

На правах рукописи



Журавлев Сергей Николаевич

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
СКОРОСТЬЮ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА**

2.9.3 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
Пудовиков Олег Евгеньевич

Официальные
оппоненты: **Кулинич Юрий Михайлович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Транспорт железных дорог»;

Зарифьян Александр Александрович
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» профессор кафедры «Тяговый подвижной состав».

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), г. Москва.

Защита состоится 17 октября 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, аудитория 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ): www.miiit.ru

Автореферат разослан " ____ " _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Маневровая работа тепловозов на станциях, оборудованных горками, сопряжена с низкой энергоэффективностью электропередачи в целом и силовой установки в частности, что связано с частыми сменами позиции контроллера машиниста и значительным временем работы в переходных режимах, причем конкретные характеристики и условия горочной работы имеют случайную природу и зависят от целого ряда факторов – уклоны горочных путей и переломы профиля, масса поступающих на переработку поездов, максимальная скорость движения при надвиге и роспуске и др. Большую часть времени маневровые тепловозы работают при частичной нагрузке и при низких скоростях, что приводит к значительному снижению энергоэффективности силовой установки. Также значительный процент от общего времени приходится на простой тепловоза. В настоящее время в большинстве случаев управление маневровым тепловозом при осуществлении горочной работы происходит в ручном режиме – качество формируемых переходного процесса, продолжительность работы на различных позициях контроллера машиниста, а, следовательно, и эффективность всего тепловоза определяются профессиональными качествами локомотивной бригады или машиниста. Следует отметить, что вопросы поддержания требуемых скоростей надвига и роспуска состава важны не только с точки зрения обеспечения высокой экономичности преобразования энергии в тепловозе, но и точки зрения технологии расформирования состава, пропускной способности сопряженных железнодорожных путей и т.д.

Таким образом, актуальной становится задача разработки системы совместного управления дизель-генераторной группы и тягового электропривода маневрового локомотива с целью автоматического управления скорости движения поезда с учетом действующих в электрической передаче тепловоза ограничений и внутренних взаимосвязей.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в разработку систем автоматического управления скоростью и автоматизацию процессов управления поездов внесли такие ученые, как Л.А. Баранов, Д.Д. Захарченко, И.П. Исаев, П.Е. Коваль, А.С. Космодамианский, В.А. Кучумов, В.Н. Лисунов, Н.М. Луков, Н.С. Назаров, Б.Д. Никифоров, Н.Б. Никифорова,

А.В. Плакс, О.Е. Пудовиков, А.Н. Савоськин, Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман, В.Д. Тулупов, В.П. Феокистов и многие другие.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование системы автоматического управления скоростью движения маневрового тепловоза в режиме горочной работы.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

– выполнить сравнительный анализ существующих и перспективных технических решений по автоматическому управлению скоростью движения тягового подвижного состава;

– разработать структурные схемы и математические модели функциональных узлов и подсистем электропередачи маневрового тепловоза, входящих в состав системы автоматического управления скоростью тепловоза, определены эксплуатационные факторы, оказывающие наибольшее влияние на переходные процессы в электрической передаче маневрового тепловоза;

– выбрать критерии для оценки качества работы системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в условиях горочной работы;

– разработать функциональную схему системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы, для которой синтезированы алгоритмы работы регуляторов напряжения и мощности;

– решить задачу параметрического синтеза регулятора скорости движения маневрового тепловоза;

– выполнить имитационное моделирование разработанной системы автоматического управления скоростью движения маневрового тепловоза в режиме горочной работы;

– провести экспериментальные исследования на тепловозе ТЭМ7А в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги при совместной работе системы автоматизации сортировочной станции MSR32 и разработанной системой автоматического управления скоростью;

– определить экономическую эффективность при использовании тепловозов ТЭМ7А, оборудованных разработанной системой автоматического управления.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана функциональная схема системы автоматического управления скоростью движения маневрового тепловоза и её математическая модель, а также математические модели функциональных узлов и подсистем электропередачи маневрового тепловоза;
- разработаны алгоритмы работы регуляторов скорости, напряжения и мощности тягового генератора, применение которых обеспечивает требуемое качество управления скоростью в характерных для работы на сортировочной горке малых скоростях движения при наличии значительных возмущающих воздействиях;
- сформулирована система критериев для оценки качества работы системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в условиях горочной работы;
- разработана методика решения и решена задача параметрического синтеза регулятора скорости маневрового тепловоза для различных условий работы.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- предложенные структурные схемы и математические модели функциональных узлов электропередачи позволяют разрабатывать и исследовать на компьютерных моделях системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза;
- применение задатчика интенсивности изменения скорости совместно с разработанной системой автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы позволило удовлетворить требованиям к качеству процессов управления в контуре скорости при работе в переходных и установившемся режимах во всем диапазоне изменения задающих скоростей движения и возмущающих воздействий от сопротивления движению поезда;
- реализован режим автоматического управления скоростью движения маневрового тепловоза ТЭМ7А за счет применения разработанной системы автоматического управления скоростью и системы автоматизации сортировочной станции *MSR32*;

– применение маневрового локомотива ТЭМ7А, оборудованного системой автоматического управления с функцией автоматического поддержания скорости при надвиге и роспуске составов, обеспечит экономию годовых текущих расходов за счет сокращения расходов на оплату труда машинистам станции Лужская – Сортировочная Октябрьской железной дороги, составляющую, по предварительным оценкам, 17044,6 тысяч рублей.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы методы теории автоматического управления, теории цепей, теории электромеханического преобразования энергии, теории тяги и имитационного моделирования. Компьютерная математическая модель была разработана с на базе программных пакетов *Delphi*. Экспериментальные исследования проведены на тепловозе ТЭМ7А-0543 в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги.

Положения, выносимые на защиту:

- функциональная схема и принцип работы системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы;
- математические модели и структурные схемы функциональных узлов и подсистем электропередачи маневрового тепловоза, входящих в состав системы автоматического управления скоростью тепловоза;
- алгоритмы работы регуляторов напряжения и мощности системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы;
- алгоритм и результаты определения параметров ПИ-регулятора автоматического управления скоростью маневрового тепловоза;
- результаты компьютерного моделирования разработанной системы автоматического управления;
- методика и результаты экспериментального исследования разработанной системы управления на тепловозе ТЭМ7А-0543 в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги.

Достоверность полученных результатов обеспечивается обоснованностью используемых теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов; подтверждается

качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались и получили одобрение на заседаниях научно-технического совета АО «ВНИКТИ» в 2021, 2022, 2023 и 2024 годах, на заседаниях кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ) в 2020, 2022, 2023 и 2024 годах и научно-технических конференциях: XX Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (26–27 ноября 2020 г.), I-ой международной научной конференции аспирантов и молодых ученых «Железная дорога: путь в будущее» (28–29 апреля 2022 г., г. Москва), IX-ой международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (15–18 мая 2023 г., г. Орел), II-ой Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (25 мая 2023 г., г. Москва), 15-ой юбилейной Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (28–29 ноября 2023 г., г. Ростов-на-Дону).

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанная в диссертационной работе система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы нашла применение при разработке и совершенствовании автоматизации процессов управления маневровыми тепловозами в АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»). Результаты диссертационной работы также внедрены в учебный процесс на кафедре «Электропоезда и локомотивы» в РУТ (МИИТ).

Результаты практического использования полученных в диссертации исследований подтверждены соответствующими актами, представленными в приложении к диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы и 8 приложений. Работа изложена на 154 страницах, в том числе: 121 страницу основного текста, 71 рисунок, 2 таблицы. Список литературы содержит 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о структуре диссертации.

В **первом разделе** проанализировано состояние проблемы автоматизации работы маневрового тепловоза – выявлены основные тенденции в работах по созданию и модернизации маневровых тепловозов, систематизированы условия и характеристики работы маневровых тепловозов, выполнен обзор существующих систем автоматического регулирования скорости движения, рассмотрены особенности автоматизации процессов управления электропередачей маневрового локомотива при работе на сортировочной станции. Показано, что основная доля работ направлена на автоматизацию электроподвижного состава или магистральных тепловозов, в отношении автоматизации сортировочной маневровой работы маневровых локомотивов количество работ существенно меньше, что объясняется сложностью формирования задания и поддержания скорости в связи с гораздо большим временем переходных процессов в общей работе локомотива, более жесткими требованиями к относительной точности регулирования, что связано с меньшими скоростями движения.

Установлено, что основной опыт автоматизации сортировочной маневровой работы заключен в работах специалистов ВНИКТИ, которыми при участии автора диссертации для горочного тепловоза ТЭМ7А был разработан оригинальный алгоритм адаптивного комбинированного (по возмущению и отклонению регулируемой величины) управления дизель-генераторной установкой тепловоза в режиме автоматического поддержания заданной скорости. Алгоритм включает прогнозный расчет заданного значения напряжения тягового генератора и соответствующей ему мощности на выходе выпрямительной установки для текущего значения ее тока и заданной скорости движения.

Во **втором разделе** разработана математическая модель электропередачи маневрового локомотива. Функциональная схема предлагаемой системы автоматического управления скоростью показана на рисунке 1.

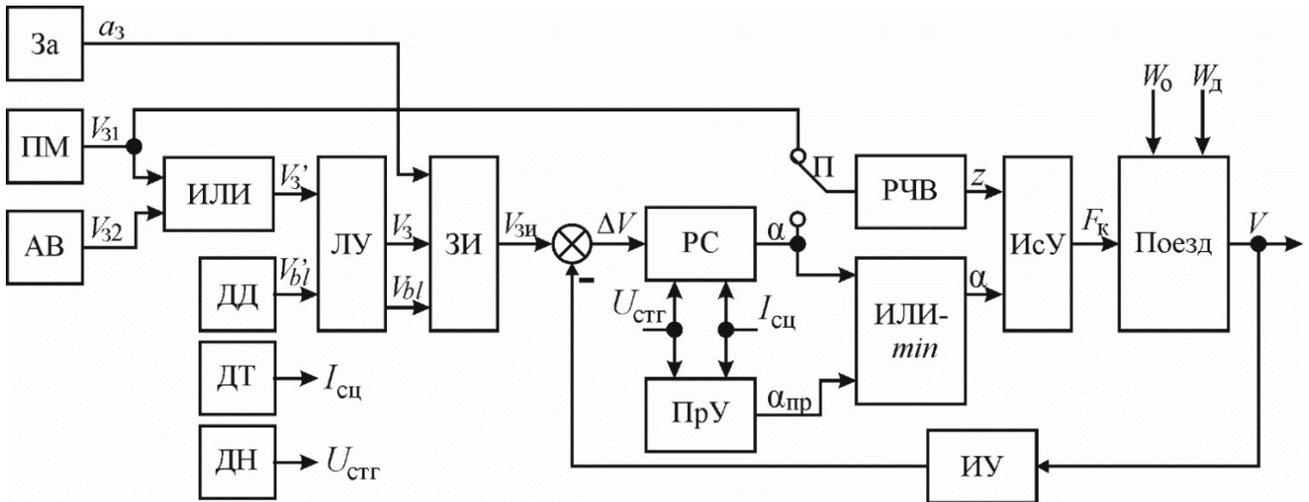


Рисунок 1 – Функциональная схема системы автоматического управления скоростью

Система содержит пульт машиниста, с помощью которого возможно дискретное задание скорости V_{31} , соответствующее позиции контроллера машиниста $N_{км}$; вышестоящую систему автоведения АВ, которая вводит заданное значение скорости V_{32} ; элемент ИЛИ, на выходе которого величина скорости V_3' соответствует одному из двух значений V_{31} или V_{32} . Логическое устройство ЛУ необходимо для блокирования режимов тяги и торможения в случае включения пневматического тормоза в обход системы автоматического управления скоростью, что сигнализируется сигналом V_{bl}' от датчика давления в тормозных цилиндрах. В систему введен задатчик интенсивности ЗИ, обеспечивающий плавное изменение задания на скорость $V_{3и}$ до уровня V_3 с ускорением a_3 , задаваемым задатчиком ускорения За пульта машиниста, и выполнение ограничения по плавности хода в переходных режимах движения поезда. Элемент сравнения вычисляет рассогласование ΔV между значением скорости $V_{3и}$ и фактической скоростью поезда V , измеренной измерительным устройством ИУ (датчиком скорости). Для регулирования частоты вращения вала дизеля применен регулятор РЧВ, выход которого z является управляющим входом для дизеля, входящего в состав исполнительного устройства (ИсУ). Переключатель П осуществляет подключение РЧВ к пульта машиниста или выходу регулятора скорости в зависимости от используемого режима работы тепловоза. Регулятор скорости поезда РС рассчитывает второй управляющий сигнал, подаваемый на ИсУ, – угол открытия тиристоров α управляемого выпрямителя системы регулирования возбуждения тягового двигателя (ТД). Программное устройство (ПрУ) учитывает информацию об ограничениях тягового генератора по

напряжению $U_{стг}$ и току $I_{сц}$, для чего в систему введены соответствующие датчики ДН и ДТ. Элемент ИЛИ-min выбирает из двух сигналов α и $\alpha_{пр}$ наименьший и подает его ИСУ.

Структурная схема последовательности моделирования системы автоматического регулирования скорости приведена на рисунке 2.

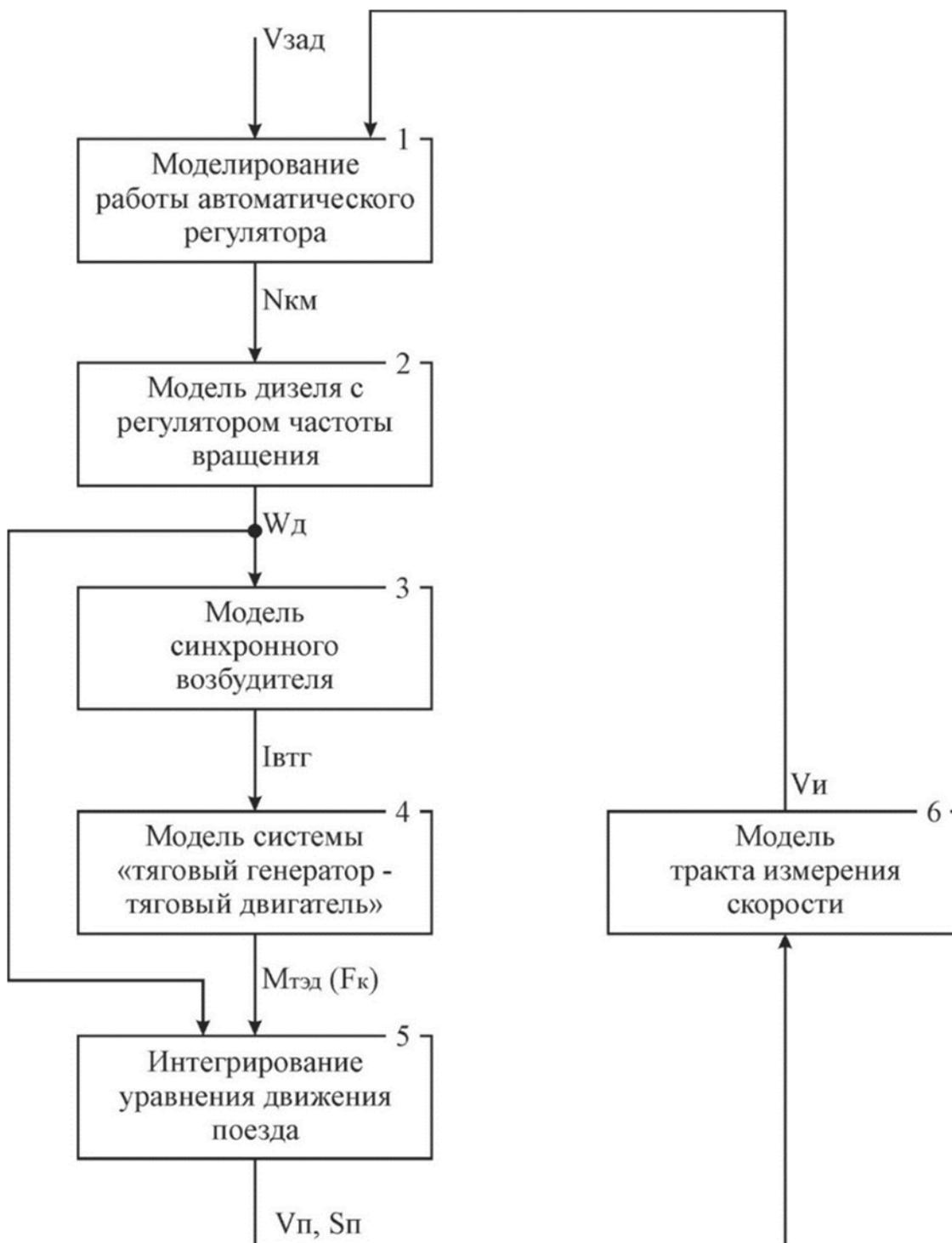


Рисунок 2 – Структурная схема моделирования автоматической системы

На основании алгебраических и дифференциальных уравнений разработано математическое описание основных элементов электропередачи маневрового тепловоза, состоящего из дизеля, синхронного подвозбудителя, тягового синхронного генератора, тягового двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, модуля реализации силы тяги, регулятора частоты вращения и измерителя скорости.

В третьем разделе выполнен синтез системы автоматического управления скоростью тепловоза.

В результате анализа наиболее критичных задач, которые должны решать системы автоматического управления скоростью для повышения эффективности работы сортировочных станций, в качестве основных критериев качества при синтезе системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза решено принять установившуюся ошибку и монотонный или апериодический характер переходного процесса (т.е. допускается не более одного колебания за время переходного процесса).

Основными исполнительными устройствами в структуре системы автоматического управления скоростью является дизель-генераторная установка, для обеспечения нормальных режимов работы которых необходимы регулятор мощности дизеля и регулятор напряжения генератора. Разработаны алгоритмы работы регулятора напряжения и мощности тягового генератора. Регулятор мощности является подчинённым контуру регулирования скорости. Регулятор напряжения является подчиненным контуру регулирования мощности.

Были исследованы система с адаптивным регулятором скорости, синтезированным на поисковом принципе, и система с ПИ-регулятором скорости. В результате компьютерного моделирования установлено, что адаптивный регулятор скорости неудовлетворительно отрабатывает процесс роспуска состава, допуская колебательные переходные процессы за счет постоянного ступенчатого изменения величины пропорциональной составляющей регулятора в процессе работы. При применении ПИ-регулятора, параметрами которого выбраны в результате решения задачи синтеза методом логарифмических амплитудно-частотных характеристик системы, также

присутствует существенная колебательность по скорости при роспуске состава, что является неудовлетворительным.

В результате проведенного анализа требований к синтезируемой системе и методов оценки качества, учитывая специфику работы тепловоза в горочном режиме, когда роспуск вагонов сопровождается колебательными переходными процессами, принято решение использовать интегральную оценку второго порядка в качестве оптимизируемого критерия качества:

$$I_2 = \int_0^{\infty} (V(\infty) - V(t))^2 dt, \quad (1)$$

или в дискретном виде:

$$I_2 = \sum_0^{t_{\text{пп}}} (V(t_{\text{пп}}) - V_i)^2, \quad (2)$$

где $V(t_{\text{пп}})$ – скорость тепловоза при завершении переходного процесса, V_i – скорость тепловоза в i -й момент времени.

Результаты исследований переходных процессов показали, что ПИ-регулятор обеспечивает нулевую статическую ошибку при постоянном возмущении поэтому регулятор с такой структурой принят за базовый. Поскольку объект управления является нелинейным, для выбора оптимального значения параметров регулятора был применен одномерный метод оптимизации Монте-Карло.

Анализ результатов моделирования системы показал, что для каждого из рассмотренных вариантов состава и диапазона изменения значений параметров регулятора существует оптимальное (минимальное) значение интегральной оценки (для примера на рисунке 3 представлена зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 1600 т, на рисунках 4, 5 результаты моделирования процессов надвига и роспуска на сортировочную горку для поезда массой 800 т).

Полученные результаты позволяют использовать предложенный подход для синтеза систем автоматического управления скоростью маневрового тепловоза. Исходными данными для синтеза в этом случае являются параметры основные параметры элементов энергетической цепи, а также масса поезда.

Предлагаемый алгоритм работы регулятора скорости приведен на рисунке 6.

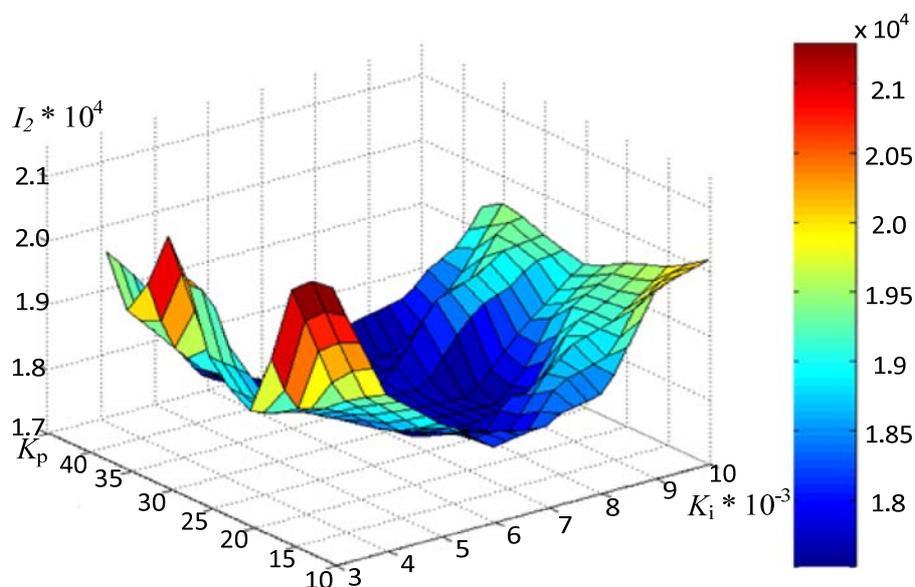


Рисунок 3 – Зависимость интегральной ошибки второго рода от значений параметров регулятора скорости для поезда массой 1600 т (20 вагонов по 80 тонн)

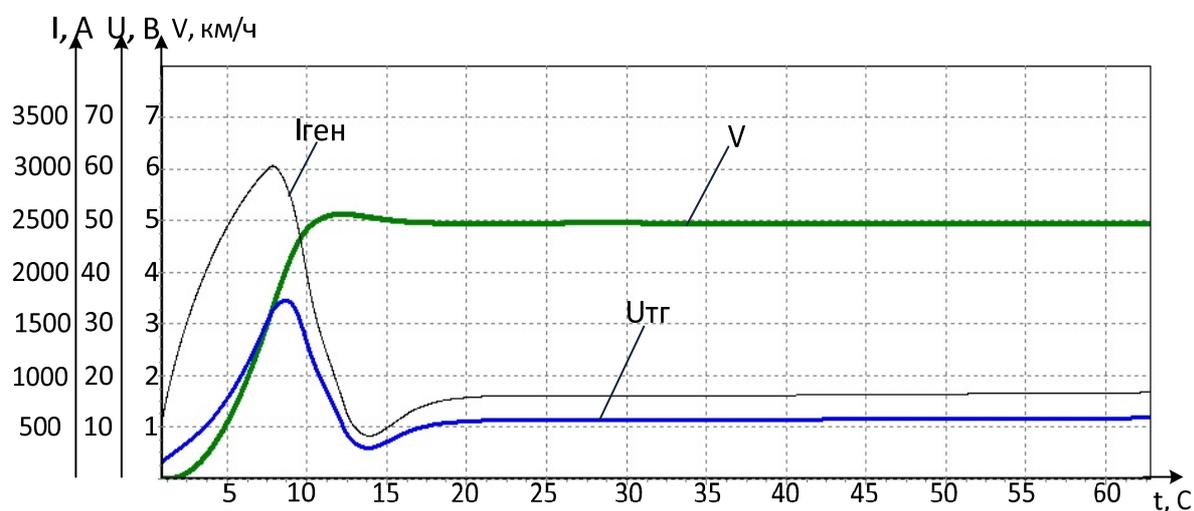


Рисунок 4 – Результаты моделирования при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 800 т

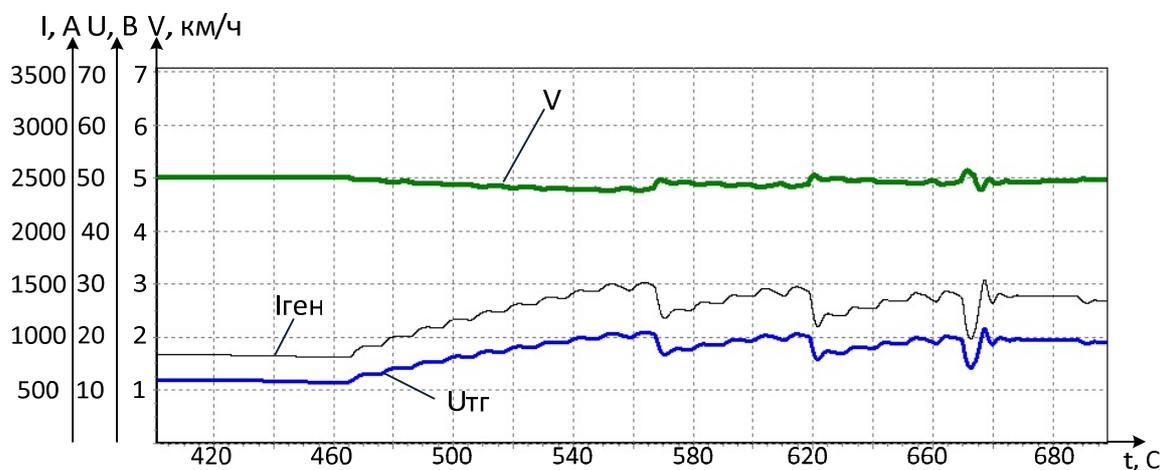
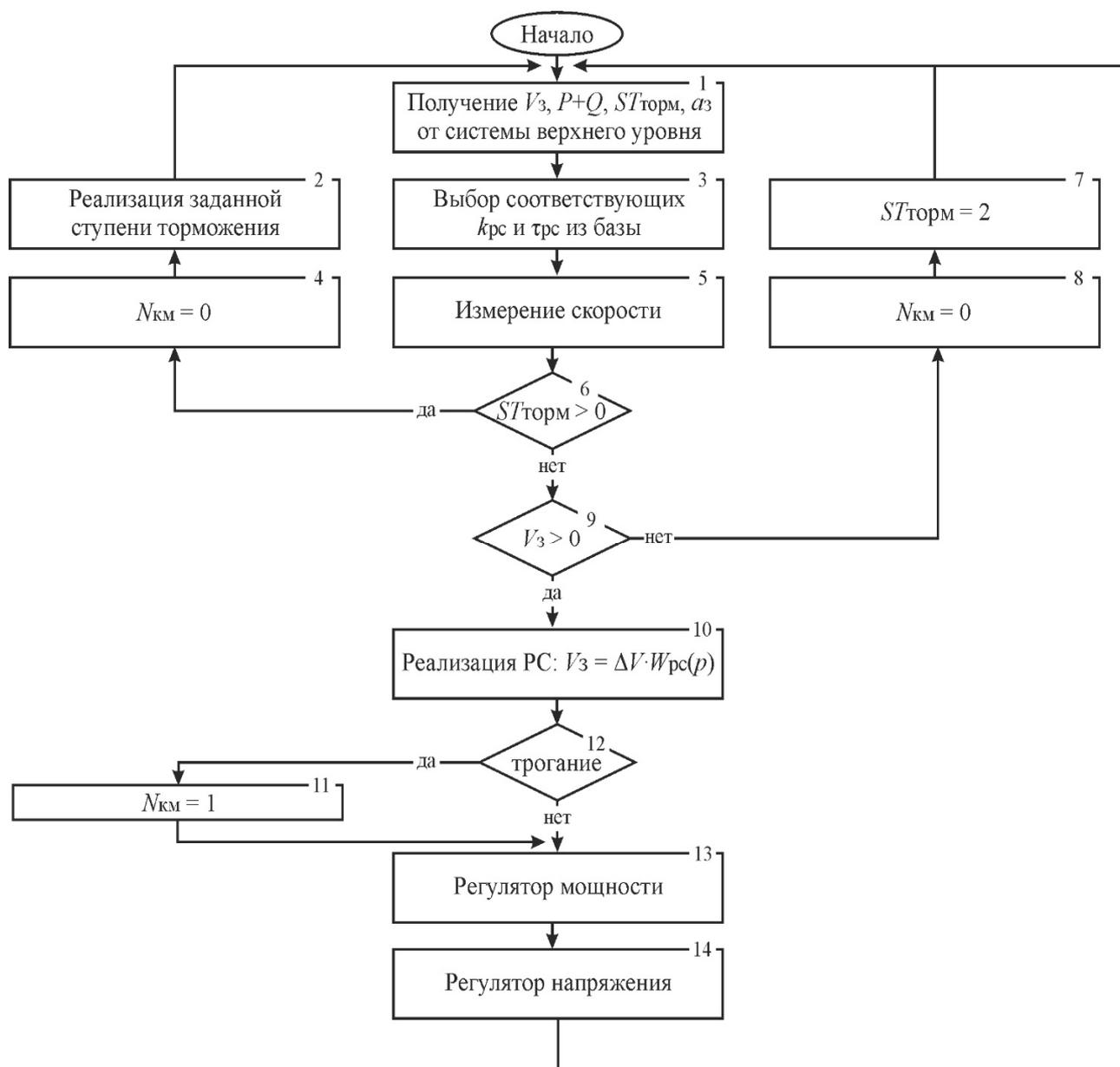


Рисунок 5 – Результаты моделирования при надвиге и начале роспуска состава при массе поезда 800 т



**Рисунок 6 – Блок схема алгоритма управления тепловозом
в режиме поддержания скорости**

В блоке 1 система автоматического управления скоростью получает от систем верхнего уровня заданную скорость ($V_{\text{зад}}$), массу поезда ($m_{\text{поезд}}$), степень торможения ($ST_{\text{торм}}$), а также интенсивность разгона ($V'(t)$). В блоке 3 в зависимости от массы поезда выбираются соответствующие коэффициенты K_p и K_i определенные в данной работе ранее. В блоке 5 производится измерение скорости движения локомотива. В блоке 6 анализируется заданная степень торможения от системы верхнего уровня. При заданной степени больше 0 в блоках 4 и 2 осуществляется сброс тяговой позиции и реализация заданных ступеней торможения. В блоке 9 анализируется заданная скорость движения

локомотива и при нулевом значении заданной скорости в блоке 7 осуществляется реализация второй ступени торможения для удержания состава на месте. В блоке 10 реализован пропорционально-интегральный закон регулирования для расчета $U_{\text{зад}}$. Блок 12 необходим для перевода локомотива в режим «тяга». В блоках 13 и 14 реализуются регулятор мощности и регулятор напряжения соответственно.

Анализ результатов моделирования при разгоне и поддержании скорости показывает, что ПИ-регулятор скорости обеспечивает точное поддержание фактической скорости тепловоза во всем рассматриваемом диапазоне. С точки зрения колебательности скорости переходные процессы во всем рассматриваемом диапазоне являются апериодическими. Работа регуляторов напряжения и мощности также адекватна, в переходных процессах тока и напряжения наблюдается большая колебательность по отношению к контуру скорости, однако эти колебания демпфируются значительной инерционностью состава. Применение задатчика интенсивности совместно с ПИ-регулятором скорости позволило сформировать плавные переходные процессы во всем диапазоне изменения задающих и возмущающих воздействий.

Анализ результатов моделирования при надвиге и начале роспуска состава показывает, что несмотря на колебания тока и напряжения, неизбежно возникающие при отцепе вагонов, регулятор скорости обрабатывает эти возмущения с максимальной динамической ошибкой менее 0,2 км/ч, установившаяся же ошибка асимптотически стремится к нулю. Время регулирования в достаточно сильной степени определяется прежде всего массой состава и составляет 20 – 200 с.

В четвертом разделе приведены методика и результаты экспериментальных исследований процессов надвига и роспуска состава с синтезированным ПИ-регулятором.

Проверка управления скоростью локомотива проводится в автоматическом режиме по командам задающей системы верхнего уровня MSR32. Из зарегистрированной в ходе маневровой работы данных о параметрах работы подвижного состава отбираются эпизоды управления тягой в режиме поддержания заданной скорости.

В ходе выполнения проверки оценивалась работа электропривода локомотива в автоматическом режиме и точность поддержания заданной

скорости. Результаты испытаний считаются положительными, если происходит автоматическое управление тягой по командам системы *MSR32* и реализуется поддержание заданной скорости с точностью 0,05 м/с.

Экспериментальные данные необходимые для оценки проверки работоспособности синтезированного алгоритма поддержания заданной скорости движения маневрового тепловоза ТЭМ7А с ПИ-регулятором при совместной работе с системой автоматизации сортировочной станции *MSR32* (разработки фирмы *SIEMENS*) получены по результатам испытаний ТЭМ7А-0543 в парке приема станции Лужская Октябрьской железной дороги в период с 11 по 12 июля 2023 года. В ходе испытаний в автоматическом режиме были осуществлены операции надвига и роспуска составов разной массы (от 900 т до 5100 т) со скоростями, заданными системой автоматизации сортировочной станции *MSR32* (от 2 км/ч до 15 км/ч).

Результаты экспериментальных исследований по надвигу и роспуску состава массой 5100 в режиме поддержания скорости приведены на рисунках 7, 8.

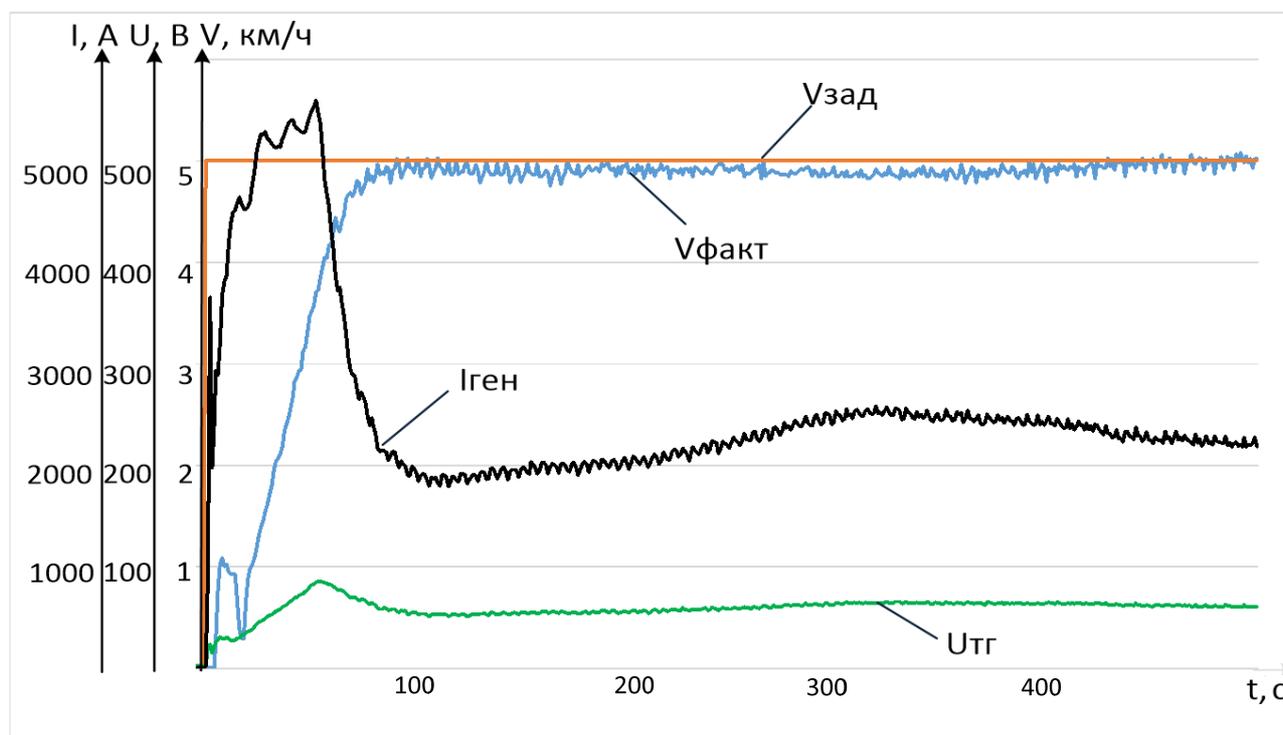


Рисунок 7 – Экспериментальные результаты при разгоне и поддержании скорости при массе поезда 5100 т

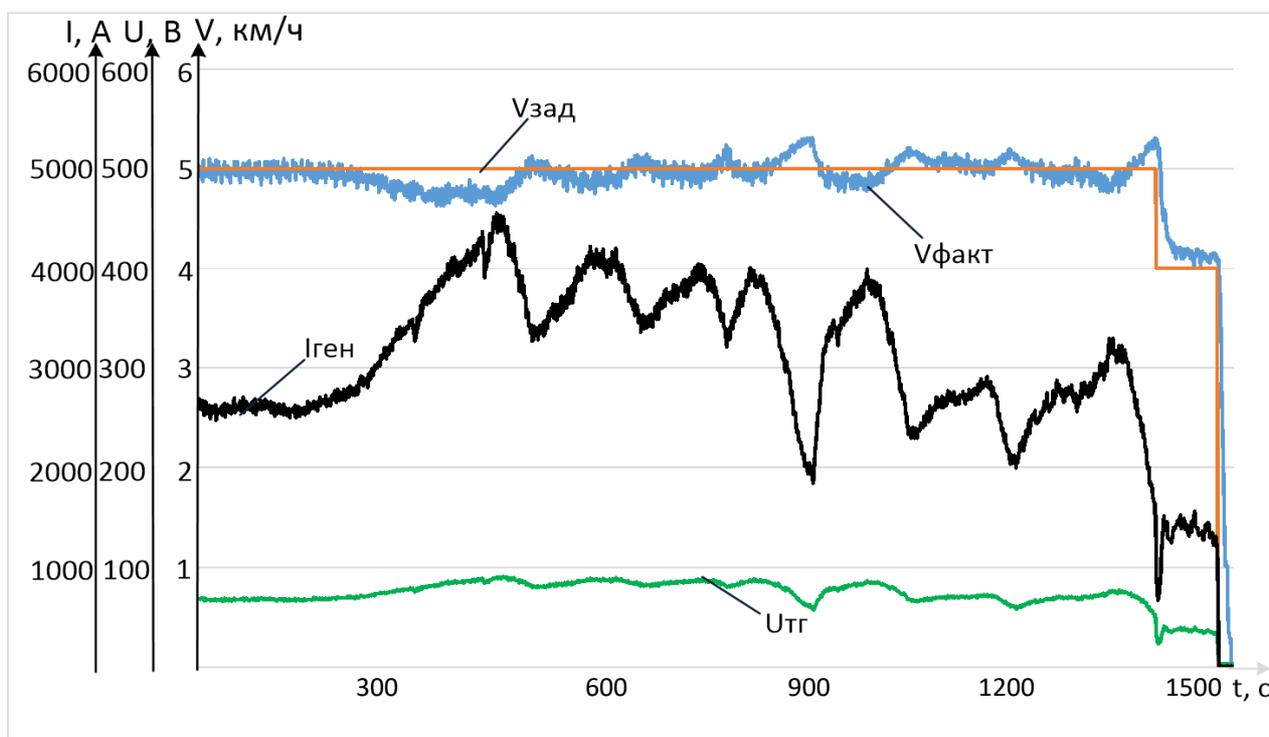


Рисунок 8 – Экспериментальные результаты при роспуске состава и поддержании скорости при массе поезда 5100 т

Полученные результаты экспериментальных исследований показали целесообразность применения системы автоматического регулирования скорости на маневровых тепловозах, работающих на сортировочных станциях. Показатели качества управления, в частности, вид переходного процесса а также точность поддержания скорости движения соответствуют требованиям, предъявляемым к системам автоматического управления скоростью локомотива. Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность выбранных технических решений и адекватность синтезированных регуляторов и алгоритмов управления, а также высокую сходимость результатов компьютерного моделирования, проведенного в третьем разделе. После окончания переходного процесса, вызванного изменением задания скорости от систем верхнего уровня и связанного с ним неизбежного перерегулирования, система стабильно поддерживает скорость состава в пределах $\pm 0,05 - 0,18$ км/ч от заданного значения.

В пятом разделе выполнен расчет экономической эффективности внедрения горочных локомотивов ТЭМ7А, оборудованных системой автоматического управления с функцией автоматического поддержания скорости при надвиге и роспуске составов. Оборудование трех локомотивов

ТЭМ7А системой автоматического управления горочным локомотивом с функцией «без машиниста» при выполнении маневровой работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги позволит оптимизировать технологию выполнения работ и обеспечит экономию годовых текущих расходов по оплате труда машинистам в размере 17044,6 тысяч рублей. Величина интегрального эффекта при внедрении САУ ГЛ с функцией «без машиниста» на 3-х тепловозах ТЭМ7А при выполнении маневровой работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги составит 66857 тысяч рублей при сроке окупаемости затрат 4,54 года (или 3,54 года с начала эксплуатационной фазы без учета инвестиционного этапа) за срок службы системы 20 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведён сравнительный анализ существующих и перспективных технических решений по автоматическому управлению скоростью движения тягового подвижного состава. При эксплуатации маневровых локомотивов на в условиях сортировочной горки основную проблему представляет поддержание с высокой точностью малых скоростей движения в условиях действия значительных возмущений. Для обеспечения требуемого качества управления скоростью целесообразно применение на маневровых тепловозах, осуществляющих горочную работу, систем автоматического управления скоростью.

2 Разработаны структурные схемы и математические модели функциональных узлов и подсистем электропередачи маневрового тепловоза. Работа маневрового тепловоза по роспуску состава на сортировочной горке оказывает существенное влияние на протекание переходных процессов в электрической передаче, при этом наиболее значимым возмущением является изменение сопротивления движению поезда при отцепе нескольких вагонов.

3 Предложена система критериев для оценки качества работы системы автоматического управления маневрового тепловоза в условиях горочной работы. Показано, что условиями безопасности движения, а также особенностями работы горочного локомотива, в системе критериев необходимо рассматривать показатель, характеризующий вид протекания переходного процесса в контуре скорости системы автоматического управления, а также

величину оценки интегральной квадратичной ошибки регулирования выходной координаты.

4 Разработана функциональная схема системы автоматического управления скоростью маневрового тепловоза. Обеспечение требуемого качества управления скоростью в переходных режимах работы достигнуто в результате установки на вход замкнутого контура управления скорости устройства, обеспечивающего сглаживание входного сигнала таким образом, чтобы сигнал на выходе этого устройства с изменялся с интенсивностью, определяемой заданным ускорением движения.

5 Решена задача параметрического синтеза регулятора скорости движения маневрового тепловоза и определены рациональные с точки зрения выбранной системы критериев оценки качества управления параметры системы автоматического управления скоростью. Решение данной задачи выполнено путём поиска минимума на множестве решений, полученном с применением метода статистических испытаний (Монте-Карло).

6 Установлено в результате выполненного имитационного моделирования, что разработанная система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза с параметрами, найденными в результате решения задачи параметрического синтеза обеспечивает требуемое качество управления скоростью как в установившемся, так и в переходных режимах работы.

7 Проведены экспериментальные исследования разработанной системы автоматического управления в условиях работы на станции Лужская Октябрьской железной дороги. Система была смонтирована на тепловозе ТЭМ7А, который работал по командам задающей системы автоматизации сортировочной станции *MSR32*. Показатели качества управления, в частности, вид переходного процесса а также точность поддержания скорости движения соответствуют требованиям, предъявляемым к таким системам. Таким образом, результаты выполненного эксперимента подтвердили правильность выбранных технических решений и адекватность синтезированных регуляторов и алгоритмов управления. Также результаты, полученные во время эксперимента, показали высокую сходимость с результатами, полученными на имитационной модели, что дополнительно подтверждает её адекватность.

8 Определена экономическая эффективность применения на маневровых локомотивах системы автоматического управления скоростью, позволяющей реализовывать в автоматическом режиме функции надвига и роспуска составов на сортировочных горках. Экономический эффект достигается за счет сокращения затрат на оплату труда машинистам и применительно к станции Лужская - Сортировочная Октябрьской железной дороги составляет 17044,6 тысяч рублей в год.

9 Рекомендуется применять разработанные алгоритмы поддержания заданной скорости движения в системах управления на вновь строящихся и модернизируемых маневровых локомотивах различных серий (ТЭМ14/М/МА, ТЭМ7А, ТЭМ18ДМ, ТЭМ23) эксплуатирующихся на сортировочных горках.

10 Перспективой дальнейшей разработки темы является разработка технических решений и новых алгоритмов управления для реализации беспилотного управления маневровым локомотивом на сортировочных станциях.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 **Журавлев, С.Н.** Система автоматического управления скоростью маневрового тепловоза в режиме горочной работы / С.Н. Журавлев, О.Е. Пудовиков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – №2. – С. 181-194.

2 **Журавлев, С.Н.** Система автоматического регулирования скорости движения маневрового локомотива / С.Н. Журавлев // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 09. – С. 37-44.

3 **Журавлев, С.Н.** К вопросу поддержания заданной скорости движения маневрового локомотива при работе на сортировочной горке / С.Н. Журавлев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 144-151.

б) издания, включенные в международные базы цитирования Scopus:

4 **Babkov, Yu.V.** To the issue of creating a «smart» locomotive / Babkov Yu.V., Kim S.I., Zhuravlev S.N., Pronin A.A. / AIP Conference Proceedings: Scientific

Conference on Railway Transport and Engineering (RTE 2021), <https://doi.org/10.1063/5.0063647>.

в) объекты интеллектуальной собственности:

5 Патент № RU2630859 Российская Федерация, МПК В60L 11/02, В61L 23/34, В61L 27/04, G01S 13/94, В61С 5/00. Маневровый тепловоз и способ его эксплуатации без машиниста : № 2016137629 : заявл. : 21.06.2016 : опубл. 13.09.2017 / С.И. Ким, В.И. Харитонов, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев, А.Б. Федотов, С.В. Ким. ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 9 с. ил. – Текст : непосредственный.

6 Патент № RU2658229 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 11/02, В61С 5/00. Микропроцессорная система регулирования тягового генератора тепловоза : № 2017126885 : заявл. : 26.07.2017 : опубл. 19.06.2018 / С.И. Ким, В.И. Харитонов, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев, С.В. Ким. ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 10 с. ил. – Текст : непосредственный.

7 Патент № RU2709642 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 7/04, В60L 7/08, В60L 50/12. Способ регулирования электрической передачи тепловоза в режиме электрического тормоза : № 2019105857 : заявл. : 01.03.2019 : опубл. 19.12.2019 / С.И. Ким, С.Н. Журавлев, А.Ю. Фомин. ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 14 с. ил. – Текст : непосредственный.

8 Патент № RU2551865 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 11/02. Способ регулирования скорости движения тепловоза с электрической передачей : № 2014133967/11 : заявл. : 19.08.2014 : опубл. 19.08.2014 / С.И. Ким, С.Н. Журавлев, А.А. Пронин, Л.М. Воронкова, Н.Г. Иванова. ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 10 с. ил. – Текст : непосредственный.

9 Патент № RU2652481 Российская Федерация, МПК В60L 7/04, В60L 11/06, В60L 15/20. Способ регулирования скорости движения тепловоза в режиме электрического торможения : № 2017108953 : заявл. : 17.03.2017 : опубл. 26.04.2018 / С.И. Ким, В.И. Харитонов, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев, С.В. Ким. ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 9 с. ил. – Текст : непосредственный.

10 Патент № RU2616111 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 11/02. Способ регулирования скорости движения тепловоза с электрической передачей : № 2016103650 : заявл. : 04.02.2016 : опубл. 12.04.2016

/ С.И. Ким, С.Н. Журавлев, А.А. Пронин, Л.М. Воронкова, В.И. Харитонов, В.В. Грачев, Ф.Ю. Базилевский. ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 9 с. ил. – Текст : непосредственный.

11 Патент № RU2588400 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 15/38, В60L 11/02. Устройство для автоматического регулирования скорости тепловоза с электрической передачей : № 2015108825/11 : заявл. : 13.03.2015 : опубл. 27.06.2016 / С.И. Ким, С.Н. Журавлев, А.А. Пронин, В.В. Грачев, Ф.Ю. Базилевский, Д.Н. Курилкин. ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 11 с. ил. – Текст : непосредственный.

12 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014662981. Российская Федерация. Программный комплекс на систему управления горочным локомотивом САУ ГЛ. Заявка 2014660515. Опубликовано 12.12.2014г. / Журавлев С.Н., Харитонов В.И., Ким С.В. и др.

13 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016614077. Российская Федерация. Программный комплекс на систему управления горочным локомотивом САУ ГЛ. Заявка 2016611528. Опубликовано 13.04.2016г. / Журавлев С.Н., Харитонов В.И., Ким С.В., Долганова Е.В., Пронин А.А.

г) в других изданиях и материалах конференций:

14 Журавлев, С.Н. Математическая модель системы управления тяговым электроприводом маневрового тепловоза с функцией поддержания заданной скорости / С.Н. Журавлев // Сборник материалов I международной конференции аспирантов и молодых ученых «Железная дорога: путь в будущее» АО «ВНИИЖТ». – 2022. – С. 141–147.

15 Журавлев, С.Н. Развитие технологии «Автомашинист» для маневрового локомотива / С.Н. Журавлев // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 4–2(83). – С. 111–116.

16 Журавлев, С.Н. Система управления силовой установкой маневрового тепловоза с алгоритмом автоматического регулирования скорости / С. Н. Журавлев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2021. – № 3–4 (13–14). – С. 31–38.

17 Журавлев, С. Н. Система поддержания заданной скорости локомотива / С. Н. Журавлев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 17 – 22.

18 **Ким, С.И.** Автоматизация управления локомотивом – важный этап цифровизации железнодорожного транспорта / С.И. Ким, С.Н. Журавлев // Вестник ВНИКТИ. – 2021. – Вып. 104. – С. 29–36.

19 **Ким, С.И.** Расчет тормозных характеристик и структура системы регулирования электрической передачи в режиме электрического тормоза модуля тормозного МТ-01 / С.И. Ким, А.Ю. Фомин, С.Н. Журавлев // Вестник ВНИКТИ. – 2018. – Вып. 101. – С. 73–76.

20 **Ким, С.И.** Система управления горочным локомотивом с реализацией технологии автоматического регулирования скорости надвига и роспуска (САУ ГЛ) тепловоза ТЭМ7А / С.И. Ким, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев // Вестник ВНИКТИ. – 2017. – Вып. 100. – С. 76–79.

21 **Ким, С.И.** Система автоматического поддержания заданной скорости горочного локомотива / С.И. Ким, А.А. Пронин, С.Н. Журавлев, В.И. Харитонов, В.В. Грачев, Ф.Ю. Базилевский, Д.Н. Курилкин // Вестник ВНИКТИ. – 2017. – Вып. 100. – С. 80–86.

ЖУРАВЛЕВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
СКОРОСТЬЮ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА**

2.9.3 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

Подписано в печать	«__»_____2024 г.	Формат бумаги 60x90/16
Объем 1.5 усл.п.л	Тираж 80 экз.	Заказ №_____
