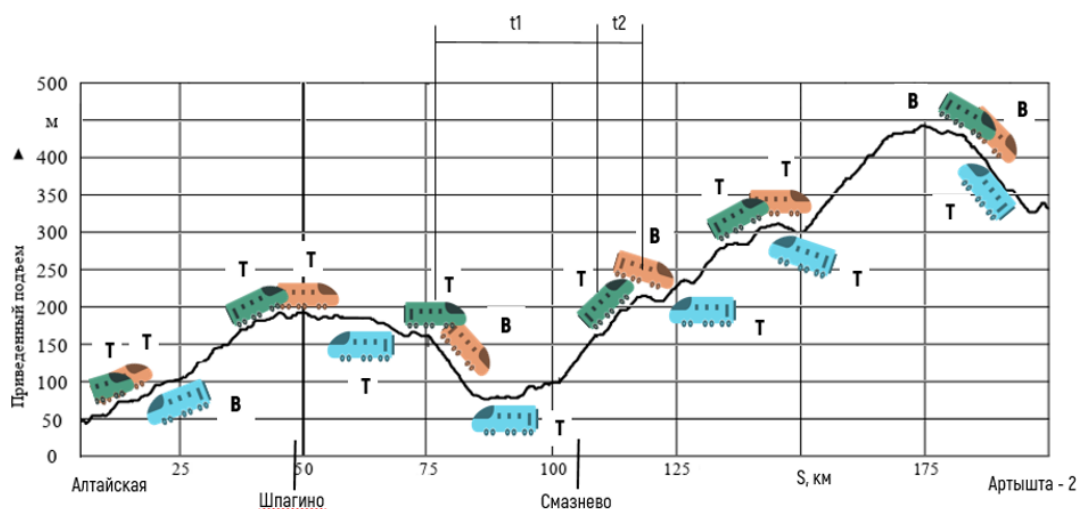


Рисунок 4.38 – Реализация способа согласования параметров режимов работы

За счёт использования рекуперативного торможения можно увеличить эффект от использования данной технологии координированного управления электроподвижным составом на основе подбора оптимальных режимов ведения между магистральными электровозами в пределах межподстанционной зоны.

#### **4.5. Технические требования к системе автоматизированного управления магистральными электровозами**

Основой системы является управляющая высокопроизводительная аппаратная платформа (промышленные компьютеры, многопроцессорные серверные системы), с распределенными вычислительными ресурсами на ЭПС (система поддержки принятия решений) и энергетической инфраструктуре (в виде интеллектуальных электронных устройств) с интеграцией в систему управления верхнего уровня – программно-техническим комплексом (ПТК) управления цифровой железной дорогой. Также получен акт внедрения на способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени (ПРИЛОЖЕНИЕ Б).

Система должна обеспечивать поддержку общей информационной модели основного и вспомогательного оборудования системы тягового электроснабжения, электроподвижного состава на основе современных стандартов представления CIM-модели и объектно-ориентированных протоколов для реализации планирования перевозок с учетом технических характеристик и состояния объектов системы электроснабжения, электроподвижного состава наряду с характеристиками и состоянием иных объектов и узлов инфраструктуры цифровой железной дороги.

Управление режимами работы электроподвижного состава обеспечивает планирование и поддержание заданных режимов по скорости, силе тяги, потребляемой / рекуперированной мощности, напряжению, предотвращение и ликвидацию аварийных нарушений.

Основные функциональные требования к системе автоматизированного управления магистральными электровозами:

- 1) синхронизированные измерения технологических параметров бортовыми измерительными системами электровозов, системы электроснабжения, оценка состояния текущего режима с дискретизацией 0,1 с, а также сбор и передача оперативной информации;
- 2) наличие каналов связи для непрерывной передачи и приема технологической информации на электровоз;
- 3) наличие достаточных вычислительных мощностей на электроподвижном составе и стационарных серверах инфраструктуры;

4) интерфейсы сопряжения с серверами цифровой железной дороги, с существующими в ОАО «РЖД» информационными системами, с системой электроснабжения, а также электроподвижным составом.

5) измерение технологических параметров, оценка состояния текущего режима, а также сбор и передача оперативной информации;

6) прогнозирование электропотребления электроподвижным составом, включая режим генерации /рекуперации электроэнергии;

8) контроль технологических и режимных параметров, включая загрузку фидеров контактной сети, мощность электроподвижного состава, напряжение в контактной сети, формирование, передача и регистрация сигналов о фактах нарушения и его характеристиках.

Разработанная система интегрировалась непосредственно в интеллектуальное электронное устройство, которое показано на рисунке 4.39.



Рисунок 4.39 – Интеллектуальное электронное устройство. Общий вид

Представленная может быть основана на новых технологиях: многоагентные интеллектуальные системы управления для создания адаптивных самовосстанавливающихся систем транспортного комплекса железных дорог.

Интеллектуальное электронное устройство с установленной системой должно реализовывать следующие функции:

- обеспечение безопасности движения;

- выполнение ответственных функций, с учетом требований безопасности, и недопущение необоснованного дублирования информации;
- интегрированное взаимодействие с системой управления локомотивом;
- передача данных по радиоканалу (диагностической, служебной и ответственной информации);
- позиционирование по данным спутниковой навигационной системы.

#### **4.6. Выводы**

1) Проведена апробация предлагаемых решений на межподстанционной зоне электрифицированного участка с синхронизованными измерениями на двух электровозах в попутном следовании и двух тяговых подстанциях для апробации предлагаемых подходов. Согласно утвержденной программе эксперимента в качестве пилотной зоны принят электрифицированный на переменном токе участок Шпагино-Смазнево Западно-Сибирской железной дороги. Предложен способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов между соседними участниками движения для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени системой автоведения.

2) Получены результаты определения параметров и режимов работы магистральных электровозов для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени с ограничениями энергетической инфраструктуры (напряжение на токоприемнике, ток по фидерам тяговых подстанций), за счет изменения межпоездного интервала на перегоне и за счет согласования режимов работы электровозов одной межподстанционной зоны между собой – снижение силы тяги с корректировкой скорости движения и сохранением межпоездного интервала (для автоведения в режиме «виртуальная сцепка»). Реализация предлагаемого способа к системе автоматизированного управления грузового поезда позволяет снизить удельный расход электроэнергии на тягу поездов на 1,8 %, пиковую мощность на 11 %. Разработаны основные технические требования, предъявляемые к системе автоведения электроподвижного состава для реализации предлагаемых подходов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены новые научно-обоснованные технологические решения и разработки, направленные на повышение эффективности эксплуатации магистральных электровозов за счет совершенствования автоматизированного управления движением поезда по фактическим данным в реальном времени.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1) Предложен метод определения сопротивления движению поезда по фактическим данным, получаемым непрерывно с заданной дискретностью по результатам измерений бортовыми системами электровоза на основе разностных уравнений движения поезда, составленных для множества моментов времени. Обосновано для фильтрации полученных оценок применять фильтр Калмана. Адекватность предлагаемого метода подтверждена путём сходимости рассчитанных данных с известными методами (их результатами), опубликованными в научных изданиях. Определение (уточнение) эквивалентной массы состава и сопротивления движению поезда предлагаемым методом с учетом фактических условий и их использование в системе автоведения электроподвижного состава обеспечит выработку управляющих воздействий (сила тяги, торможения, режим) соответствующей энергопотимальной траектории.

2) Разработан алгоритм системы автоматизированного управления магистральным электровозом в режиме автоведения, учитывающий фактические параметры движения поезда (сопротивление движения) и внешние факторы (ограничения энергетической инфраструктуры, статусы электроподвижного состава на межподстанционной зоне). Получены результаты построения энергооптимальных траекторий в режиме автоведения поезда по минимуму расхода электроэнергии на тягу поездов на рассматриваемом участке, учитывающие фактические параметры движения поезда и внешние факторы. Реализация автоматизированного управления магистральным электровозом на основе фактических параметров сопротивления движению поезда, определяемых предлагаемым способом, позволяет снизить удельный расход электроэнергии на расчетном участке на 1,6%.

3) Проведена апробация предлагаемых решений на основе экспериментальных исследований на межподстанционной зоне Шпагино – Смазнево электрифицированного участка Западно-Сибирской железной дороги с синхронизованными измерениями на двух электровозах в попутном следовании и двух тяговых подстанциях по утвержденной программе эксперимента.

4) Предложен способ согласования параметров режимов работы магистральных электровозов для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени. Указанный способ защищён патентом РФ на изобретение, а также получен акт внедрения на предлагаемые решения по совершенствованию системы автоматизированного управления магистральным электровозом. Получены результаты определения параметров и режимов работы магистральных электровозов для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени с ограничениями энергетической инфраструктуры (напряжение на токоприемнике, ток по фидерам тяговых подстанций) за счет изменения межпоездного интервала на перегоне и согласования режимов работы электровозов одной межподстанционной зоны между собой в режиме «виртуальная сцепка». Реализация предлагаемого способа в системе автоматизированного управления грузового поезда позволит снизить удельный расход электроэнергии на тягу поездов на 1,8 %;

5) Разработаны основные технические требования, предъявляемые к системе автоматизированного управления магистральным электровозом для реализации предлагаемых решений.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с применением в системе автоматизированного управления современными магистральными электровозами методов обработки больших данных, принципов самоорганизации с учетом взаимодействия всех элементов инфраструктуры, обеспечивающих тягу поездов.

## Библиографический список

1. Аблялимов, О.С. Выбор оптимальных траекторий движения методом динамического пошагового программирования / О.С. Аблялимов. – Текст: непосредственный // Universum: технические науки. – 2020. – №10-1 (79). – С. 35 – 39.
2. Аблялимов, О.С. О решении задачи оптимизации методом динамического программирования / О.С. Аблялимов. – Текст: непосредственный // Universum: технические науки. – 2020. – № 9-1 (78). – С. 16 – 18.
3. Авдиенко, Е.Г. Обоснование функциональных возможностей системы автоведения электроподвижного состава при реализации беспилотных технологий на основе искусственного интеллекта / Е.Г. Авдиенко. – Текст: непосредственный // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. Хабаровск, 2022. – С. 14 – 18.
4. Авдиенко, Е.Г. Определение параметров поезда по данным регистраторов параметров движения электровоза / Е.Г. Авдиенко // Школа молодых новаторов. сборник научных статей 3-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2022. – С. 65 – 68
5. Авдиенко, Е.Г. Перспективы применения информационно управляющей системы для повышения эффективности эксплуатации электроподвижного состава / Е.Г. Авдиенко, А.И. Шкулов // Молодежь и системная модернизация страны. Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. В 5-ти томах. / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2022. – С. 16 – 19.
6. Авдиенко, Е.Г. Повышение эффективности эксплуатации электроподвижного состава на основе выполнения мгновенных тяговых расчётов / Е.Г. Авдиенко // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Материалы XVII научной конференции, посвященной Дню Российской науки. Омск, 2023. – С. 7 – 12.
7. Авдиенко, Е.Г. Повышение эффективности эксплуатации электроподвижного состава на основе корректировки энергосберегающих

графиков движения поездов по данным измерений / Е.Г. Авдиенко. – Текст: непосредственный // Молодая наука Сибири. – 2023. – №4 (22). С. 1 – 11.

8. Авдиенко, Е.Г. Проблематика совершенствования системы автоматического ведения электроподвижного состава / Е.Г. Авдиенко // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте. Материалы XVI научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2022. – С. 46 – 51.

9. Авдиенко, Е.Г. Улучшение эксплуатационных показателей электроподвижного состава путём совершенствования систем управления электровозами за счёт складывающейся поездной обстановки на основе проведения оценочных тяговых расчётов в режиме реального времени / Е.Г. Авдиенко, А.А. Лаврухин, Е.С. Ларин // Эксплуатационная надёжность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов. Материалы VII всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т. путей сообщения. Омск, 2022. – С. 312 – 320.

10. Бакланов, А.А. Оценка потенциала снижения расхода электрической энергии на тягу поездов / А.А. Бакланов // Ресурсосберегающие технологии на предприятиях Западно-Сибирской железной дороги: материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т. путей сообщения. Омск, 2003. – С. 20 – 21.

11. Бакланов, А. А. Затраты времени и энергии на ограничения скорости, задержки и остановки поездов / А. А. Бакланов. – Текст: непосредственный // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. Санкт-Петербург, 2007. – № 2. – С. 115 – 127.

12. Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелёшин И.С., Чинь Л.М. Оптимизация управления движением поездов / Учебное пособие / под редакцией доктора технических наук, профессора Л.А. Баранова. – М.: МИИТ, 2011. – 164 с.

13. Баранов, Л. А. Оптимальное управление поездом метрополитена по критерию минимума энергозатрат / Л. А. Баранов, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь. – Текст: непосредственный // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 9 – 14.

14. Баранов, Л.А. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник в 3 ч. Ч.1. Теория автоматического управления / Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков и др.; под ред. Л.А.

Баранова и А.Н. Савоськина. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – 400 с.

15. Баранов, Л.А. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов; под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.

16. Васильев, В.А. Основные направления повышения энергоэффективности моторвагонного подвижного состава / М. В. Естафьева, М. Ю. Изварин, В.А. Васильев. – Текст: непосредственный // Электроника и электрооборудования транспорта. – 2019. – №5. – С. 21 – 24.

17. Головичер, Я.М. Оптимальное управление тяговым подвижным составом в системах автоведения магистральных железных дорог: автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.22.07 / Я. М. Головичер. – М., 1994. – 48 с. – Текст: непосредственный.

18. Елисеев, И.А. Повышение эффективности процесса управления электровозом посредством оперативного уточнения сил тяги и электрического торможения: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.22.07 / Елисеев Игорь Александрович. – Москва, 2013. – 27 с. – Текст: непосредственный.

19. Ерофеев, Е.В. Алгоритмы централизованного управления поездами метрополитена для системы автоведения / Автоматическое управление технологическими процессами на транспорте / Юбилейный сб. науч. тр. Вып.892. – М.: МИИТ, 1996. – С. 22 – 26.

20. Ерошенко, А. В. Разработка системы оперативного контроля удельного расхода электроэнергии отдельно взятыми поездами на участке магистральной железной дороги постоянного тока: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.22.07 / Ерошенко Александра Викторовна. – Омск, 2008. – 16 с. – Текст: непосредственный.

21. Естафьев, А. М. Совершенствование тягового подвижного состава на основе современных технологий энергосбережения / А. М. Естафьев, Д. Е. Кирюшин, В. В. Никитин, О. Е. Пудовиков. – Текст: непосредственный // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 2 – 6.

22. Естафьев, А.М. Повышение энергетической эффективности электрического переменного тока / А. М. Естафьев, Т. С. Титов, А. Н. Сычугов, О. Е. Пудовиков. – Текст: непосредственный // Электротехника. – 2017. – № 10. – С. 46 – 52.

23. Жухин, Н. О. Применение модели поезда для исследования работы системы автоведения / Н. О. Жухин. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 27 – 36.

24. Истомин, С.Г. Систематизация технических возможностей современных регистраторов параметров движения электроподвижного состава постоянного тока / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т. путей сообщения. Омск, 2019. – С. 257 – 261.

25. Истомин, С.Г. Анализ методов и средств повышения эффективности эксплуатации электроподвижного состава железных дорог на основе применения прорывных информационных технологий / С.Г. Истомин, Е.Г. Авдиенко // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. – С. 23 – 28.

26. Истомин С.Г. Анализ существующих систем автоведения и систем информирования машиниста электроподвижного состава / С.Г. Истомин, Е.Г. Авдиенко // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: Материалы IV международной научно-практической конференции в рамках Научно-образовательного форума. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. –С. 264 – 270.

27. Истомин, С.Г. Возможности применения обучаемых нейросетей в системах автоведения электроподвижного состава / С.Г. Истомин, Е.Г. Авдиенко // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2021. – С. 119 – 125.

28. Истомин, С.Г. Повышение эффективности использования магистральных грузовых электровозов за счет управления режимами движения / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко, С. Г. Шантаренко. – Текст: непосредственный // Вестник РГУПС. – 2021. – № 3 (83). – С. 114 – 123.

29. Климович, А.В. Анализ вариантов выбора критерия оптимальности движения поезда / А.В. Климович // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2006. – №4. – С. 2 – 7.
30. Климович, А.В. Определение оптимального по энергозатратам управления движением поезда / А.В. Климович, В.Д. Авилов // Динамика систем, механизмов и машин: материалы 5-ой междунар. науч.-техн. конф. / Омский гос. техн. ун-т. Омск, 2004. – С. 277 – 280.
31. Климович, А.В. Оптимизация графика движения поезда для всего направления перемещения груза / А.В. Климович // Вестник Ростовского гос. ун-та путей сообщения. Ростов-на-Дону. 2006, – №3. – С. 53 – 55.
32. Климович, А.В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу: Научная монография / А.В. Климович. – Текст: непосредственный, Москва, 2008. – 263 с.
33. Климович, А.В. Построение оптимального графика движения поезда по заданному участку при помощи целевой функции / А.В. Климович, А.А. Кообар, А.В. Харламова // Омский научный вестник. Омск. 2006, – №9 (46). С. 88 – 91.
34. Климович, А.В. Методика определения сопротивления движению поезда по данным электронного регистратора параметров движения / А. В. Климович, А.А. Кообар, А.С. Лендясов. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – № 3 (3). – С. 16 – 24.
35. Климович, А.В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу / А.В. Климович – Текст: непосредственный // М.: Компания Спутник+, 2008. – 263 с.
36. Корнев, Д.А. Влияние алгоритма управления на технические характеристики движения поездов / Д.А. Корнев. – Текст: непосредственный // Автоматика на транспорте. – 2023. – № 1. – С. 7 – 18.
37. Курбасов, А.С. Увеличение скоростей на железных дорогах России: возможности и преимущества / А.С. Курбасов. – Текст: непосредственный // Транспорт российской федерации. – 2011. – № 6 (37). – С. 20 – 23.
38. Лазарян, В.А. О выборе численных методов интегрирования уравнений движения существенно нелинейных одномерных механических систем / Е.П. Блохин, Л.В. Белик – Текст: непосредственный // В кн.:

Некоторые задачи механики скоростного транспорта. Киев. 1970, – С.125 – 135.

39. Лесов, А.Т. Оптимизация кривой движения поезда для минимизации энергопотребления на базе ж. д. Узбекистана / А.Т. Лесов, В.О. Иващенко // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – Вып. 1. – С. 68 – 79.

40. Лисенков, В.М. Системы управления движением поездов на перегонах: учебник для вузов ж.-д. транспорта: в 3 ч. [Текст] / В.М. Лисенков, П.Ф. Бестемьянов, В.Б. Леушин и др.; под ред. В.М. Лисенкова. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. Ч. 3. – 174 с.

41. Лисицын, А.Л. Нестационарные режимы тяги: тяговое обеспечение перевозочного процесса / А.Л. Лисицын, Л.А. Мугинштейн. – М.: Интекст, 1996. – 159 с.

42. Малахов С.В. Оптимизация энергозатрат на тягу поездов на основе уточнённого метода тяговых расчётов: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 2.9.3 / Малахов Сергей Валерьевич. – Москва, 2021. – 147с. – Текст: непосредственный.

43. Малёшин, И.С. Оценка основного сопротивления поезда метрополитена на основе фильтра Калмана / И.С. Малёшин. – Текст: непосредственный // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 1. – С. 31 – 37. – Текст: непосредственный.

44. Мельниченко О.В. Повышение эффективности работы современного отечественного электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / О.В. Мельниченко, А.С. Сомойлова. – Текст: непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – №1(77). – С.136-143.

45. Мельниченко О.В. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / О. В. Мельниченко, В. С. Томилов, С.Г. Шрамко, С.А. Богинский. – Текст: непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – №1(65). – С.172 – 182.

46. Микропроцессорная система управления и диагностики МПСУиД: Руководство по эксплуатации 07Б.02.00.00 РЭ, 2016. – 29 с. – Текст: непосредственный.

47. Микропроцессорная система управления и диагностики МСУД-001 для грузового электровоза постоянного тока: Руководство по эксплуатации АРКИ. 421455.001.РЭ. ЗАО «ЛЭС», 2011. – 176 с. – Текст: непосредственный.

48. Микропроцессорная система управления и диагностики оборудования электровозов МСУД-Н: Руководство по эксплуатации ИДМБ.421455.001РЭ2 (ЗТС.676.004РЭ2). ЗАО «ЛЭС», 2011. – 132 с. – Текст: непосредственный.

49. Микропроцессорная система управления и диагностирования электровозов ВЛ80р. МСУЭ. Учебное пособие по эксплуатации. Красноярск: Издательство дорожного центра внедрения Красноярской ж.д., 2011. – 64 с. – Текст: непосредственный.

50. Мугинштейн, Л.А. Пути снижения удельных расходов топлива и электроэнергии на тягу поездов / Л.А. Мугинштейн, В.И. Рахманинов, И.А. Ябко – Текст: непосредственный // Локомотив. 2001. №2. С. 2 – 7.

51. Мугинштейн, Л. А. Инновационный проект «Эльбрус» / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, Кириякин В. Ю., Ляшко О. В., Анфиногенов А. Ю., И. А. Ябко. – Текст: непосредственный // Железнодорожный транспорт. 2010. – № 2. С. 24 – 29.

52. Мугинштейн, Л.А. Полигонные технологии движения поездов по графикам на основе автоматизированной системы «Эльбрус» / Л.А. Мугинштейн, С.А. Виноградов, В.Ю. Кириякин, О.В. Ляшко, А.Ю. Анфиногенов, А.В. Новгородцева. – Текст: непосредственный // Железнодорожный транспорт. 2015. – № 3. – С. 13–19.

53. Мугинштейн, Л.А. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Л.А. Мугинштейн, А.И. Молчанов, С.А. Виноградов, К.М. Попов, Е.Н. Школьников. М.: ВМГ-Принт, 2014. – 144 с. – Текст: непосредственный.

54. Мугинштейн, Л.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – Текст: непосредственный // Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М. :Интекст, – 2012. – 80 с.

55. Мугинштейн, Л.А. Энергооптимальный тяговый расчёт движения поезда / Л.А. Мугинштейн, А.Е. Илютович, И.А. Ябко – Текст:

непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 6. – С. 3 – 13.

56. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации № 204: [Утвержден Президентом Российской Федерации 7 мая 2018 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2018. – 19 с. – Текст: непосредственный.

57. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации № 490: [Утвержден Президентом Российской Федерации 10 октября 2019 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2019. – 25 с. – Текст: непосредственный.

58. О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации № 642: [Утвержден Президентом Российской Федерации 1 декабря 2016 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2016. – 25 с. – Текст: непосредственный.

59. ОАО «Российские железные дороги»: официальный сайт. – Москва. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9471> (дата обращения: 23.04.2021). – Текст: электронный.

60. Об утверждении долгосрочной программы развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации № 466-р: [принято Правительством Российской Федерации 19 марта 2019 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2019. – 158 с. – Текст: непосредственный.

61. Об утверждении концепции реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога»: Распоряжение заместителя генерального директора ОАО «РЖД» - главного инженера С. А. Кобзева № 1285-р: [Утверждено заместителем генерального директора ОАО «РЖД» - главным инженером С. А. Кобзевым 5 декабря 2017 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2017. – 92 с. – Текст: непосредственный.

62. Об утверждении стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): Распоряжение заместителя генерального директора ОАО «РЖД» - главного инженера С.А. Кобзева № 769-р: [Утверждено

заместителем генерального директора ОАО «РЖД» - главным инженером С. А. Кобзевым 17 апреля 2018 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2018. – 128 с. – Текст: непосредственный.

63. Об утверждении Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации № 877-р: [принято Правительством Российской Федерации 17 июня 2008 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2008. – 174 с. – Текст: непосредственный.

64. Об утверждении Стратегии развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года № 19: [Утверждена советом директоров ОАО «РЖД» 23 декабря 2013 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2013. – 128 с. – Текст: непосредственный.

65. Осипов, С.И., Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д тр-та [Текст] / С.И. Осипов, С.С. Осипов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.

66. Пат. на изобретение № 2019140583Россия, СПК G01M 17/08 (2020.02); B61K 9/08 (2020.02) Способ определения основного сопротивления движению как поковки самоходного подвижного состава - способ равновесных скоростей (варианты)/ Гриневич В.П.; Заявлено 10.12.2019; Оpubл. 08.06.2020 Бюл. № 16.

67. Пат. на изобретение № 2778164 Россия, МПК В60М 3/02 (2022.05); В60L15/40 (2022.05) Способ управления электроподвижным составом и системой тягового электроснабжения / Богунов К.В., Истомин С.Г., Авдиенко Е.Г., Доманов К.И., Шатохин А.П., Третьяков Е.А., Дениснев И.Н., Пономарёв Е.В.; Заявлено 25.11.2021; Оpubл. 15.08.2022 Бюл. № 23.

68. Перестенко, А.Е. Повышение эффективности использования магистральных грузовых электровозов посредством управления режимами эксплуатации: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 2.9.3 / Перестенко Артём Евгеньевич. – Омск, 2021. – 130с. – Текст: непосредственный

69. Плакс, А.В. Системы управления электрическим подвижным составом: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Плакс А. В. - Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, Маршрут, 2005. – 358 с.

70. Поляков, Б.О. Повышение Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными вагонами увеличенной грузоподъёмности: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.22.07 / Поляков Борис Олегович. – Санкт-Петербург, 2022. – 18 с. – Текст: непосредственный.

71. Пудовиков, О. Е. Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения: диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.13.06 / Пудовиков Олег Евгеньевич. – Москва, 2011. – 291 с. – Текст: непосредственный.

72. Пудовиков, О.Е. Новые подходы к разработке систем автоматического управления скоростью длинносоставных поездов / О.Е. Пудовиков, Н. О. Жухин. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 4 (44). – С. 81 – 89.

73. Пудовиков, О.Е. Управление длинносоставными тяжеловесными грузовыми поездами, УБС, 2010, выпуск 29, С. 214 – 231.

74. Пястик, М.С. Энергооптимальная система автоведения электровозов, адаптированная к условиям движения: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.09.03 / Пястик Михаил Соломонович. – Москва, 2003. – 102с. – Текст: Непосредственный

75. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров и др. / Под ред. И.П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с. – Текст: непосредственный.

76. Руководство по эксплуатации «Интеллектуальная система автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенными по длине локомотивами (ИСАВП-РТ)». Москва, 2013, 76 с.

77. Савоськин, А. Н. Проблемно-ориентированный эволюционный алгоритм для оптимизации режимов ведения поезда / А. Н. Савоськин, К. И. Юренко, П. А. Харченко, И. К. Юренко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. – № 1 (49). – С. 122 – 132.

78. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2022610590 РФ. Цифровая модель электроподвижного состава железных дорог / Богунов К.В., Истомин С.Г., Авдиенко Е.Г., Доманов К.И., Шатохин А.П., Третьяков Е.А., Денисов И.Н.; заявитель и правообладатель ОмГУПС. – № 2021682259; заявл. 28.12.21; опубл. 13.01.22. – 1 с.

79. Система ИСАВП-РТ 2ЭС5: Руководство по эксплуатации АЮВП.468382.021РЭ. ООО «АВП Технология», 2015. - 67с.

80. Система микропроцессорная управления, регулирования и диагностика электровоза ЭП2К: Руководство по эксплуатации 27.Э.343.00.00.000 РЭ. ОАО «ВНИКТИ», 2009. - 129с.

81. Система универсальная автоведения электровозов грузового движения (УСАВП-Г): Руководство по эксплуатации КНГМ.466451.003РЭ. ООО «АВП Технология», 2011. – 42с.

82. Третьяков, Е.А. Испытание цифрового устройства интеллектуального управления взаимодействием электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры / Е.А. Третьяков, Е.Г. Авдиенко // Теория и практика современной науки. Материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Сахалинского института железнодорожного транспорта / Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. Южно-Сахалинск, 2021. – С. 11–16.

83. Третьяков, Е.А. Обоснование функциональных возможностей системы автоведения электроподвижного состава при реализации беспилотных технологий на основе искусственного интеллекта / Е.Г. Авдиенко. – Текст: непосредственный // Молодая наука Сибири. – 2022. №2 (16). С. 55 – 62.

84. Третьяков, Е.А. Определение параметров поезда в пути следования по данным бортовых измерительных систем грузовых электровозов / Е.А. Третьяков, Е.Г. Авдиенко. – Текст: непосредственный // Транспорт Урала. – 2022. №2 (73). – С. 97-102.

85. Третьяков, Е.А. Повышение эффективности использования системы автоведения грузовых электровозов по данным текущих измерений бортовых систем и мгновенных тяговых расчётов / Е.А. Третьяков, Е.Г. Авдиенко. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2022. №2 (50). – С.55-65.

86. Третьяков, Е.А. Применение данных бортовых систем измерений для повышения эффективности управления электроподвижным составом системой автоведения / Е.А. Третьяков, Е.Г. Авдиенко // Современные инновации в науке и технике. Сборник научных статей 12-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2022. – С. 21 – 24.

87. Третьяков, Е.А. Сравнительный анализ критериев оптимального движения электроподвижного состава с системой автоведения / Е.А. Третьяков, Е.Г. Авдиенко // Техника и технологии: пути инновационного развития. Сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции. / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2022. – С.24 – 27.

88. Третьяков, Е.А. Сравнительный анализ программных комплексов автоматизированных тяговых расчётов для повышения эффективности эксплуатации электроподвижного состава / Е.А. Третьяков, Е.Г. Авдиенко // Молодежь и системная модернизация страны. Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. В 5-ти томах. / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2022. – С. 11 – 16.

89. Третьяков, Е.А. Управление электроподвижным составом на основе мгновенных тяговых расчётов с учётом режимов работы системы электроснабжения железных дорог / Е.Г. Авдиенко, И.Н. Денисов – Текст: непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. № 4 (92). – С.242 – 252.

90. Универсальная система автоведения электровозов пассажирского движения (УСАВП): Руководство по эксплуатации КНГМ.466451.001 РЭ. ООО «АВП Технология», 2011. – 127с.

91. Унифицированная система автоматизированного ведения поездов (УСАВП) Модификация УСАВП/1: Руководство по эксплуатации ЛАРП.468322.002РЭ-01. ООО «АВП Технология», 1999. – 33с.

92. Фандеев Е.И. Исследование энергоэффективных режимов ведения поезда с помощью имитационно-оптимизационной модели // К.И. Юренко, П.А. Харченко, Е.И. Фандеев – Текст: непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4 (51). – 68 с.

93. Худорожко, М.В. Повышение эффективности использования электровоза с микропроцессорной системой управления за счёт оперативного уточнения тепловых характеристик тягового электродвигателя и сопротивления движения поезда: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.22.07 / Худорожко Максим Викторович. – Москва, 2009. – 25 с. – Текст: непосредственный.

94. Черемисин, В.Т. Повышение энергетической эффективности электроподвижного состава в границах зон учета электроэнергии железной

дороги: Научная монография / В.Т. Черемисин, С.Г. Истомина, С.Ю. Ушаков. – Текст: непосредственный; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2019. – 166 с.

95. Юренко, К.И. Исследование энергоэффективных режимов ведения поезда с помощью имитационно-оптимизационной модели / К.И. Юренко, П.А. Харченко, Е.И. Фандеев. – Текст: непосредственный // Инженерный Вестник Дона. – 2018. – № 4 (51). – С. 68.

96. Юренко, К.И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учётом возмущений / К.И. Юренко, А.Н. Савоськин, Е.И. Фандеев. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. технические науки. – 2015. – № 3 (184). – С. 34 – 44.

97. Юренко, К.И. Принципы построения и имитационное моделирование систем автоведения электроподвижного состава / К.И. Юренко, Е.И. Фандеев. – Текст: непосредственный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 8 (181). – С. 88–102.

98. Юренко, К.И. Программный комплекс для математического моделирования движения поезда / К.И. Юренко, Е.И. Фандеев, Ю.А. Жлоба.

99. Ябло, И.А. Численный метод определения энергооптимального управления движением поезда//Железнодорожный транспорт на новом этапе развития. Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2003. С. 129 -135.

100. Albrecht, A.R., Howlett, P.G., Pudney, P.J., & Vu, X. (2013). Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness. *Automatica*, 49(10), 3072-3078. doi:10.1016/j.automatica.2013.07.008

101. An Energy-Efficient Train Operation Approach by Integrating the Metro Timetabling and Eco-Driving. S. Su, X. Wang, and J. Yin are with the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China.

102. Azuma, S.I.; Egerstedt, M.; Wardi, Y. Output-based optimal timing control of switched systems. In Proceedings of the International Workshop on Hybrid Systems: Computation and Control, LNCS, Santa Barbara, CA, USA, 29–31 March 2006.

103. Ding, Y., Bai, Y., Liu, F. -, & Mao, B. -. (2009). Simulation algorithm for energy-efficient train control under moving block system. Paper presented at the 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, CSIE 2009, ,

5 498-502. doi:10.1109/CSIE.2009.323 Carvajal-Carreño, W., C Cala, A. ., &Fernández-Cardador, A. (2014). Optimal design of energy-efficient ATO CBTC driving for metro lines based on NSGA-II with fuzzy parameters. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 36, 164-177. doi:10.1016/j.engappai.2014.07.019

104. Istomin, S.G., Avdienko, E.G., Domanov, K.I., Shatohin, A.P. The Categorization of Methods and Means of Energy Optimized Control of Electric Railway Rolling Stock, *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 510. Springer. pp. 503-511. DOI: 10.1007/978-3-031-11051-1\_50

105. Novak H., Lešić V., Vašak M.: Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated Electric Railway Traction System Energy Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019.

106. Optimal running time supplement distribution in train schedules for energy-efficient train control. Scheepmaker, G.M., Pudney, P.J., Albrecht, A.R., Goverde, R.M.P., Howlett, P.G. (2020) *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 14, статья № 100180.

107. P. Wang and R. M. P. Goverde, “Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 272, no. 2, pp. 621– 635, 2019.

108. Sanchis, I. V., &Zuriaga, P. S. (2016). An energy-efficient metro speed profiles for energy savings: Application to the valencia metro. Paper presented at the *Transportation Research Procedia*, 18 P. 226-233. doi:10.1016/j.trpro.2016.12.031

109. Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017). Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355-376. doi:10.1016/j.ejor.2016.09.044

110. The impact of wind on energy-efficient train control. Alessio Trivella, Pengling Wang, Francesco Corman Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, 8093, Zurich, Switzerland.

111. Tretyakov, E.A., Avdienko E.G. Improvement of Methods of Energy Optimal Automatic Operation of Electric Freight Locomotives, *Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles*. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 510. Springer. pp. 183-191. DOI: 10.1007/978-3-031-11051-1\_18

112. Yang, X.; Li, X.; Ning, B.; Tang, T. A Survey on Energy-Efficient Train Operation for Urban Rail Transit. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2016.
113. Yazhensky, D.; Rashid, M.; Sirouspour, S. An On-Line Optimal Controller for a Commuter Train. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2019
114. Правила тяговых расчётов для поездной работы: утверждены распоряжением ОАО «Российские железные дороги» от 12.05.2016. – Москва, 2016. – 515 с. – Текст: непосредственный.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа проведения эксперимента по испытанию цифрового устройства  
предиктивного интеллектуального управления взаимодействием  
электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры Западно-  
Сибирской железной дороги



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»

ЗАПАДНО-СИБИРСКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА

РАЗРАБОТАНО  
Проректор  
по инновационному развитию  
ОмГУПС  
А. Н. Смердин  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ  
Первый заместитель начальника  
Западно-Сибирской железной дороги  
Е. В. Шапуленко  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

ПРОГРАММА

проведения эксперимента по испытанию цифрового устройства  
предиктивного интеллектуального управления взаимодействием  
электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры  
Западно-Сибирской железной дороги

Согласовано:

Главный инженер  
Западно-Сибирской дирекции тяги  
Новоселов Д. А.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Согласовано:

Главный инженер  
Западно-Сибирской дирекции  
управления движением  
Червяков М.Г.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Согласовано:

Первый заместитель начальника  
Западно-Сибирской дирекции по  
энергообеспечению  
Белоусов Е.А.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Согласовано:

Главный инженер  
топливно-энергетического центра  
Западно-Сибирской железной дороги  
Тюрин М. Е.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Новосибирск, 2022

## Программа проведения экспериментов на полигоне переменного тока Западно-Сибирской железной дороги

Полигоном для проведения исследований определен участок Шпагино-Смазнево Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «Российские железные дороги» (далее Полигон).

Исследования включают в себя серию натуральных экспериментов по испытанию цифрового устройства предиктивного интеллектуального управления взаимодействием электроподвижного состава и энергетической инфраструктуры Западно-Сибирской железной дороги.

Проведение экспериментальных исследований осуществляется в следующих условиях:

- прохождения грузовых и порожних поездов в четном и нечетном направлениях;
- организации движения грузовых поездов с учетом мгновенных параметров системы тягового электроснабжения по ниткам графика, обеспечивающим повышение пропускной способности и совместимость режимов ЭПС и системы тягового электроснабжения.

### 1. ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Основанием для выполнения работ является соглашение № 284а/фх от 22.03.2022 г. о взаимодействии и сотрудничестве открытого акционерного общества «Российские железные дороги» и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» на 2022 – 2025 годы.

### 2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований является экспериментальное испытание цифрового устройства предиктивного интеллектуального управления взаимодействием электроподвижного состава (далее Устройство) и энергетической инфраструктуры железных дорог для обеспечения повышения пропускной способности в условиях ограничений энергетической инфраструктуры в различных эксплуатационных режимах на участке в границах межподстанционных зон Шпагино-Смазнево Западно-Сибирской железной дороги.

Задачей экспериментальных исследований является получение тягово-энергетических результатов движения грузовых электровозов на Полигоне с установленным Устройство, обеспечивающим выработку управляющих воздействий на электроподвижной состав с учетом статусов других поездов в реальном времени на основе измерений токов, напряжений, мощности и других параметров на тягу

поездов по фидерам контактной сети тяговых подстанций Полигона и измерений на электроподвижном составе.

Проведение данного эксперимента позволит отработать первый шаг реализации «Цифровой железной дороги» на тяговых подстанциях и эксплуатируемом в настоящее время электроподвижном составе, определить потенциал повышения пропускной способности на существующей энергетической инфраструктуре за счет оптимизации ситуационного управления электроподвижным составом во взаимодействии с системой тягового электроснабжения и апробировать технические решения на основе испытания Устройства.

### 3. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛНИТЕЛИ

На фидерах контактной сети тяговых подстанций Шпагино, Смазнево и ЭПС должны быть установлены измерительные приборы ОмГУПС, обеспечивающих измерение и передачу данных.

Проведение всех экспериментов осуществляется исключительно в условиях пропуска по межподстанционной зоне Шпагино, Смазнево поездов с установленным Устройством и измерительной системой ОмГУПС, а также оснащенными регистраторами параметров движения.

Общее руководство экспериментальными исследованиями возлагается на главного инженера Западно-Сибирской дирекции тяги Д.А.Новоселова.

Зоны ответственности участников при подготовке и проведении экспериментальных исследований:

Участник экспериментальных исследований	Зона ответственности
Дирекция по энергообеспечению (НТЭ)	обеспечение допуска сотрудников ОмГУПС на тяговые подстанции Шпагино, Смазнево; установка измерительных систем электрической энергии ОмГУПС на фидеры контактной сети тяговых подстанций; информирование об отклонениях от нормального состояния системы внешнего электроснабжения, схем секционирования контактной сети, схем тяговых подстанций межподстанционной зоны Шпагино-Смазнево; предоставление ОмГУПСу данных о параметрах электроэнергии по присоединениям тяговых подстанций Шпагино, Смазнево по данным системы АСКУЭ за время экспериментов;

	<p>предоставление ОмГУПСу данных о параметрах, режимах работы устройств СГРМ, параметров электрической энергии и пр. (при наличии) во время эксперимента;</p> <p>расчет и проверка (уточнение) параметров системы тягового электроснабжения для подготовки графика движения во время эксперимента;</p> <p>предоставление данных по системе тягового электроснабжения Полигона для математического описания силами ОмГУПС.</p>
Дирекция тяги (Т)	<p>установка измерительных систем и Устройства ОмГУПС на электроподвижной состав;</p> <p>подача под поезда, следующие во время экспериментов по участку Шпагино – Смазнево, электровозов с исправными системами автоведения (при наличии) и регистраторами параметров движения, обеспечение требуемых режимов ведения поездов, в том числе по данным Устройства, предоставление данных регистраторов параметров движения по электровозам, участвующим в эксперименте, и передача их ОмГУПСу</p>
Дирекция управления движением (Д)	организация графиков движения поездов, предоставление архивов ГИД-Урал за время проведения эксперимента ОмГУПСу
Топливо-энергетический центр (НТЭЦ)	предоставление ОмГУПСу отчетных данных об электропотреблении на тягу поездов на участках работы локомотивных бригад, включающих межподстанционные зоны Шпагино – Смазнево за требуемые периоды
ОмГУПС	контроль над подключением и работой измерительных систем электрической энергии, Устройства ОмГУПС на фидеры контактной сети тяговых подстанций, электроподвижной состав, получение результатов измерения, обработка и анализ полученной информации

В измерениях на тяговых подстанциях принимают участие:

№	Ф.И.О.	Должность	Группа по электробезопасности
1.	Рогов В.О.	Старший электромеханик ЭЧЭ-404 Шпагино	V
	Цыкалов А.Ю.	Старший электромеханик ЭЧЭ-405 Смазнево	V
2.	Третьяков Е.А.	ОмГУПС	III
3.	Денисов И.Н.	ОмГУПС	

В измерениях на электроподвижном составе принимают участие:

№	Ф.И.О.	Должность	Группа по электробезопасности
1.	Малышенко В.А.	ТЧМИ-7	V
2.	Авдиенко Е.Г.	ОмГУПС	III
3.	Шатохин А.П.	ОмГУПС	III
4.	Доманов К.И.	ОмГУПС	III

В случае необходимости, перечень лиц, принимающих участие в экспериментальных работах, может быть расширен.

#### 4. МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе проведения экспериментальных работ измерения проводятся на тяговых подстанциях Шпагино, Смазнево а также на обращающихся на участке электровозах.

Измерения электроэнергии, тока и напряжения и пр. на фидерах контактной сети тяговых подстанций Шпагино, Смазнево выполняются с помощью измерительных систем ОмГУПС синхронно с измерительными системами и Устройством на электроподвижном составе. Измерения на электроподвижном составе также осуществляются с помощью регистраторов параметров движения с учетом местоположения подвижной единицы по системе Глонасс и фиксации глобального времени.

## 5. ВРЕМЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводятся по готовности в недельный срок. Общая продолжительность экспериментальных исследований определяется временем окончания необходимых измерений и осуществляется в срок до 31 декабря 2022 года. При этом измерения на фидерах контактной сети производятся непрерывно в течение всего времени проведения экспериментальных исследований. Продолжительность измерений на электроподвижном составе определяется условиями конкретного эксперимента и указана в п. 7.

## 6. ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения на фидерах тяговых подстанций Шпагино, Смазнево производятся на протяжении всего срока проведения экспериментальных исследований. Проведение измерений осуществляется с помощью измерительных систем (рисунок 1) электрической энергии ОмГУПСа, подключаемых к соответствующим измерительным цепям тяговых подстанций согласно схемы на рисунке 2.



Рисунок 1 – Подключение измерительных систем электроэнергии к фидерам контактной сети подстанции

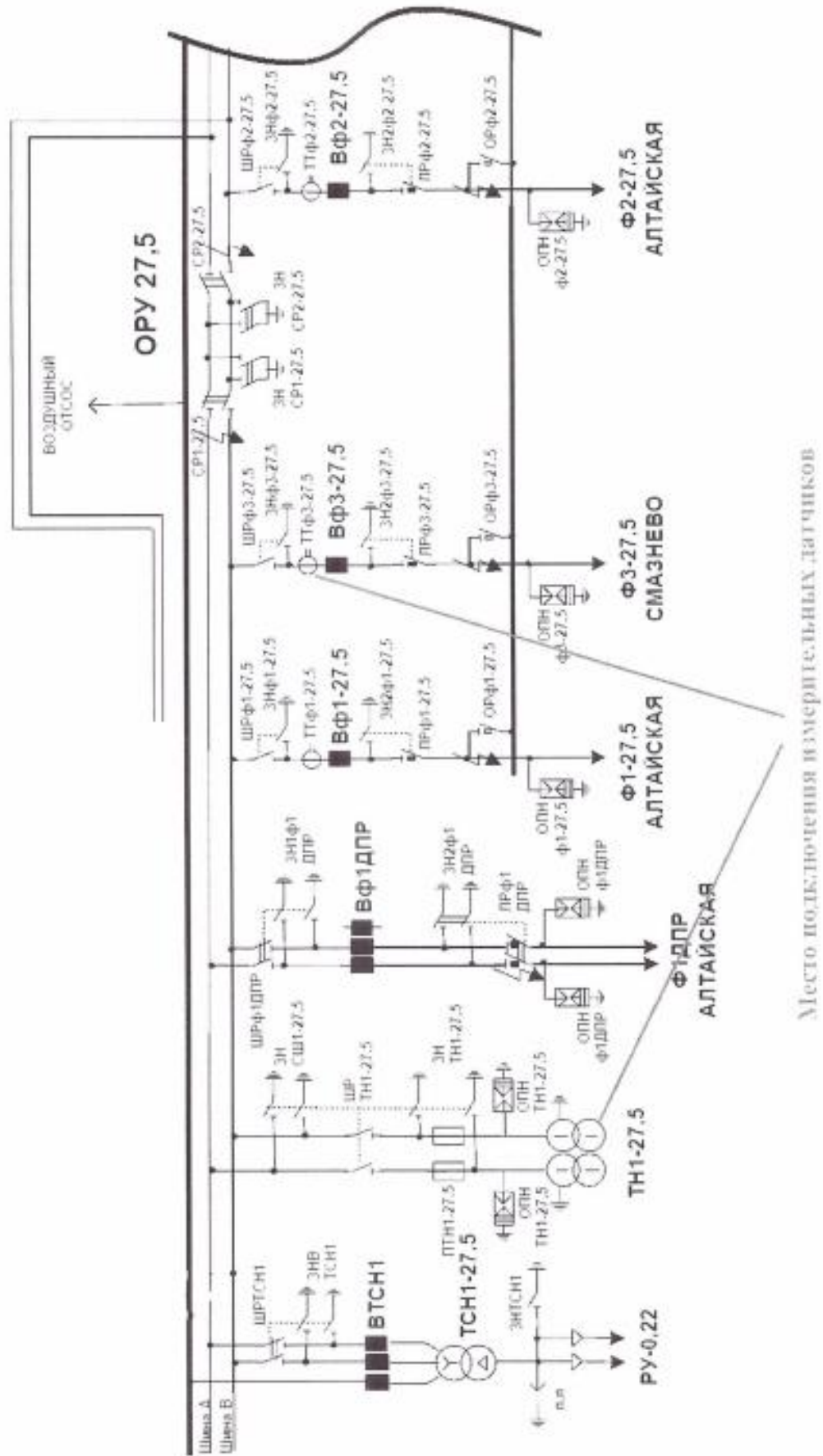
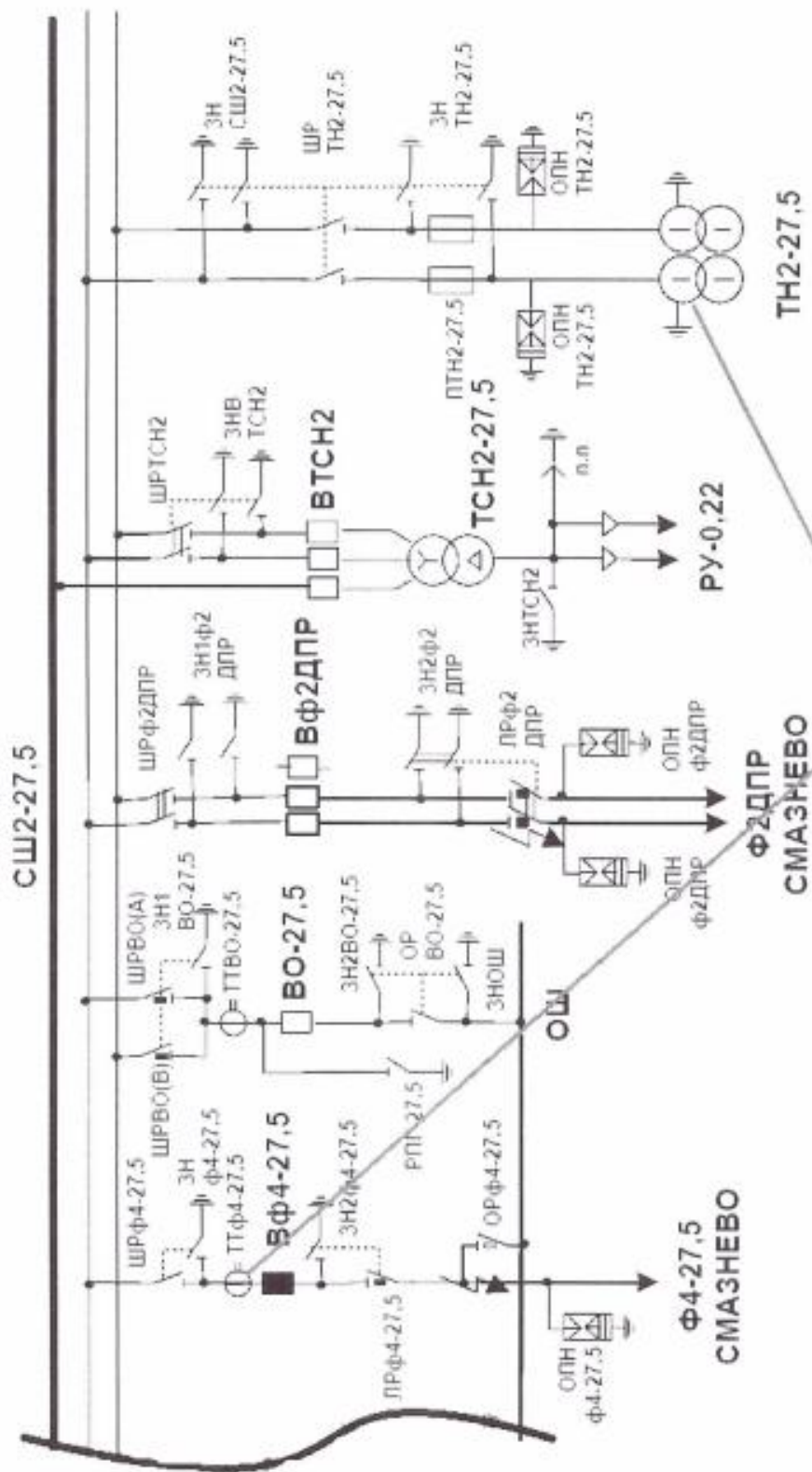


Рисунок 2. Лист 1



Место подключения измерительных датчиков

Рисунок 2. Лист 2 – Подключение измерительных систем электроэнергии к фидерам контактной сети подстанции

## 7. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ответственный в части проведения измерений на тяговых подстанциях, сбора данных – первый заместитель начальника Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению.

Ответственный в части организации пропуска поездов на время проведения эксперимента – главный инженер Западно-Сибирской дирекции управления движением.

Ответственный в части подготовки локомотивов, принимающих участие в эксперименте, расшифровки данных регистраторов параметров движения – главный инженер Западно-Сибирской дирекции тяги.

Ответственный в части предоставления отчетных данных об электропотреблении на тягу поездов на участках работы локомотивных бригад – главный инженер топливно-энергетического центра.

Проведение экспериментов осуществляется при нормальной схеме секционирования контактной сети межподстанционной зоны Шпагино-Смазнево, а также нормальных условиях работы системы внешнего электроснабжения, не препятствующей проведению эксперимента. Изменение состояний систем внешнего и тягового электроснабжения, влияющих на результаты измерений, должны быть зафиксированы энергодиспетчером и через оперативный персонал тяговых подстанций переданы сотрудникам ОмГУПСа для анализа результатов эксперимента.

Все экспериментальные измерения осуществляются в условиях обращения поездов с локомотивами, оснащенными исправными системами регистрации параметров движения и автоведения и системами рекуперации (при наличии). Ведение экспериментальных поездов осуществляется в соответствии с графиком движения и принципами работы Устройства.

По завершении каждого эксперимента результаты измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе передаются для анализа представителям ОмГУПС.

### *7.1 Этап 1. Подготовка к эксперименту*

1) перед началом эксперимента Западно-Сибирская дирекция по энергообеспечению предоставляет сотрудникам ОмГУПСа данные по системе тягового электроснабжения Полигона для математического описания движения поездов и уточнения программного обеспечения Устройства;

2) на основе полученных ОмГУПС результатов Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению осуществляет расчет и проверку (уточнение) параметров системы тягового электроснабжения для подготовки графика движения во время эксперимента (график движения должен обеспечивать возможность воздействия на ЭПС (отработки алгоритма) с целью снижения недопустимой перегрузки оборудования системы тягового электроснабжения и отработки алгоритма повышения пропускной способности путем координированного управления несколькими ЭПС на межподстанционной зоне);

3) Западно-Сибирской дирекции управления движением согласует предполагаемый график движения поездов во время эксперимента.

### 7.2 Этап 2. Проведения эксперимента

- 1) Перед началом измерений Западно-Сибирская дирекция тяги устанавливает измерительные системы и Устройства ОмГУПС на электроподвижной состав;
- 2) Перед началом измерений Западно-Сибирской Дирекции тяги обеспечивает подачу под грузовые поезда электровозы серии ВЛ80с с исправными регистраторами параметров движения, проводит инструктаж локомотивных бригад и участников эксперимента;
- 3) Перед началом измерений Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению устанавливает измерительные системы электрической энергии ОмГУПС на фидеры контактной сети тяговых подстанций;
- 4) Сотрудники ОмГУПС оповещают энергодиспетчера через оперативный персонал подстанции о готовности к производству измерений.
- 5) Дирекция управления движением осуществляет пропуск поездов по участку Шпагино-Смазнево в соответствии с графиком движения.
- 6) В процессе движения по алгоритму работы Устройства Западно-Сибирская дирекция тяги осуществляет ведение поезда по участку;
- 7) Временем начала измерений считается начало суточного графика;
- 8) Временем окончания измерений считается окончание прохождения ЭПС с установленными измерительными системами и Устройством межподстанционной зоны.
- 9) Длительность проведения измерений зависит от количества повторений на участке Шпагино-Смазнево.
- 10) Количество повторений – до двух.

## 8. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

По результатам измерений будет выполнен мгновенный расчет степени влияния ЭПС на параметры системы тягового электроснабжения (в т.ч. на узлы с другими ЭПС), степени взаимного влияния ЭПС; определены уставки (ограничения), допустимых режимов для каждого ЭПС (скорость, позиция, мощность и пр.) на основе мгновенных тяговых расчетов с учетом поездной обстановки с прогнозированием.

Выполняется оценка возможности автоматического определения ограничений по потребляемой мощности с учетом складывающейся поездной обстановки на основе проведения оценочных тяговых расчетов в режиме реального времени и поддержки принятия оптимальных решений по ситуационному управлению ЭПС с целью повышения пропускной способности и обеспечения взаимодействия с системой тягового электроснабжения (снятие перегрузки).

Определяются тягово-энергетические и технико-экономические показатели результата работы Устройства.

УТВЕРЖДАЮ  
 Главный инженер  
 эксплуатационного  
 локомотивного депо Омск  
 Западно-Сибирской дирекции  
 тяги структурного  
 подразделения Дирекции тяги  
 филиала ОАО «РЖД»  
 Е. В. Романов  
 «27» апреля 2024 г.



**АКТ**  
**об использовании результатов научных исследований и разработок в**  
**производстве**

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненные под руководством д.т.н., профессора кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» (ЭПС) Е. А. Третьякова при личном участии аспиранта кафедры ЭПС Е. Г. Авдиенко.

1. Алгоритм системы автоматизированного управления магистральным электровозом в режиме автоведения, учитывающий фактические параметры движения поезда (сопротивление движению поезда) и внешние факторы (ограничения энергетической инфраструктуры, статусы электроподвижного состава на межподстанционной зоне), реализация которого позволит повысить эффективность эксплуатации электроподвижного состава в части снижения расхода электроэнергии на тягу поездов за счёт использования фактических параметров движения поезда;

2. Принцип согласования параметров режимов работы магистральных электровозов для оперативной корректировки графиков движения поездов в реальном времени системой автоведения, позволяющий учитывать статусы соседних участников движения в пределах межподстанционной зоны в зависимости от ограничения энергетической инфраструктуры для повышения пропускной способности участка и снижения пиковых мощностей в системе тягового электроснабжения, в том числе в рамках технологии «Виртуальная сцепка».

Рекомендуется использование указанных в акте разработок ОмГУПС в эксплуатационных локомотивных депо сети железных дорог ОАО «РЖД».

Начальник технического отдела  
 ТЧЭ-2 Омск

Д.А.Клок

Профессор кафедры ЭПС,  
 д.т.н., доцент

Е.А. Третьяков

Аспирант кафедры ЭПС ОмГУПС

Е.Г. Авдиенко